# 臺中市政府 109 年度市政發展研究論文獎助計畫

# 論文節錄重點

# 運用日照遮蔽及輻射量評估屋頂型太陽能發展潛力-以臺中市為例

Measurement of Solar Shading and Radiation to Analyze the Development Potential of Rooftop Solar Energy -A Case Study of Taichung City

指導教授:周天穎 博士

研 究 生:許揚典

學 校:逢甲大學

院 所:建設碩士在職學位學程

中華民國一百零九年九月

# 摘 要

近年來政府積極推動太陽能光電系統設置應用,採取「先屋頂後地面」政策,符合臺灣高都市化、高國土耗能、高建物密集之土地使用型態,盡可能在一定程度舒緩都市耗能與大量用電的環境衝擊,將有限國土與建築物空間做最有效率的規劃利用。

過去針對太陽能發電效益或潛力評估多以大尺度平面或單一街廓建物為主,本研究以臺中市舊八區(原臺中市)為範圍,運用 ArcGIS 中Hillshade 及 Solar Radiation 工具模組,藉由地形地貌起伏、建物高程、大氣透視度、有效觀測起訖、不同時段日照高度角及方位角等條件,逐時計算春分、夏至、秋分、冬至四個季節時令日照遮蔽與輻射量情形,透過計算適切網格閥值(Threshold)予以分類,評估有效建置屋頂型太陽能光電建物及區域,並以建物及村里為單位繪製潛力分布地圖。

本研究推估成果顯示日照強度為夏至>春分≒秋分>冬至,峰值時段大致落於中午時分。以單一建物來看,大坑風景區及工業區內建物具較優潛力值。以行政區為統計單元,北屯區>西屯區>南屯區>其他區域,其中,西屯區協和里、林厝里、北屯區水景里、軍功里、南屯區寶山里、春社里等村里建議優先設置。以區位觀點而言,工業區具備較均值高程與充足的屋頂面積,其日照潛力值最優,其次為新興重劃區,相較早期重劃區腹地不足,其具備較完善的日照條件,潛力值最低區域為舊市區周邊建物密集區域及偏遠山區,其建物數量較無法支撐整體潛力數值。

關鍵詞:屋頂型太陽能、陰影遮蔽、太陽輻射量、日照潛力、 地理資訊系統

#### **Abstract**

In recent years, the Taiwanese government has proactively promoted the use of photovoltaic systems and prioritized the installation of rooftop systems over that of ground systems. Such systems are suitable for the land use pattern in Taiwan, which is characterized by high urbanization, land consumption, and building density. Rooftop photovoltaic systems can alleviate energy consumption problems in cities, reduce environmental impacts induced by excessive power consumption, and maximize the use efficiency of the limited land and building space.

Previous assessment of solar energy efficiency or potential has mostly been performed on a large-scale plane or buildings of a single block. In this study, the eight districts of the traditional Taichung City were selected as the research site, and the Hillshade and Solar Radiation tools in ArcGIS were used to calculate the amount of shading and solar radiation in the spring, summer, autumn, and winter equinoxes. The calculations were performed based on topography, building height, atmospheric visibility, effective observation start and end time, and solar zenith and azimuth angles at different time points. According to the calculations, adequate mesh thresholds were selected for classification to identify buildings and areas suitable for installing rooftop photovoltaic systems. In addition, buildings and villages were used as units to create potential distribution maps.

The results showed that sunshine intensity was in descending order of summer equinox > spring equinox ≒ autumn equinox > winter equinox. The peak sunshine intensity was mostly observed at the noon time of day. Analysis of single buildings revealed that buildings in the Dakeng Scenic Area and industrial zones demonstrated high potential for solar energy generation. In terms of administrative districts, Beitun District demonstrated the highest potential, followed by Xitun, Nantun, and other districts. In particular, installation of photovoltaic systems should be prioritized in Xiehe Village and Lincuo Village in Xitun; Shuijin Village and Jungong Village in Beitun; and Baushan Village and Chunshe Village in Nantun. In terms of zone types, industrial zones exhibited higher building heights and more sufficient roof space than did other zone; hence, these zones demonstrated the highest energy generation. New redevelopment potential for solar

demonstrated the second highest potential. Compared with early redevelopment zones with insufficient space, the new redevelopment zones were exposed to sufficient sunshine. Dense building zones neighboring the old city region and remote mountain zones exhibited the lowest potential because the number of buildings in these zones could not provide sufficient space for rooftop solar energy.

Keywords: Rooftop Photovoltaic System, Shadow Effect, Solar Radiation, Solar Energy Potential, Geographic Information System



# 目 錄

摘		要	•••••••••••••••••••••••••••••••••••••••	I
Ał	st	rac	ct	II
目		鉻	•••••••••••••••••••••••••••••••••••••••	IV
•				
画	日	錸	•••••••••••••••••••••••••••••••••••••••	V
表	目	錄	•••••••••••••••••••••••••••••••••••••••	VI
壹	•	前	吉	1
貮	•	研	<b>F究動機與目的</b>	3
參	•	研	<b>F究限制與假說</b>	4
	_	\ <del>;</del>	建物屋頂型態	4
	二		建物樓高	4
	三		大氣條件資料	4
	四	`	太陽能光電系統轉換效能	4
肆	•	文》	獻回顧	6
	—	•	影響太陽幅照量(度)之因數	6
	_	. `	陰影遮蔽影響	10
伍	`	研	<b>  究方法</b>	13
			地域位置及特徵	
	二	. • ,	研究設計	14
	三		資料處理	15
			:果及研究發現	
	—	`	日照遮蔽分析情形	25
	二		太陽輻射量分析情形	28
柒	•	日	照遮蔽、太陽能輻射量與各變數關係	32
	—	`	日照遮蔽及太陽能輻射量關係	32
	_	. `	太陽輻射量與各變數關係	32
捌	•	結	·論及實質推動建議	34
			結論	
	<u>_</u>	•	實質推動建議	35
參	考	文》	獻	參1
附	錄	_	、逐時陰影遮蔽變化	
附	鉻		、涿時大陽輻射量變化	

# 圖目錄

圖	1-1、近五年全球再生能源裝置容量	2
圖	4-1、太陽同步軌道示意圖	7
圖	4-2、太陽仰角、天頂角及方位角關係圖	8
圖	4-3、太陽輻射組成	9
昌	4-4、雲覆蓋及全天空影像對於大氣條件影響之評估流程	. 10
圖	4-5、竿影法示意圖	. 11
圖	4-6、最佳二值化閥值示意圖	. 12
圖	5-1、本研究區域範圍	. 13
圖	5-2、建物樓層數分布	. 14
圖	5-3、本研究分析流程	. 15
圖	5-4、研究範圍地形數值高程與理論建物高程(DEM+建物樓高)	. 16
圖	5-5、太陽各觀測角度示意	. 16
圖	5-6、坡度與坡向分析網格	. 18
圖	5-7、太陽輻射量模型計算流程	. 20
圖	5-8、仰視半球畫面	. 20
圖	5-9、水準角度、生成的視域和天空視圖示意	.21
圖	5-10、太陽圖示意	.21
圖	5-11、天空圖示意	. 23
圖	5-12、視域與太陽圖(左)、天空圖(右)疊加示意	. 24
圖	6-1、四季逐時陰影平均灰度值	. 26
圖	6-2、四季逐時平均太陽輻射量	. 29
圖	6-3 RASTER JOIN TO VECTOR	. 29
圖	6-4、太陽能屋頂潛力建物分布及佔比	.30
圖	6-5、各行政區太陽輻射量潛力分布	.31
昌	6-6、各行政區太陽輻射量與特定區關係分布	.31
圖	7-1、平均日照遮蔽及太陽能輻射量各時段變化情形	. 32
圖	7-2、累計太陽輻射量關係與各變數關係_以村里為單位	. 32

# 表目錄

表	5-1	臺中	'氣象站鸛	見測太陽仰	角及方	位角	•••••		14
表	6-1	夏至	逐時陰景	<b>彡遮蔽變化</b>	(部分)	時段)。	•••••		25
表	6-3	灰度	等級與次	文數對應表	(部分)	時段)。	•••••		27
表	6-4	各行	政區太陽	<b></b> 能光電潛	力_以日	照遮蔽	評估(音	部分行政區	)27
表	6-5	夏至	逐時太陽	<b>弱輻射量變</b>	化(部	分時段)	)		28
表	6-6	各行	政區太陽	<b></b> 能光電潛	力_以太	、陽輻射	量評估	(部分行政	區)30
表	7-1、	太陽	輻射量與	各變量相	關程度	以村里	為單位		33



# 壹、前言

能源,是生命賴以為生的養分,也是各國經濟發展的重要命脈。1970年代工業革命至今,人類大量使用化石燃料,大幅提高了社會生產力,卻也極大程度造成空氣汙染、海平面上升、臭氧層破洞等衍生環境問題。為減緩全球暖化所造成的環境衝擊,各國早於 1997 年於京都的「第三次締約國大會」(The third session of the Conference of the Parties, COP3)中簽署「京都議定書」,規範 38 個締約方及歐盟,以個別或共同的方式控制人為排放之溫室氣體數量,減少溫室效應對全球環境所造成的影響。而後陸續於 2009 年簽訂的「哥本哈根協定」、2010 年的「坎昆協議」及 2014 年的「聯合國氣候變化網要公約」等國際規範。2015 年底於法國締約的「巴黎協定」,超過 180 個國家訂定減排及自主貢獻 KPI目標,其目標為控制升溫小於攝氏 2 度,並盡可能限制在攝氏 1.5 度以內,包含中國、印度、歐盟等諸多國家均表示履行合約內容。

然而,聯合國環境規劃署(United Nations Environment Programme, UNEP)最新發表年度排放差距報告(Emissions Gap Report 2018)指出,過去 10 年全球碳排放仍處於上升趨勢,即便現今各國提出的減排政策,仍未無法實現「巴黎協定」訂定整體目標;顯示世界各國除加強既有節流政策外,更亟需進行經濟及能源轉型。

在新能源與再生能源中,太陽能具備照射分布廣泛、無需運能、環境影響小及成本相對低廉等優勢,且能量來源近乎無窮盡。此外,太陽光照射地球一小時所帶來的能量,相當於全球一年的能源總消耗量(施天從等,2009),被國際公認是未來最具競爭力的替代能源之一。

根據國際可再生能源機構(International Renewable Energy Agency, IRENA)2020 年最新調查資訊(圖 1-1),直至 2019 年底全球再生能源裝置容量已達到 2,537GW,其中太陽能裝置容量達 586GW,且在 2019 年新增再生能源裝置量中占約 55%,比起去年成長 20%,成長幅度位居再生能源之冠。國際能源總署(International Energy Agency, IEA)也在再生能源(Renewables 2019)年度報告中提到,未來預估成長最快速的是太陽能,其發電量未來 5 年內約可增加 600 GW,且發電成本可降低 15%至 35%;特別在屋頂型太陽能光電系統有望增加逾一倍,2024 將僅有 6%的屋頂設置太陽能光電,表示太陽能市場仍具有龐大的發展空間,也顯示國際多數對於再生能源的提倡與作為,無論在環境、經濟、政策面均有高度共識,太陽能光電勢必成為未來發展趨勢。

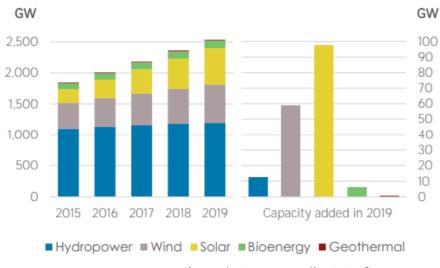


圖 1-1、近五年全球再生能源裝置容量

資料來源:國際可再生能源機構(International Renewable Energy Agency, IRENA)

臺灣國土全境位處熱帶及亞熱帶,擁有絕佳地理位置,其中北迴歸線穿過臺灣中南部地區,所以陽光充沛,日照充足,日照時間長,日光偏轉角小,其地面上每天可大約截取 1.7×1,011 kW/hr 的太陽能(黃偉倫,2002),僅有少數地區未達 1,500-2,000 小時的終年日照量,有些地方甚至可達 2,500 小時的日照量(黃慧文,2007)。同時,地狹人稠的環境,導致能源密集且消耗量龐大,特別近年夏季屢創極端高溫紀錄,伴隨整體供電瀕臨限電警戒線。也因此,政府近年積極展開綠色能源佈局,相繼於 2011 年提出「陽光屋頂百萬座」、2016 年「太陽光電 2 年推動計畫」、2017 年「綠能屋頂全民參與」等推動政策,將我國土地與建築物空間作最有效率的規劃利用,達成 2025 年綠能占總發電量 20%的非核家園目標,同時評估可有效建置屋頂型太陽能光電建物及區域,亦是本研究核心分析主軸。

# 貳、研究動機與目的

臺灣為海島型國家,能源有 98%仰賴進口,發電屬於獨立的孤島型電網系統,結構分別以燃煤 (46.11%)、燃氣 (33.23%) 及核能 (11.79%) 發電為大宗 (經濟部能源局,2020)。特別臺灣屬於高國土耗能的密集居住環境 (王仁俊,2005),且位處東亞主要地震帶及西太平洋颱風主要侵襲路徑,世界銀行 (2005) 表示臺灣同時暴露於三項以上天然災害風險 (Natural Hazard)之土地面積與面臨災害威脅之人口為 73%,而暴露於兩項以上天然災害之土地面積與面臨災害威脅之人口高達 99%,屬於全世界災害高風險的區域。此外,若發生國際能源震盪、龐大用電高於全世界災害高風險的區域。此外,若發生國際能源震盪、龐大用電高條或天然重大災害,亦可能陷入高度危機風險。同時,近年因空氣汙染及環保意識高漲,政府逐漸以綠色能源作為驅動經濟發展的新引擎,以降低化石燃料或核能依賴,其中又以太陽能光電於民生推廣力道最強、成長幅度最大,不僅順勢推動能源產業轉型,達到兼顧能源安全、環境保護及經濟發展的三贏目標。

過去針對太陽能發電研究多以小尺度單一建物或大尺度平面分析太陽能潛力,而面對臺灣高度密集都市型態,若要有效推估太陽能潛力則需兩者兼顧,一方面評估該區域建物是否有充足日照量,二方面也使建材一體型太陽光電系統(Building Integrated Photovoltaics, BIPV)開始應用於建築物中(內政部建築研究所,2009),若能善用臺灣豐富日照資源結合都市型態發展,可讓都市耗能及環境在一定程度上舒緩助益。

本研究利用地理資訊系統(Geographic Information System, GIS)模擬都市屋頂型太陽能日照潛力,選定原臺中市八個行政區作為研究範圍,分別評估春分、夏至、秋分及冬至之建物日照遮蔽情形與計算太陽能輻射量,並研析兩者相互關係。最終,建立屋頂型太陽能光電潛力分析模型,可有效計算各區域建物屋頂太陽能光電設置潛力及適宜性,並繪製其空間分佈狀況,期與政策實務推動上作為有效推估之參擬。

是故,本研究以屋頂型太陽能發展作為切入點,其政策推動不僅涵蓋產業經濟發展、市容景觀、建築安全及空間利用,更重要的是符合臺灣都市型態用途與用電結構舒緩,達到節能減碳之效。其重點以此作為契機,轉化為評估有效發展太陽能光電潛力之建物及區域,故不深入探討建物結構與光電效率轉換問題,而是偏向原始接收太陽能輻射值,作為整體太陽能發電潛力趨勢之決策參酌。

# **參、研究限制與假說**

影響太陽能光電因子眾多,涉及層面廣且複雜。以自然條件而言, 如四季變化、地理位置、海拔、地形地貌、雲覆蓋等;人為條件則包含 構造物遮蔽、建物型態、建物或裝置系統座向、模組轉換效率等因素, 均會影響地球對太陽輻射之接收。爰此,受限於時間、軟硬體設備及資 料來源,本研究需針對部分內容條件進行假設性設定,以下說明:

#### 一、 建物屋頂型態

臺灣屋頂型態種類常見為單傾斜、雙斜頂及平屋頂,惟目前建管資料並無統計屋頂型態,若透過遙測影像方式辨識則是另一項研究領域;故本研究假設屋頂均為平面式,且屋頂面積均可有效利用,故不考量屋突或其他設施佔用情形。

#### 二、 建物樓高

建物或人工構造物高地落差可能在鄰近建物屋頂形成陰影,造成太陽能板在不同時段遮蔽情形,Hussein A. Kazem 等(2017)以人工覆蓋物的陰影評估太陽能陣列之影響,結果表示電壓及功率的降低取決為陰影效應。惟本研究並無法有效取得臺中市各建物實際樓高,故假設每層樓為3公尺,以建物總樓高=樓層數×3公尺進行計算。

# 三、 大氣條件資料

太陽輻射經由大氣層透過直射、散射、吸收等作用到達地面,故大氣層可看作一個非透明介質,使太陽輻射在穿透過程中衰減;劉國輝(2015)說明大氣透明度是大氣對日照衰減作用的一個參數,且與天空雲量及大氣所含懸浮微粒有關。若藉由中央氣象局逐時觀測站資訊確實可取得大氣能見度(Visibility)與總雲量(Cloud Amount),然而以逐時資料計算本研究量體過於龐大,及既有計算機效能運行時間過長等因素,設定本研究於春分、夏至、秋分及冬至之天氣條件為「晴朗」,即能見度高、總雲量較低的情況,以均質、穩定大氣作為其透明度之固定參數。

# 四、 太陽能光電系統轉換效能

太陽能板接收日照後,會將輻射能轉為直流電,再由逆變器轉為符合日常可用的交流電。黃宣文(2014)提到太陽能發電過程中,電板模組(Modules)的運作功率會直接影響發電成效,其主要牽涉電池種類、串並聯結構、穩定性、製程等橫跨光電領域。而本研究主要分析成果之

一為原始「輻射量」, 需經上述提到太陽能光電系統轉換成功率單位, 然台電或各系統商之實際發電量非開放資料, 且各系統商所建置模組效 能差異, 亦非本研究探討範疇, 故不考量其轉換效能, 僅評估平面屋頂 在不同時段所接收之太陽輻射量。



# 肆、文獻回顧

近年太陽能光電發展潛力已成世界能源探索趨勢,各專業觀點與相關研究亦有可汲取之處。針對影響太陽能光電設置潛力研究中,有關形成、日照強度、遮蔽、時間段及分析方法等進行探討。

#### 一、 影響太陽幅照量(度)之因數

太陽輻射量(Solar Radiation)指太陽從核融合所產生的能量,經由電磁波傳遞到各地的輻射能。太陽輻射的光學頻譜接近溫度 5800K 的黑體輻射(維基百科,2018)。其能量主要分布在紫外線、可見光和紅外線,當中大部分的能量集中於可見光和紅外線,紫外線僅佔極少部份。其經過大氣層的吸收、散射、反射等作用後到達地球表面上單位面積單位時間內的輻射能量。

依照香港天文臺(2019)對於太陽輻射影響因數觀點,能量到達地 球大氣層的強度取決於太陽的高度角、日地距離和日照時間。大致上, 中午輻射強度大於早晚;夏季輻射強度大於冬季;低緯地區輻射強度大 於高緯度地區。由於太陽輻射量在地球各區的分布不平均,導致各區熱 量的差異,引起大氣運動。大氣環流將熱量和水汽從地球一個地區輸送 到另一地區,從而交換高低緯度之間、海陸之間的熱量和水氣,促進地 球上的熱量平衡與水平衡,同時也引起各類天氣變化及各地不同氣候。

吳政忠(2002)提到地球表面吸收太陽輻射能的多寡,受到下列因數影響:(1)緯度的高低,(2)大氣層的吸收作用,(3)雲量多寡,(4)水陸性質的差異,以及(5)地勢的高低及地形的坡面等。

黄瓊瑩(2017)提到影響地面所接受太陽輻射的因數主要有三類, 分別是天文因數、大氣因數和地表因數:

天文因素對於太陽輻射狀況的影響主要因數有:太陽赤緯、太陽高度角、太陽方位角及日地距離等,這些因素會決定各地區所接受到的太陽輻射量大小。而大氣因數對於太陽輻射的影響,主要是因為太陽輻射在大氣中會受到二氧化碳、臭氧、氧氣或水氣等的散射和吸收,造成地面上實際接收的太陽輻射量被減弱,這些分子造成的散射情況非常複雜,所以要精確地描述太陽輻射在大氣中的傳輸現象有其困難度。天文因素對於太陽輻射狀況的影響主要因數有:太陽赤緯、太陽高度角、太陽方位角及日地距離等,這些因素會決定各地區所接受到的太陽輻射量大小。地表因數對太陽輻射的影響,會因為地形和地表覆蓋物的不同而異,地形的影響主要是海拔高度、坡度、坡向及地形間的相互影響。而

地表覆蓋物的影響主要是:覆蓋物的物理性質和覆蓋狀況,一般常見的 地表覆蓋物有植被、水域和雪被等覆蓋情況。舉例來說雪地具有很大的 反射率,而水域卻具有較低的反射率。

綜上所述,除第一節提到日地距離及緯度關係,影響太陽能量對地傳遞因素應歸納為(1)日地距離及緯度關係(2)太陽仰角、方位角(3)太陽直射及漫射(4)單位時間日照接收能量(5)地形條件(海拔、高度、坡度、坡向)(6)地表遮蔽覆蓋等有高度相關。以下說明:

#### (一) 天體相對運動與季節變化

太陽光電發展潛力深受地球自轉、公轉影響,其與太陽在天球上相對軌跡「黃道」產生四季太陽直射地球交點,每當春分秋分時,太陽經過黃道赤道交點,這時太陽出於正東,沒於正西。春分後,太陽沿黃道北移,夏至時到達最北,即北回歸線上,這時太陽出於東偏北方,沒於西偏北方;秋分後,太陽沿黃道南移,冬至時到達最南,即南回歸線上,這時太陽出於東偏南方,沒於西偏南方(中央氣象局,2020)。

太陽根據不同季節相對地球南北移動,其日照強度與高度角成正比,當到達90°時視為太陽直射點,所在經線的地方時理論上為正午12時。故於春分秋分時,太陽於日正直射赤道、夏至時直射北回歸線、冬至則直射南回歸線,此後北移循環,如此周而復始的回歸運動,週期為365日5時48分46秒,稱為一個回歸年,或稱太陽週年回歸運動(維基百科,2013)。

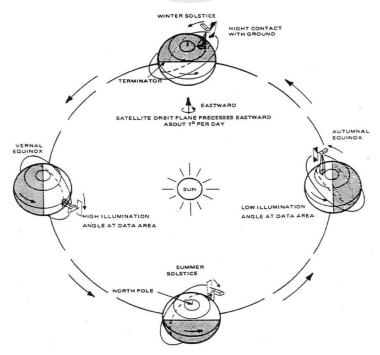


圖 4-1、太陽同步軌道示意圖

資料來源:美國國家航空暨太空總署(National Aeronautics and Space Administration, NASA)

而臺灣緯度位於北緯 22 度至 25 度,南部屬熱帶季風、北部屬副熱帶季風氣候,夏至時太陽直射臺灣中南部達到最高緯度,爾後漸往赤道方向移動。故太陽直射軌道相較於臺灣地理位置位在偏南方,理論上太陽能板位置應以向南為最佳方位,惟本研究假設屋頂均為平面,且不考量實際太陽能板設置角度,但仍可依地形地勢走向與建物座向作為影響太陽能輻射評估依據之一。

#### (二) 太陽仰角(高度角)及方位角

#### 1、仰角(高度角)

太陽仰角,又稱高度角 (Elevation Angle),是太陽中心值射當地光線與當地水準地面之夾角。換句話說,即觀測者仰望太陽的角度,其值在 $0^{\circ}\sim90^{\circ}$ 之間變化,日出日落時為 $0^{\circ}$ ,正午則在天頂 $90^{\circ}$ 。

一般而言高度角與天頂角(Zenith Angle)總和為90°,故知其一即可計算。

#### 2、方位角

方位角(Azimuth Angle)量測方法是令觀測者的北方為零點,由觀測者所在之水平面向東(或順時鐘)方向旋轉到目標物的垂直面,所經之水準夾角。方位角介於0°到360°之間。因此:正北方:0°或360°、正東方:90°、正南方:180°、正西方:270°。

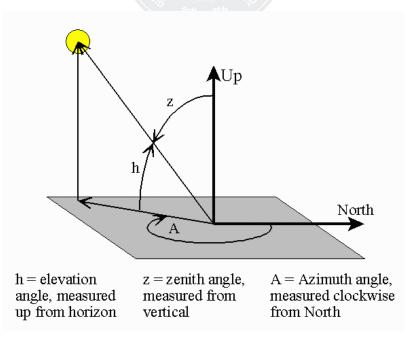


圖 4-2、太陽仰角、天頂角及方位角關係圖

資料來源:National Oceanic & Atmospheric Administration (NOAA)

#### (三) 太陽直射及漫射

Frank Vignola 等(2012) 曾提出太陽輻射組成有三項主要元素,分 為直接輻射(Direct Normal Irradiance, DNI)、水平漫射幅射(Diffuse Horizontal Irradiance, DHI) 及全天空輻射 (Global Horizontal Irradiance, GHI),如圖 4-3。理論上全天空輻射係由太陽直射與漫射組成,其變化 量大致成正比,關係如下:

$$GHI = DNI \times \cos \theta + DHI \tag{4-1}$$

其中 $,(\theta)$  為太陽天頂角 (Solar Zenith Angle) •

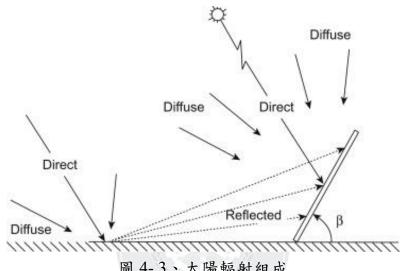


圖 4-3、太陽輻射組成

資料來源: Juan Reca-Cardeña 等 (2018)

太陽輻射經地球大氣透射後會產生直射及漫射現象,而天空條件取 決於大氣透明度 (Transparency), 如雲覆蓋量、水氣、懸浮微粒等。一 般大氣特性下,雲層為主要影響因素。美國天文愛好者協會(The American Association of Amateur Astronomers, AAAA) 依天空透明度從 混濁到清澈分為 0~7 級,相關計算則考量透射率 (transmittance) 及透 明係數 (transparent coefficient)。另一方面,日本學者 Megumi Yamashita 等(2019)則運用多種太陽輻射傳感器得出太陽幅照度,並配合魚眼鏡 頭相機拍攝全天空影像,以亮度、像素及天空面積為基準判斷不同時段 天空條件,用以計算全天候光量子通量密度(Photosynthetic Photon Flux Density, PPFD) 對於植物行光合作用有效性研究,其分析流程如圖 4-4 所示。行政院原子能委員會(2014)年在委託研究報告中提出以 WRF (Weather Research and Forecasting)模式輸出之溫度、濕度、風速、風 向等氣象因子評估其對高聚光型光電系統(High-Concentration Photovoltaic, HCPV) 系統整體效益之影響,分別模擬晴空、多雲及降 雨情况下,大氣與地面端接收太陽輻射量分布概況之比較;然而,此方

式受限於地面測站數量限制,且由雲層及水氣推估太陽全天空輻射量較屬於相對關係,仍需全盤考量地形遮蔽因子。

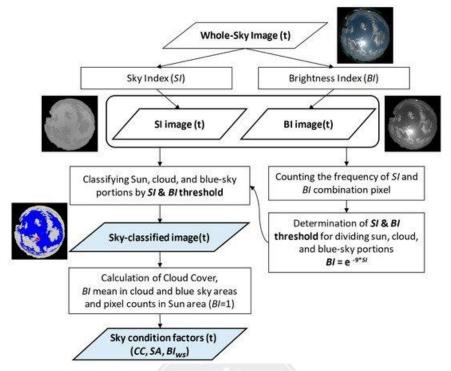


圖 4-4、雲覆蓋及全天空影像對於大氣條件影響之評估流程

資料來源: Megumi Yamashita (2019)

太陽輻射在不同時段、不同地點氣象條件有所差異,一般條件下,直接輻射佔絕大多數,漫射其次,而剩下會透過地表、地物反射構成總輻射量極少部分,故多數計算太陽輻射能量會剔除地表反射。對於天空條件而言,其組成成分複雜,相較雲覆蓋衛星影像辨識,氣溶膠(Aerosol)等懸浮微粒在不同顆粒大小及密度尚未有準確光譜波段,故大致上仍以大氣透明度為綜合性考量因子。因此,計算太陽總輻射量需考量上述大氣因子外,直接輻射考量為與太陽法向量最短路徑,數學式多半以θ或SZA表示天頂角,而水平漫射輻射則主要受雲層、氣體分子、懸浮微粒等影響產生。

# 二、 陰影遮蔽影響

陰影遮蔽為目前實務上評估太陽能光電潛力之大宗,無論是地形地貌或建物遮蔽均有顯著關係,特別在臺灣地狹人稠之都市型態尤其意義。經濟部標準檢驗局臺中分局(2010)提出建構建築整合型太陽光電發電系統(Building Integrated Photovoltaic module, BIPV),若陰影遮蔽一片模組的一部分時,將減少整片模組及其他串聯模組之發電量。Chaintreuil等(2008)也提出單晶矽太陽光電陣列的連結方式,由計算結果得出該面板僅2.6%的陰影,就會造成16.7%的總陣列電能損失。

Google 公司於 2015 年推動一項名為「Project Sunroof」的項目,即運用 Google Map 衛星影像與 3D 建模疊合,考量各地天氣條件及遮蔽,評估全美近 6,000 處屋頂日射量。Liang Cheng 等 (2018) 運用地面 Lidar 與點雲產製 DSM,藉由全天空樣態與射線法計算小尺度社區建物模型 遮蔽情形,進而評估太陽能潛力並換算太陽幅照度。

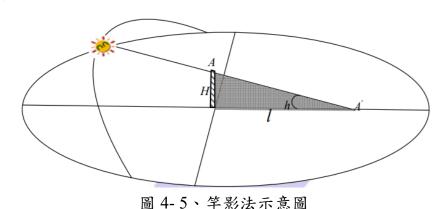
陳儀安(2011)利用 WindPerfect 之光線追蹤法進行建物表面陰影模擬,並結合日照軌跡分別計算夏至、冬至屋頂平面與垂直牆面逐時日照陰影狀況,並以坐標網格建立建物方位資料庫,將「無陰影」定義為「有日照」,「有陰影」定義為「無日照」,最後將日照情形累計計算。結果顯示樓層越高屋頂,出現累積日照時數面積比例越高,可見樓層高度與屋頂累積日照時數呈現正相關,且不論夏至或冬至,屋頂皆比牆面日照累積時數高,可見以整體建物來看,屋頂確實較為適合建置太陽能光電設備。

錢家宏(2009)以建築學的竿影法為基礎,運用太陽相對運動關係直射竿子端點形成陰影變化,故需考量(1)建物高度(2)陰影臨界點(位置)(3)太陽仰角及方位角,並利用三角函數定理推導如圖 4-5 所示。另一部分,則評估陰影覆蓋長度及範圍影響發電量,並以 KYOCREA KC80 太陽能模組為例,並假設遮蔽驟降點位置,當陰影遮蔽範圍達驟降點,則發電量為0。然而,其結果僅分為遮蔽及未遮蔽情形,當太陽輻射依季節、時間及角度改變時,陰影亦會有深淺變化,若以數值化遮蔽值則可細分量化太陽能板受影響程度。

$$\frac{L}{H} = \cot (h) \tag{4-2}$$

$$! + :$$

h:太陽仰角、H:遮蔽物高度L:遮蔽物陰影長度



資料來源:錢家宏(2009)

柯酈(2014)及陳家榮等(2015)均利用主流地理資訊分析軟體 ArcGIS 中 Hillshade 及 Sun Shadow Volume 工具模組,將建築物高程資料及不同時段的太陽方位角、高度角加入運算,產生逐時之日照陰影灰階度值 0~255,最後經由影像二值化(Binarization)分類,完成建築物屋頂陰影區之計算。然而,灰度值為網格資料(Raster)資訊,對於較複雜物體可能因其圖元(Pixel)大小而有轉換上誤差,較小建物因不易辨識也須做取捨;另一方面,二值化閥值優點為可節省計算時間,然容許值過大,特別在建物邊緣計算可能會有較大誤差,故在建物大小、物體複雜度及陰影灰度需有一定程度假設條件;其計算方式可由相關統計分類原理建立閥值,或使用多值化分類使其提升精度。

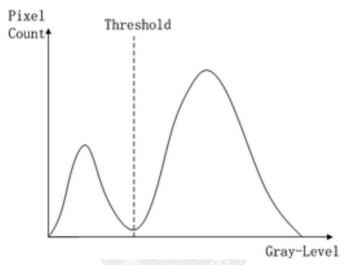


圖 4-6、最佳二值化閥值示意圖

資料來源: Bo Lei 等 (2015)

綜上得知,模擬建物陰影條件包含太陽位置(仰角、方位)、遮蔽物高度與地形地勢,理論上透過太陽及建物法向量得出最短路徑之入射角,並結合後者需透過坡度及坡向值計算,可較真實得出陰影模擬範圍。惟遮蔽情況並非單一化,人工構造物所形成的陰影厚度(thickness of shadows)亦有所影響(Hussein A Kazem 等, 2015),而所謂陰影厚度一般可解釋成光源投射在其表面上之強度變化,並藉由影像處理方式計算其陰影差異,並透過網格資料取得其像元值,最後予以分類評估。

# 伍、研究方法

本研究以建物屋頂作為評估太陽能潛力,重視日照條件、建物高程、 地形及相鄰位向關係,以利分析陰影遮蔽與日照條件,並說明其資料產 製過程及整體分析流程。

#### 一、 地域位置及特徵

本研究選定臺中市舊八區,即臺中縣市未合併前之省轄市,行政區包含中區、東區、南區、西區、北區、北屯區、西屯區及南屯區,整體地勢呈現中央低平而四周隆起圍繞,中間盆地佔絕大部分,西側為較平坦臺地(100m~300m),東側為起伏較高丘陵與山區(100m~800m)。而本研究觀測位置坐落於北區(東經120°41',北緯24°09'),屬本研究觀測點接近中央位置,且具有各時段完整高度角及方位角,故以此為基準,如下圖5-1所示。



圖 5-1、本研究區域範圍

依據中央氣象局(表 5-1)公告可觀測太陽仰角與方位角得知,一 天中日照時段大致為上午6時至下午6時,由於太陽照射受天體相對運 動範圍影響,其日照強度與高度角成正比,當到達90°時視為太陽直射 點,春分冬至上午6時觀測無資訊,秋分冬至下午6時觀測無資訊,顯 示其角度均為0°。故本研究統一全時段可觀測資料,以逐時計算上午7 時至下午5時,共10小時作為日照及遮蔽分析時段。

臺中 (東經 120°41', 北緯 24°09')															
季節	時	6	7	8	9	10	11	中天	12	13	14	15	16	17	18
春分	仰角		12.6	26.1	39.2	51.4	61.3	65.9	65.9	62.5	53.1	41.2	28.2	14.8	1.1
各刀	方位		95.7	102.7	111.4	124.0	144.6	180.0	177.2	211.2	233.6	247.1	256.3	263.4	269.7
夏至	仰角	9.6	22.5	35.7	49.2	62.8	76.5	89.3	89.3	76.1	62.4	48.8	35.4	22.1	9.2
发土	方位	68.5	73.4	77.6	81.5	85.3	90.0	180.0	195.6	270.2	274.8	278.6	282.5	286.8	291.7
秋分	仰角	2.4	16.0	29.4 104.5	42.4	54.1	63.1	65.9	65.8	60.5	50.3	38.0	24.9	11.3	
4XXJ	方位	90.9	97.2	104.5	113.9	128.1	151.5	180.0	186.2	217.8	237.4	249.5	258.0	264.8	
々云	仰角		4.0	15.7	26.2	34.8	40.5	42.4	42.4	39.9	33.7	24.7	14.0	2.2	
冬至	方位		117.9	125.3	134.9	147.4	163.2	180.0	181.4	199.4	214.7	226.7	235.9	243.0	

表 5-1、臺中氣象站觀測太陽仰角及方位角

資料來源:中央氣象局

本研究區域為臺中市經貿商業與市政中心,亦是主要建物及人口密集區。整體面積約 163.4256 平方公里,佔臺中市總面積約 73%,總人口約 41.6%。總建物數 310,745 棟,1-5 層樓約佔 94%,總計 293,128 棟、6-20 樓 16,881 棟、20 樓以上 736 棟。除惠來、大墩、忠明、中正、東山等重劃區,多數街廓及建物相鄰緊密,若有高低落差較大之建物,較容易受陰影遮蔽影響。

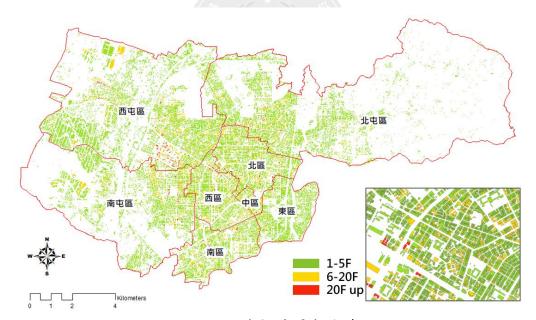


圖 5-2、建物樓層數分布

# 二、 研究設計

本節主要說明整體資料架構與實施流程,在進行模擬分析前,需預 先蒐集影響潛力評估因子,如起訖時段、觀測經緯度、太陽高度角及方 位角、高程、坡度坡向、雲覆蓋等。第二步,需進行資料前處理格式轉 換,均以網格資料計算,並依建物為單位,逐時計算日照遮蔽與太陽輻 射量,藉由標準化與閥值分類推算各建物或區域太陽能潛力值。最後依

#### 各變量評估其相關性。本研究分析流程如圖 5-3 所示:

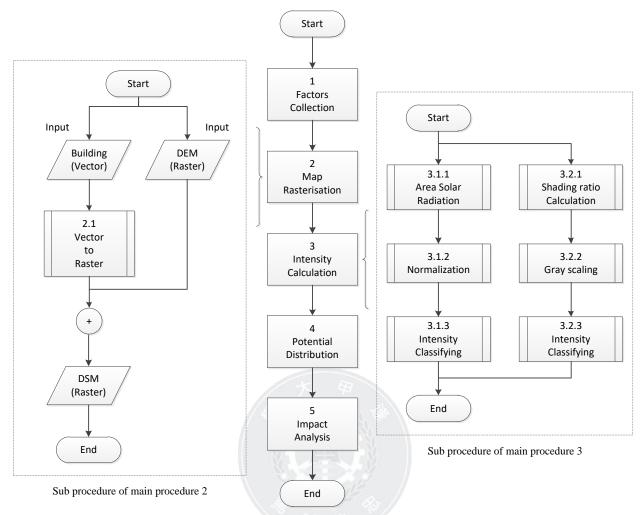


圖 5-3、本研究分析流程

#### 三、 資料處理

針對蒐集資料 GIS 資料前處理,並說明資料取得後轉換方式,最後進行陰影分析及太陽能輻射量計算。

#### (一) 高程計算

計算遮蔽需考量地面高程,分為海拔地勢高程與建物高程,惟兩者在資料型態上存在根本差異。以實務面而言,兩者資料可相互轉換,方能進行計算,而其高程可由屬性資料取得,用以描述空間資料特徵、數量、現象、位相關係者,可在空間資料獲取過程中同時判釋錄存,或在獲取後分析萃取(林傑斌等,2002)。而本研究採用 ArcGIS 中 Hillshade 及 Solar Radiation 工具模組均需以網格資料作為輸入值,故將建物圖資轉換為網格資料,再與海拔地勢高程進行加總得出真實建物高程。

本研究建物屬性資料並無實際高程,僅提供樓層數,故設定每層樓為3公尺,建物高程相當於樓層數×3公尺。空間資料轉換使用ArcGIS

中 Polygon to Raster 功能,輸出欄位為高程。而本研究海拔地勢高程採用 5×5 數值高程模型 (Digital Elevation Model, DEM),利用 Raster Calculator 將兩者高程欄位加總得之,得出本研究設定之實際建物高程,技術上來說可視為數值地表模型 (Digital Surface Model, DSM),如圖 5-4 所示。

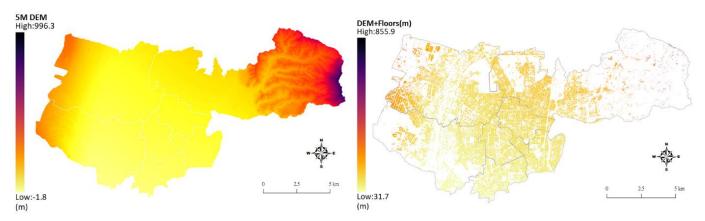


圖 5-4、研究範圍地形數值高程與理論建物高程(DEM+建物樓高)

#### (二) 日照遮蔽分析

Hillshade 工具模組可根據太陽相對位置,計算不同時段地表陰影遮蔽情形,此函數包含 DTM、太陽高度角與方位角。其運作原理(謝有忠等,2016)透過假定的光源方向和角度,計算每一網格與鄰近網格的相關性,各網格的陰影值為 0~255(灰階值),其遮蔽影響強度可由計算成果數值顯示得知,數值越低越受遮蔽影響,255 則是最亮區域。

在運算 Hillshade 中方位角指太陽的角度方向,其位置由 0°到 360° 表示,以正北方為基準向順時針量測。90°太陽方位角表示東方,180°太 陽方位角表示南方,270°則表示西方。而太陽高度角是觀測位置地平線 以上的海拔或光源斜率或角度,其範圍自 0°(地平線)至 90°(天頂), 各觀測角度以下圖 5-5(本研究自行繪製)示意。

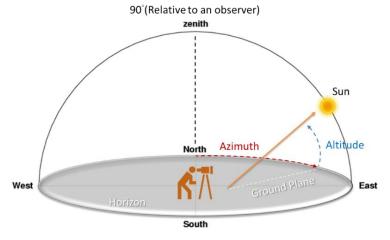


圖 5-5、太陽各觀測角度示意

計算日照陰影值需提供光照源的高度角和方向角,而地形地勢所產 生的坡度與坡向,亦會影響輸出網格中各像元的最終陰影值。詳細計算 陰影值演算法如下:

$$Hillshade = 255.0 \times \{ [cos(Zenith_{rad}) \times cos(Slope_{rad})] + [sin(Zenith_{rad}) \times sin(Slope_{rad}) \times cos(Azimuth_{rad} - Aspect_{rad})] \}$$

$$(5-1)$$

若陰影值的計算結果<0,則輸出像元值=0。

#### 1、步驟一:太陽入射角計算

計算太陽入射角度需將高度角轉換為天頂角,第二步為天頂角轉換 為弧度。Hillshade工具計算陰影值的公式要求以弧度為單位,且為垂直 偏向,其計算推導公式如下:

#### (1) 將高度角轉換為天頂角

一般將觀測者頭頂正上方視為天頂點,天頂角為天頂點與光源方向的夾角,為高度角的餘角。

$$Zenith_{deg} = 90 - Altitude$$
 (5-2.1)

(2) 轉換為弧度

$$Zenith_{rad} = Zenith_{deg} \times \pi \div 180$$
 (5-2.2)

#### 2、步驟二:太陽入射方向計算

太陽入射方向係將其方位角由地理角度(羅盤方向)轉換為數學角度(直角),最後將方位角轉換為弧度。以下公式推導:

(1) 轉換方位角

$$Azimuth_{math} = 360 - Azimuth + 90$$
 (5-3.1)

若 Azimuth\_math ≧360,則:

$$Azimuth_{math} = Azimuth_{math} - 360 (5-3.2)$$

(2) 轉換為弧度

$$Azimuth_{rad} = Azimuth_{math} \times \pi \div 180$$
 (5-3.3)

#### 3、步驟三:坡度與坡向計算

不管是利用等高線或數值地形模型資料,坡度計算方法大多以網格作為計算(邱景升,2008)。本研究坡度值以通過最大坡降法(Burrough等,1998)來計算,依像元到與其相鄰的像元方向上值的最大變化率進

行量測。如圖 5-6 (本研究自行繪製) 所示, 3×3 視窗包含輸入網格中每個像元,透過中心像元與周圍 8 個像元高程差計算坡與坡度, 其差值最大指則為坡度, 坡向則計算 atan2 ()函數轉換方位角得之。此以字母 a 至 i 進行標識, 中心點 e 表示當前正在計算坡向的像元。

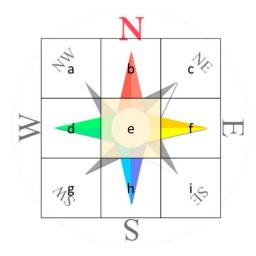


圖 5-6、坡度與坡向分析網格

計算像元 e 在 x 方向上的變化率:

$$\frac{dz}{dx} = \frac{\left[ (c+2f+i) - (a+2d+g) \right]}{(8 \times cellsize)}$$
 (5-4.1)

計算像元 e 在 y 方向上的變化率:

$$\frac{dz}{dy} = \frac{\left[ (g+2h+i) - (a+2b+c) \right]}{(8 \times cellsize)}$$
 (5-4.2)

每個網格中最陡坡降即為坡度。以下演算法用於計算以弧度為單位的坡度(包含 Z 因數):

Slope<sub>rad</sub> = Atan 
$$\left(Z_{factor} \times \sqrt{\left(\frac{dz}{dx}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dy}\right)^2}\right)$$
 (5-4.3)

Z因數是一個轉換因數,當輸入表面的垂直坐標(或高程)單位與水準坐標(x,y)單位不同時,可使用Z因數調整垂直坐標(或高程)單位。若x,y單位與Z單位完全相同,則Z因數為1。若垂直的Z單位是英尺而x,y單位是公尺,則應將Z因數轉換為0.3048(1英尺=0.3048公尺)。

最陡坡降的方向即坡向。以弧度 0 到  $2\pi$  之間表示,其中 0 表示朝東。坡向演算法規範如下:

(1) 若 
$$\left(\frac{dz}{dx}\right)$$
 不為 0 時,
$$Aspect_{rad} = atan2\left[\left(\frac{dz}{dy}\right), -\left(\frac{dz}{dx}\right)\right]$$

(2) 若 
$$\left(\frac{dz}{dx}\right)$$
 為  $0$  ,又若  $\left(\frac{dz}{dy}\right) > 0$  ,  
則  $Aspect_{rad} = \frac{\pi}{2}$   
否則,若  $\left(\frac{dz}{dy}\right) < 0$  ,  
則  $Aspect_{rad} = 2 \times \pi - \frac{\pi}{2}$   
另外, $Aspect_{rad} = Aspect_{rad}$  (5-5.2)

註:ATAN 函數:傳回數值的反正切值,或正切值的倒數。反正切是一個角度,其正切是一個數字。傳回的角度是以弧度表示,有效範圍是 $-\pi/2$  到 $\pi/2$ 。

#### (三) 太陽輻射量模型建立流程

影響太陽輻射要素包含高程、地形地貌、緯度、日照角度變化、大 氣效應等,多數日照遮蔽影響已有相當論述,故此處專注說明太陽輻射 量計算方法。

太陽輻射量為一定區域內單位時間所產生的能量,而太陽輻射往往 因大氣效應而截取為直射、漫射及(地表)反射影響。直接輻射受大氣 效應影響最低,漫射輻射則是被大氣中的薄雲、塵埃、懸浮微粒等成因 分散,反射輻射則是藉由表面要素(如厚雲、地表)的反射。三者的總 和稱為太陽輻射總量或整體日輻射量。

在總輻射量中,直接輻射最多、漫射輻射次之。Elijah Falayi 等(2012)提到若太陽總輻射為 100%來看,51%會被地表及水體吸收,雲反射佔 20%,大氣反射僅佔 6%、地表反射佔 4%,其餘則被吸收。因此,除了特定表面(如積雪、不透明平滑物體等)反射能力極強,地表反射通常僅構成輻射總量中很小的一部分。本研究使用 Spatial Analyst中 Solar Radiation 工具在計算輻射總量時將反射排除在外,故輻射總量為直接輻射與漫射輻射之總和。

本研究使用 Solar Radiation 模組工具可對特定點或地理區域進行太陽輻射量計算。流程如下圖 5-7 所示:

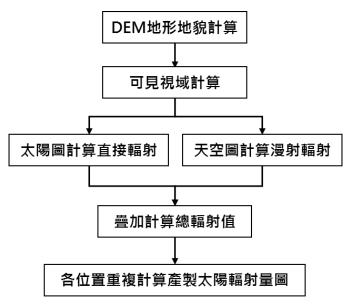


圖 5-7、太陽輻射量模型計算流程

#### 1、步驟一: 仰視半球視域計算

由於輻射會受到地形地貌影響,因此需要在 DSM 中為各位置生一幅幅仰視半球視域。圖 5-8 顯示的是一張仰視半球照片,其成像與魚眼鏡頭相似,表示一幅可見天空的景象,以及被問圍地形地貌或人為構造物等遮擋的天空範圍。



圖 5-8、仰視半球畫面

仰視半球視域是從某特定位觀測天空時,以網格劃分整幅可見及被 遮蔽天空的範圍,確定兩者最大視角。視域中的每個網格皆表示天空方向是可見或被遮擋的值,而輸出像元位置分別與方向半球的天頂角 $\theta$ 和方位角 $\alpha$ 對應。

圖 5-9 為影像強化處理後,生成的天空視域大致可分為可見(白色)或被遮擋(灰色)。視域可與太陽位置、天空方向資訊(分別以太陽圖和天空圖表示)結合使用,從而計算出各位置範圍的直射、漫射所加總的輻射總量(直射+漫射),最後生成合理的太陽輻射量分布地圖。

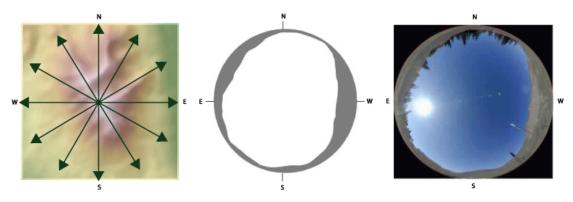


圖 5-9、水準角度、生成的視域和天空視圖示意

資料來源: Environmental Systems Research Institute (ESRI)

#### 2、步驟二:直接輻射量計算

直接輻射量計算係以「網格圖」表示太陽軌跡,即太陽在一天中的不同時刻,以及一年中不同日期不斷變化的明顯位置。其軌跡係基於研究區域的緯度和定義各太陽圖網格內的時間配置。而對於每個太陽圖網格範圍,均指定唯一標識值及其質心的天頂角和方位角,分別計算每個區段中網格的太陽輻射,並且在計算直接輻射時,天空視域將計算結果疊加在太陽圖上呈現各軌跡的直接輻射數值。

下圖 5-10 範例為北緯 45°的太陽圖,假設計算日期為冬至日(12月21日)到夏至日(6月21日)。每個太陽圖網格(彩色框)表示太陽的位置,所用時間間隔以每日切割 0.5 小時產出一筆資料,分析 6 個月太陽輻射量值。該示意圖與仰視視域位於同一半球投影中,其時間段參數可由通過一年之中不同日期,或一天之中不同時間太陽在天空中的移動情況表示其位置。

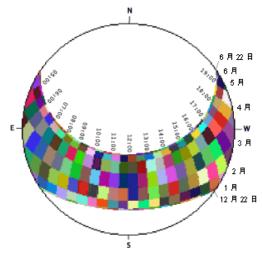


圖 5-10、太陽圖示意

資料來源:Environmental Systems Research Institute (ESRI)

總直接輻射量(Dirtot)是所有太陽圖中直接輻射量(Direat)的總和:

$$Dir_{tot} = \Sigma \ Dir_{\theta,\alpha} \tag{5-6.1}$$

太陽圖區段 ( $Dir_{e,a}$ ) (其質心位於天頂角 ( $\theta$ ) 和方位角 ( $\alpha$ ) 處) 中的直接輻射量將使用下列公式計算:

$$Dir_{\theta,\alpha} = S_{const} \times \beta^{m(\theta)} \times SunGap_{\theta,\alpha} \times cos \ (AngIn_{\theta,\alpha})$$
(5-6.2)

#### 其中:

SConst:地球與太陽平均距離處大氣層外的太陽通量,稱為太陽常數。分析中使用的太陽常數是 1,367 W/m2。係參照世界輻射中心 (World radiation center, WRC) 訂定的太陽常數。

β:最短路徑(朝向天頂的方向)的大氣透射率(所有波長的平均值)。

 $m(\theta)$ :相對的光路徑長度,以相對於天頂路徑長度的比例測量(請參見公式 5-6.3)。

SunDuro,a:以天空區段表示的持續時間。

SunGape,a:太陽圖區段的孔隙度。

AngIne,a : 天空區段的質心與表面的法線軸之間的入射角 (請參見公式 5-6.4)。

相對光學長度  $m(\theta)$  由太陽天頂角和海拔高程決定。對於小於  $80^{\circ}$  的天頂角,可以使用下列公式進行計算:

m 
$$(\theta) = \frac{\text{EXP}(-0.000118 \times \text{Elev} - 1.638 \times 10^{-9} \times \text{Elev}^2)}{\cos (\theta)}$$
 (5-6.3)

其中:

 $\theta$ :表示太陽天頂角。

Elev:表示海拔高程,以公尺為單位。

通過乘以入射角的餘弦,可以將表面方向的影響考慮在內。截留表面與給定天空區段(其質心位於天頂角  $\theta$  和方位角  $\alpha$ )之間的入射角 (AngInSky<sub>e,a</sub>)使用下列公式進行計算:

$$AngIn_{\theta,\alpha} = a\cos[\cos(\theta) \times \cos(G_Z) + \sin(\theta) \times \sin(G_Z) \times \cos(\alpha - G_A)]$$
(5-6.4)

其中:

Gz:表示表面天頂角。

對於大於 80°的天頂角,需要重點考慮折射。

Ga:表示表面方位角。

#### 3、步驟三:漫射輻射量計算

計算漫射輻射係以天空圖(圖 5-11)作為整幅天空的視域,並依據方向(天頂角和方位角)劃分、計算各天空圖區段的漫射輻射。天空圖係由 8 個天頂分割和 16 個方位分割定義扇區範圍,且每種顏色表示所劃分的分析網格範圍。

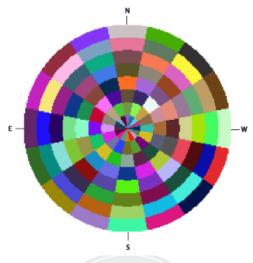


圖 5-11、天空圖示意

資料來源: Environmental Systems Research Institute (ESRI)

各天空區段由計算其質心處所得出的漫射輻射量(Dif),按時間間隔進行整合,再通過孔隙度與入射角進行更正,公式如下:

$$Dif_{\theta,\alpha} = R_{glb} \times P_{dif} \times Dur \times SkyGap_{\theta,\alpha} \times Weight_{\theta,\alpha} \times \cos$$

$$(AngIn_{\theta,\alpha}) \qquad (5-7.1)$$

#### 其中:

Rglb:表示總正常輻射量(請參見下列公式 5-7.2)。

Pdif: 漫射的總正常輻射通量的比例。通常,在天空非常晴朗的條件下,該值約等於 0.2;在天空雲層極厚的條件下,該值約等於 0.7。

Dur:分析的時間間隔。

SkyGape,a:天空區段孔隙度(可見天空的比例)。

Weighto,a: 給定天空區段與所有區段中漫射輻射量的比例 (請參見公式 5-7.3 與 5-7.4)。

AngIno,a:天空區段的質心和截留表面之間的入射角。

總正常輻射量(R<sub>glb</sub>)的計算方式為針對每個區段(包括遮擋的區段)中的直接輻射量求和(無需校正入射角),並校正直接輻射量的比例(等於1-P<sub>dif</sub>):

$$R_{glb} = \frac{[S_{const}\Sigma(\beta^{m(\theta)})]}{(1 - P_{dif})}$$
 (5-7.2)

對於均勻天空漫射模型, Weighten 的計算方法如下:

$$Weight_{\theta,\alpha} = \frac{(\cos\theta_2 - \cos\theta_1)}{\text{Div}_{\alpha,i}} \tag{5-7.3}$$

其中:

 $\theta$ 1 和  $\theta$ 2:表示天空區段的邊界天頂角。

Divazi:表示天空圖中方位分割的數量。

對於標準陰天天空模型, Weighten 的計算方法如下:

$$Weight_{\theta,\alpha} = \frac{(2\cos\theta_2 + \cos2\theta_2 - 2\cos\theta_1 - \cos2\theta_1)}{4 \times Div_{azi}}$$
 (5-7.4)

分析區域的總漫射太陽輻射量(Dif<sub>tot</sub>)等於天空圖區段中漫射太陽輻射量(Dif)的總和:

$$Dif_{tot} = \Sigma \ Dif_{\theta,\alpha} \tag{5-7.5}$$

#### 4、步驟四:太陽輻射總量計算

視域網格中疊加太陽圖區段與天空圖區段,即計算出從各天空方向 接收到的直接輻射及漫射輻射,其計算方式為各劃分網格中未受遮蔽像 元數量除以像元總數。如下圖 5-12 灰色表示受遮擋的天空範圍,而計 算太陽輻射的方法即將未受遮擋天空方向的直射和漫射相加。



圖 5-12、視域與太陽圖 (左)、天空圖 (右) 疊加示意

資料來源: Environmental Systems Research Institute (ESRI)

綜上所述,總輻射量(Global<sub>tot</sub>)的計算方法是分別將分析區域太陽 圖和天空圖的直接輻射量(Dir<sub>tot</sub>)和漫射輻射量(Dif<sub>tot</sub>)相加得之。

$$Global_{tot} = Dir_{tot} + Dif_{tot}$$
 (5-8)

# 陸、結果及研究發現

#### 一、 日照遮蔽分析情形

#### (一) 整體灰度值變化

依日照遮蔽分析步驟將研究範圍內因數加以計算處理,得出四季春分、夏至、秋分、冬至之逐時日照陰影灰度值及陰影變化分布圖。灰度值分為 0~255,數值越低表示遮蔽情形較顯著,反之數值越高則越無遮蔽情形。一般而言,受太陽高度角變化影響較大,其次需考量方位角,如春分上午太陽高度角約為 12.6 度至 65.9 度 (參照前表 5-1),而由於當時太陽升起方位約在東南方,故南側有若有較高建物遮蔽,則灰度值會呈現較低之情況,表示日照遮蔽情形較嚴重。如下表 6-1 呈現夏至部份時段局部陰影變化分布,完整變化情形詳如附錄一。

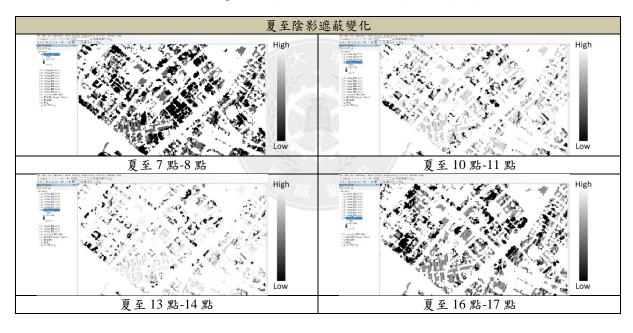


表 6-1、夏至逐時陰影遮蔽變化(部分時段)

由圖 6-1 陰影平均灰度值變化可得知,夏至>春分≒秋分>冬至,峰值皆位於中午 12 點至下午 1 點之間。夏至灰度值較高表示其亮部明顯較多,即陰影遮蔽情形較少;春分與秋分在灰度曲線上相似,主要差別在於上午太陽高度角秋分高春分低,下午則春分高秋分低。換句話說,春分時太陽較晚升起,秋分則較早落暮;而由於臺灣位於北半球,冬至時即便正午,本研究觀測位置的太陽高度角僅 42.4 度(參照前表 5-1),太陽斜射時間較長,造成許多建物受遮蔽之情形。

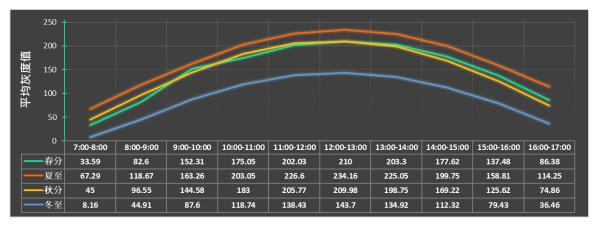


圖 6-1、四季逐時陰影平均灰度值

#### (二) 各行政區日照遮蔽分析

本研究運用 Natural Breaks (Jenks) 分類法,求相同群集 (Cluster) 內差異最小,相異群集差異最大化,也就是平方差的和比較分類合適度,其值越小表示分類結果越適合。此分類法適用於單變量數據,Natural Breaks 優點為將所有資料進行組合,求出平方差和,如 N 個數分成 k 類,即 N-1 個數中找 k-1 個組合,故資料筆數多時其遍歷計算相當龐大,其計算分類演算法如下:

$$SSD_{i-1} = \sum_{i-1}^{j} (A[k] - mean_{i-1})^{2} (1 \le i < j \le N)$$
 或 
$$SSD_{i-1} = \sum_{i-1}^{j} A[k]^{2} - \frac{(\sum_{k=i}^{j} A[k])^{2}}{j-i+1} (1 \le i < j \le N)$$
 (6-1) 其中:

A:矩陣集合

N: 樣本數

k:組數

Meani-1: 各類別平均數

故本研究比較春分、夏至、秋分、冬至四個時段 10 小時建物屋頂陰影變化,總共比較 4 (春分、夏至、秋分、冬至) ×10 (時段) =40 組資料,以施作性及細緻度考量下則使用 Natural Breaks 進行分類。而相較於二值化非黑即白的分類原則,本研究則依各節氣時段灰度值及出現次數統計分群,設定 0-255 灰度值分為二斷點、三群組,並取平均值作為整體閥值,令輸出值為黑(0)、灰(1)、白(2)表示,資料分類如表6-2 所示。

時間		春分		夏至		秋分		冬至	
	0	975,746	0	430,473	0	802,886	0	1,329,766	
7:00-8:00	1	107,198	1	527,855	1	230,350	1	33,397	
	2	26,556	2	49,087	2	32,117	2	9,162	
	0	354,650	0	214,670	0	295,652	0	810,942	
8:00-9:00	1	553,082	1	572,049	1	569,325	1	229,683	
	2	69,969	2	141,320	2	92,467	2	30,615	
			每	小時間隔計算					
	0	168,247	0	132,995	0	196,448	0	358,050	
15:00-16:00	1	272,323	1	131,253	1	557,136	1	541,254	
	2	468,938	2	633,398	2	166,610	2	73,945	
	0	335,371	0	224,553	0	387,171	0	953,096	
16:00-17:00	1	557,769	1	586,026	1	541,521	1	119,761	
	2	77,774	2	118,918	2	59.019	2	24,844	

表 6-2、灰度等級與次數對應表(部分時段)

以實務面來說,需考量建物屋頂面積作為太陽能施作場域,而在屋頂面積中實質遮蔽面積依各時段亦有差異,即便該建物屋頂亮度高(灰度值高),但其接受太陽輻射量範圍較小(面積不足),以致無法產生實質效益,反之亦然。故本研究以網格內灰度總值×建物屋頂網格灰度面積計算作為太陽能光電潛力排序,稱「日照遮蔽潛力值」。本研究共涵蓋8個鄉鎮區、214個村里,故難以逐一詳述各村里陰影遮蔽情形,僅以局部潛力值排序呈現,故下表 6-3 各季節時段中,局部呈現前 10 名潛力值排序:

表	6-3	各行政區太陽	能光電潛力_	_以日照遮蔽評估	(部分行政區)
---	-----	--------	--------	----------	---------

季節	潛力	仁七日	累計網格	網格灰度面積	日照遮蔽潛力值	
時段	排序	行政區	灰度值	$(m^2)$	(累計網格值×灰度面積)	
	1	西屯區協和里	647	5,887,908.99	3.81E+09	
	2	西屯區林厝里	648	2,696,497.88	1.75E+09	
	3	南屯區寶山里	648	2,251,122.55	1.46E+09	
	4	南屯區春社里	647	1,548,317.57	1.00E+09	
四季	5	北屯區水景里	648	1,503,335.19	9.74E+08	
加總	6	南屯區文山里	648	1,383,956.97	8.97E+08	
	7	南屯區豐樂里	648	1,362,293.26	8.83E+08	
	8	北屯區軍功里	647	1,230,412.64	7.96E+08	
	9	西屯區惠來里	648	1,048,848.61	6.80E+08	
	10	東區東信里	648	1,028,418.09	6.66E+08	

各行政區於不同季節時段太陽能光電屋頂日照遮蔽潛力值排序大致相同。其中,總值第1-4名、第6名皆位在工業用地,西屯區協和里及南屯區寶山里位於臺中工業區、南屯區春社里及南屯區文山里位於精密機械科技創新園區、西屯區林厝里位於中部科學園區內,整體1層樓建物佔整體約57%,4層樓(含)以下更佔約94%。而其他區域多位於重劃區內,第5、8名分別為北屯區水景里及軍功里,坐落於十期、單元13與單元14重劃區範圍內。第7名為南屯區豐樂里位於十三期重劃

區內。第9名西屯區惠來里位在七期重劃區。

工業區、重劃區及區段徵收範圍建物屋頂面積大、樓層落差小等條件,較適合作為屋頂型太陽能光電建置區位。惟部分村里雖坐落於上述區位,其日照遮蔽潛力值卻較低,例如西屯區大石里全區多半位於水湳經貿園區內,故區域內建物數量稀少;西屯區福瑞里位於中部科學園區內,其建物屋頂總面積較小,佔整體面積倒數第四。故以區位觀點來看,發展成熟的工業區、重劃區及區段徵收區位適合發展屋頂型太陽能光電,其次應考量各區建物總面積與數量關係。

#### 二、 太陽輻射量分析情形

#### (一) 整體太陽輻射量變化

本太陽總輻射量分析為直接輻射及漫射輻射之總和,並依前述天空分析範圍內通過輻射量計算。依前述步驟將研究範圍內因數加以計算處理,得出四季春分、夏至、秋分、冬至之逐時太陽輻射量變化成果,如表 6-4 局部範圍代表呈現部份夏至時段局部陰影變化分布,完整變化情形詳如附錄二。

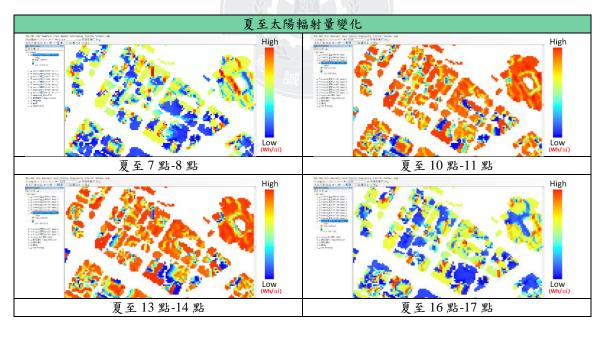


表 6-4、夏至逐時太陽輻射量變化 (部分時段)

輻射量大致從紅、澄、黃、綠、淺藍、深藍(高到低)變化,由上午至中午轉強、下午漸弱。而依圖 6-2 平均輻射量曲線得知,夏至>春分二秋分>冬至,春分及夏至太陽輻射量峰值位於中午 12 點至 1 點;秋分及冬至峰值則位於上午 11 點至中午 12 點,分別為。其分布特性同樣與太陽高度角與方位角有關,春分及夏至高度角較高,故可觀測太陽時間較長,單位面積接收輻射量也較多,反之亦然。以四季春分、夏至、

秋分、冬至整體太陽輻射量平均值來看,春分:409.36 Wh/m²、夏至:521.68 Wh/m²、秋分:404.53 Wh/m²、冬至:202.67 Wh/m²。

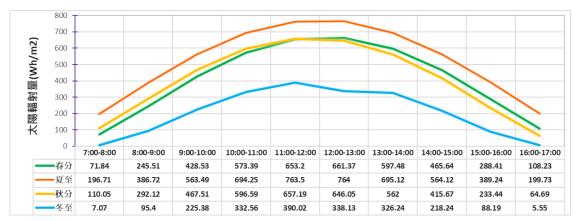


圖 6-2、四季逐時平均太陽輻射量

#### (二) 各行政區太陽輻射量分布情形

由於上述資料皆為 Raster 格式, 需經由資料轉換至各建物 Polygon, 以較精準掌握各屋頂實際面積與潛力值。因此, 本研究使用 ArcGIS 中 Zonal Statistics as Table 功能, 將分析太陽能輻射量 Raster 格式,以建物範圍為基準,將 Raster 值匯入至屬性 Table, 再取欄位唯一值作為目標轉換至建物 Polygon。惟實際轉換過程中,建物 Polygon 可能包含多個 Raster 值,故本研究萃取各建物 Polygon 交集之 Raster 平均值計算,作為各單位屋頂接收太陽輻射量方式,處理介面如圖 6-3 所示。

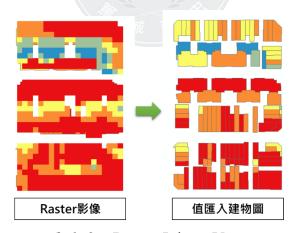


圖 6-3、Raster Join to Vector

以單位屋頂作為太陽能潛力評估,本研究建物統計數量逾 3 萬棟,由 ArcGIS 屬性表得知排序前 217 棟皆為屬於北屯區建物;前 1,000 棟建物中有 884 棟(約佔 89%)位於北屯區;而前 10,000 棟建物有 5,258 棟(約佔 53%)建物位於北屯區、其次西屯區 2,418 棟(約佔 24%)、南屯區 930 棟(約佔 9%)、東區 578 棟(約佔 6%)、南區 391 棟(約佔 4%)、北區 270 棟(約佔 3%)、西區 141 棟(約佔 1%)、中區僅 14 棟(<1%)。

由圖 6-4 建物分布及比例得知, 北屯區與西屯區之建物具有較好的太陽能光電發展潛力, 北屯區整體分布平均, 特別在與新社區交界處的眾多「農業大棚」或「香菇寮」格具潛力, 西屯區則多為於「中部科學園區」及「臺中工業區」; 以整體來看, 屯區則較其他區域優。

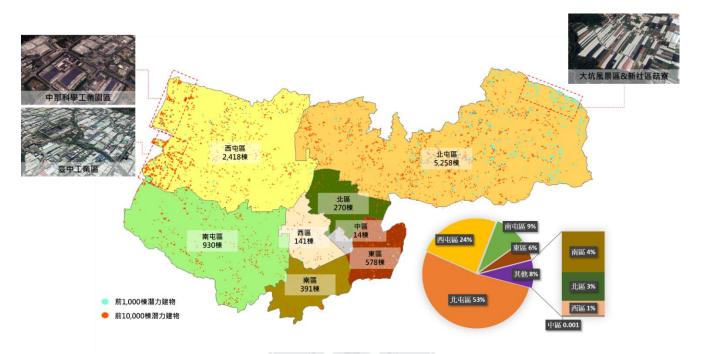


圖 6-4、太陽能屋頂潛力建物分布及佔比

屋頂型太陽能光電需考量屋頂實際面積,故本研究以太陽能輻射量 ×建物面積計算作為太陽能光電潛力排序,稱「輻射量潛力值」。以下表 6-5 由高至低排序前 10 名村里。由日照輻射量潛力值得知,西屯區協 和里明顯較其他區域高出許多,其次為西屯區林厝里及北屯區水景里。 本研究運用 Natural Breaks (Jenks) 分類法將輻射量潛力值予以正規化, 以1(低)至5(高)呈現各單位村里屋頂型太陽能光電潛力值。

士	( =	力仁小厅上四小小雨班上	以上阳红的目红儿	(如八仁山后)
衣	0-2,	各行政區太陽能光電潛力	以太炀輻射軍評估	(部分仃政區)

潛力排序	行政區	累計太陽輻射量 (Wh/m <sup>2</sup> )	屋頂面積 (m²)	輻射量潛力值 (累計太陽輻射量×屋頂面積=Wh)
1	西屯區協和里	93,944,408.54	2,094,121.24	1.96731E+14
2	西屯區林厝里	59,385,120.13	982,302.35	5.83341E+13
3	北屯區水景里	90,408,056.31	607,817.67	5.49516E+13
4	南屯區春社里	63,617,646.84	688,616.46	4.38082E+13
5	北屯區軍功里	87,645,416.32	498,377.22	4.36805E+13
6	南屯區豐樂里	70,680,416.16	510,519.23	3.60837E+13
7	南屯區寶山里	43,561,023.60	804,242.76	3.50336E+13
8	北屯區和平里	67,669,969.07	395,554.76	2.67672E+13
9	東區東信里	56,417,170.20	379,860.54	2.14307E+13
10	南屯區文山里	38,352,347.03	548,221.63	2.10256E+13

依圖 6-5 分類成果可瞭解,潛力值最高為西屯區協和里;西屯區林 厝里、北屯區水景里、南屯區春社里、北屯區軍功里、南屯區豐樂里與 南屯區寶山里 6 個村里次之;再者多為屯區外圍區域及建物密集區域; 而潛力值最低區域多為於中區、東區、南區、西區、北區等舊市區以及 較偏遠山區。

以區位條件來看(圖 6-6),工業區具有較優的太陽能潛力,而重劃區則依開發辦理時間有所差異,大致可分為 1~6 期(1965 至 1989 年)及 7~14 期(1990 至 2015 年),即使同為重劃區,早期重劃區太陽能潛力值低,近期重劃區太陽能潛力值則較高。

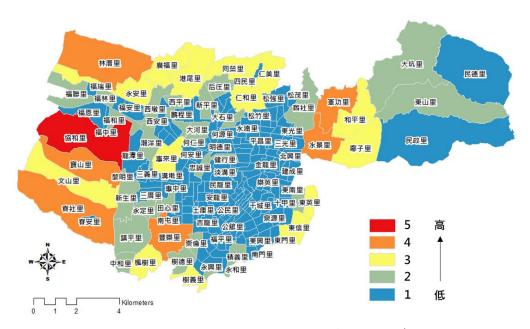


圖 6-5、各行政區太陽輻射量潛力分布

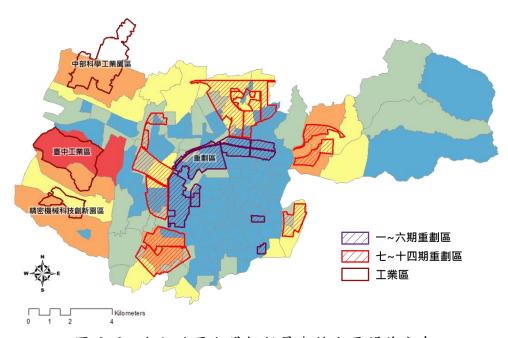


圖 6-6、各行政區太陽輻射量與特定區關係分布

## 柒、 日照遮蔽、太陽能輻射量與各變數關係

本節主要比較日照遮蔽、太陽能輻射量與各變數關係各因子之間相關性,採用迴歸模型 (Regression Model) 方式分析,使用最適線性或非線性迴歸來建立因變數 Y 和自變數 X 間的關係,並透過變異數分析 (ANOVA) 中  $R^2$  (R Square) 檢定比較其耦合 (Coupling) 關係。本研究使用 gnuplot 軟體自行撰寫程式以評估迴歸關係,並導入上述公式計算,找出最佳截距與迴歸斜率,最後匯入 Excel 進行繪製。

## 一、 日照遮蔽及太陽能輻射量關係

由圖7-1得知日照遮蔽及太陽輻射量在全時段變化曲線大致相同,皆大致以中午時分為界,呈現對稱型常態趨勢。兩者些許差異在於太陽輻射量依時間變化,影響高度角、方位角及β最短路徑等,可看出太陽輻射量曲線變化較大,對於日照其敏感性相較陰影遮蔽情形更為顯著。

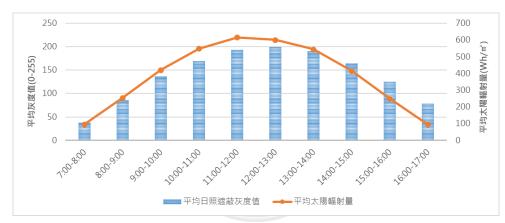


圖 7-1、平均日照遮蔽及太陽能輻射量各時段變化情形

## 二、 太陽輻射量與各變數關係

圖 7-2(左)比較各行政區建物數量與太陽輻射量關係,可發現兩者 曲線呈大致契合,可推論若以村里為單位評估太陽輻射量,建物數與其 呈現正比關係。圖 7-2(右)比較各行政區屋頂面積與太陽輻射量關係, 可得知兩者曲線在前半段較一致,之後關係漸弱,呈現部分區域太陽輻 射量雖較大,但屋頂面積並非固定成線性成長。

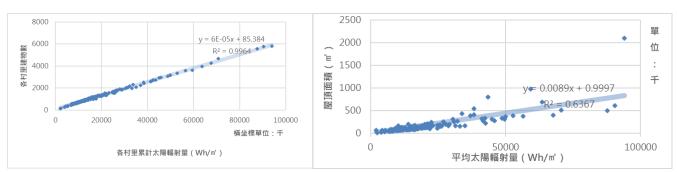


圖 7-2、累計太陽輻射量關係與各變數關係\_以村里為單位

太陽輻射量與各變量關係需說明解釋能力及顯著性佐證,其中, $R^2$  ( $0\sim1$ ) 值越大表示其配適度 (Goodness of Fit) 越佳,P-Value 則用於證明前者誠信度,嚴謹標準以 P<0.001 為"非常顯著差異",故下表 7 可看出其相關性。

針對各變量關係比較分析,可得出以村里界為範圍統計,太陽輻射 量與日照遮蔽、屋頂數量有高度相關;其次與屋頂面積成中度相關;與 建物密度及高程落差則無明顯關係,推估原因為各區建物聚集性分布皆 有所差異,需以更小統計單元(如街廓)或匡列高密度區評估。

表 7-1、太陽輻射量與各變量相關程度\_以村里為單位

太陽輻射量:	$\mathbb{R}^2$	P-Value	相關性
日照遮蔽(陰影)	0.91	1.63E×10 <sup>-5</sup>	高
建物數量	0.99	1.52E×10 <sup>-261</sup>	高
屋頂面積	0.64	$3.04E\times10^{-50}$	中
建物密度	0.18	$1.54E\times10^{-10}$	None
高程落差(建物高度標準差)	0.12	2.28E×10 <sup>-7</sup>	None



# 捌、結論及實質推動建議

#### 一、 結論

本研究以日照遮蔽與太陽輻射量兩者觀點,考量地形、海拔高程、 遮蔽、建物面積等實際都市複雜因素,評估臺中市八個行政區於春分、 夏至、秋分及冬至有效觀測時間之日照強度變化,藉由閥值予以分類潛 力值層級,可精準至建物、村里為單位統計,探討各區域可實際利用屋 頂型太陽能光電發展潛力。

以整體日照遮蔽與太陽輻射量分析成果得知,日照強度皆為夏至>春分二秋分>冬至,前者峰值時段為中午12:00-13:00,後者春分及夏至峰值時段為中午12:00-13:00、秋分及冬至峰值時段為上午11:00-12:00。兩者消長曲線大致相同,以中天時段為界成常態分布。

鑑此,本研究認為兩者分析方式皆可有效評估太陽能發展潛力,惟實際太陽輻射量係由太陽常數、各時段日照角度、地日路徑距離、天空範圍及大氣透明度等條件,經計算提供單位時間內單位面積接收輻射量。故由整體分析成果得出以下細部論證:

## (一) 實務需求性與可靠性

由集中式能源朝向分散式電網配置已是未來趨勢,也是城市電力系統發展智慧化的重要環節,符合現今政策以各建物、家戶為單位,建置屋頂型太陽能光電系統,運用更加彈性化的能源配置,逐步使用電需求與供給取得平衡點。本研究在日照遮蔽及計算太陽輻射量相對趨勢合理一致,而在 DEM (5×5m)的精度條件下,可有效判釋最小屋頂面積 25平方公尺(約7.56坪)之日照潛力,大約符合本研究區域 80%建物,以網格資料作為輸入值而言,其精度具實務可靠性。

### (二) 太陽輻射量與各變量關係

本研究以村里為單位統計建物數量、屋頂面積、建物密度、高程落 差與日照潛力關係,而結果顯示村里統計區內太陽輻射量對日照遮蔽陰 影呈高度相關;建物總面積多數區域與太陽輻射量呈正比,惟與屋頂面 積並非固定成線性成長,整體程中度相關;太陽輻射量與建物密度、建 物高程落差並無顯著關係,推估原因為各區面積及建物聚集性分布皆有 所差異,較難以平均或概括性方式衡量,需以更小統計單元或匡列高密 度區評估。

## 二、 實質推動建議

以下就研究成果與潛力分布觀點,建議實質推動評估方式:

## (一) 潛力分布情形

以地理分布來看,太陽輻射量潛力值由低至高,大致以臺中火車站 周邊或舊市區(中區、東區、南區、西區、北區)呈輻射狀向外延伸至 屯區。

以單一建物觀察,大坑風景區及工業區內建物具較優日照潛力值, 尤其前者與新社區交界處的「農業大棚」或「香菇寮」產業聚落格具潛力,工業區則多為於「中部科學園區」及「臺中工業區」。

以鄉鎮區為統計單位,屯區日照潛力優於其他區域。更細緻來說, 北屯區>西屯區>南屯區>其他區域,其中西屯區協和里、林厝里、北 屯區水景里、軍功里、南屯區寶山里、春社里等村里建議優先建置屋頂 型太陽能光電設施。

以區位觀點而言,工業區如中部科學園區、臺中工業區、精密機械科技創新園區等,具備較均值高程與充足的屋頂面積,其日照潛力值最優。其次為新興重劃區,雖無法比擬工業用地擁有大面積施作範圍,但相較早期重劃區腹地不足,其具備較完善的日照條件。而日照潛力值最低區域仍多為舊市區周邊建物密集區域及偏遠山區,其建物數量較無法支撐整體潛力數值。

#### (二) 實際裝置發電量驗證

本研究為透過分析日照遮蔽與原始太陽輻射量得出日照潛力值,而 相較檢視兩者關係與調整因子參數,透過實際發電量比較為更直觀方 法,即便其轉換效能因各家業者而異,仍可由相對值趨勢映證潛力分布。 惟目前資料多掌握於系統營運商與台電,一般不易取得,建議後續主管 機關或相關單位可開放此條件,提供去個資化發電數據,並將各實際發 電量進行標準化得出相對值(避免涉及技術機密),以利有效驗證分析。

### (三) 結合各行政區意願調查

臺灣大學風險社會與政策研究中心(2020)四月進行民眾對於能源轉型議題調查,結果顯示認同2025年再生能源發電占比20%的目標比例高達78.5%。以實務推動而言,若以社區、村里等最小統計區域進行意願調查,再從同意數(率)較高的群體結合本研究評估模式,理論可得出同時具備人為條件與自然條件之有效對象或適宜區位,作為未來推動民間太陽能光電參考依據。

# 参考文獻

- 內政部建築研究所(2009)。BIPV建材一體型太陽光電系統應用研究(計畫編號:098301070000G2006)。新北市:內政部建築研究所。
- 王仁俊(2005)。*住宅街廓用電之研究*。未出版之博士論文,國立成功大學建築學系碩博士班,臺南市。
- 林傑斌、劉明德(2002)。*資料採掘與 OLAP 理論與實務*。臺北市:文 魁資訊股份有限公司。
- 邱景升(2008)。應用多元方格網模式比較坡度計算法差異之研究。地 理學報,51,47-63。
- 施天從、呂一璁(2009)。聚焦型 III-V 族太陽電池模組。*科技與工程* 教育學刊,6(2),196-201。
- 柯酈(2014)。*臺灣屋頂型太陽光電開發潛力之研究*。未出版之博士論 文,國立成功大學資源工程學系,臺南市。
- 徐翠華(2002)。*台灣地區太陽輻射及太陽能發電潛力之研究*。未出版之碩士論文,國立臺灣師範大學地理研究所,臺北市。
- 國立成功大學資源工程學系(2014)。臺灣屋頂型太陽光電潛力之研究 (計畫編號:MOST103-2410-H006-087)。臺北市:科技部。
- 陳儀安(2011)。以日照陰影觀點探討都市建物之太陽能光電設置潛力-以台南市中西區一街廓為例。未出版之碩士論文,國立成功大學都 市計劃學系碩博士班,臺南市。
- 黃宣文(2015)。多晶矽太陽電池的擴散問題對效率改善之研究。未出版 之碩士論文,國立中興大學光電工程研究所,臺中市。
- 黄慧文(2007)。亞洲版圖下的綠色能源發展—太陽能產業。*台灣經濟* 研究月刊,30(12),66-71。
- 黃瓊瑩(2017)。太陽輻照度對太陽能發電影響-於住宅應用之研究。未 出版之碩士論文,國立中正大學雲端計算與物聯網數位學習碩士在

職專班,嘉義縣。

- 經濟部標準檢驗局臺中分局(2010)。探討以臺中分局建構太陽能發電可行性方案(計畫編號:99BSMI-14)。臺中市:經濟部標準檢驗局臺中分局。
- 萬能科技大學(2014)。太陽能預測模式與分析技術研究(計畫編號: 1032001INER023)。新北市:行政院原子能委員會。
- 劉國輝(2015)。實用技術常識:太陽能安裝和維修技術。臺北市:元華 文創股份有限公司。
- 錢家宏(2010)。*太陽能發電系統效能評估*。未出版之碩士論文,明新科 技大學電機工程研究所,新竹縣。
- 謝有忠(2016)。以多期數值地形資料評估山崩區及河道地形之變遷。未出版之博士論文,國立臺灣大學地質科學研究所,臺北市。
- 中央氣象局(2019)。四季太陽位置表。上網日期:2019 年,檢自 <a href="https://www.cwb.gov.tw/V8/C/D/astronomy\_data.html">https://www.cwb.gov.tw/V8/C/D/astronomy\_data.html</a>。
- 中央氣象局 (2020)。觀測資料查詢。上網日期: 2020 年,檢自 <a href="https://e-service.cwb.gov.tw/HistoryDataQuery/index.jsp">https://e-service.cwb.gov.tw/HistoryDataQuery/index.jsp</a>。
- 國立臺灣大學社會科學院風險社會與政策研究中心(2020)。民調解碼: 公投衝擊後逆勢成長的能源轉型。上網日期:2020 年,檢自 <a href="https://rsprc.ntu.edu.tw/zh-tw/m01-3/en-trans/1450-0622-poll-analysis.html">https://rsprc.ntu.edu.tw/zh-tw/m01-3/en-trans/1450-0622-poll-analysis.html</a>。
- 黄偉倫(2002)。分散型電力技術的應用。上網日期:2002年2月5日, 檢 自

https://energymagazine.itri.org.tw/Cont.aspx?CatID=32&ContID=129 •

維基百科 (2013)。太陽直射點。上網日期:2013 年 7 月 31 日,檢自 https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%A4%AA%E9%98%B3%E7%9B% B4%E5%B0%84%E7%82%B9。

- 中央氣象局(2019)。為何每天太陽東升西落的位置及方位會變化呢?。 上網日期: 2019 年 1 月 9 日 , 檢 自 https://pweb.cwb.gov.tw/PopularScience/index.php/astronomy/267。
- 香港天文臺(2019)。輻射小知識 太陽輻射。上網日期:2019年11月 27日,檢自 https://www.hko.gov.hk/tc/radiation/tidbit/201003/solar.htm。
- Google Inc. (2015). Google Project Sunroof. Retrieved 2015, from https://www.google.com/get/sunroof
- International Energy Agency (2019) . Renewables 2019. Retrieved October, 2019, from <a href="https://www.iea.org/reports/renewables-2019">https://www.iea.org/reports/renewables-2019</a>
- International Renewable Energy Agency (2020). Renewable Capacity
  Statistics 2020. Retrieved March, 2020, from
  <a href="https://www.irena.org/publications/2020/Mar/Renewable-Capacity-Statistics-2020">https://www.irena.org/publications/2020/Mar/Renewable-Capacity-Statistics-2020</a>
- National Aeronautics and Space Administration (2020). Seasonal Illumination Variations. Retrieved 2020, from <a href="https://landsat.gsfc.nasa.gov/seasonal-illumination-variations/">https://landsat.gsfc.nasa.gov/seasonal-illumination-variations/</a>
- National Oceanic & Atmospheric Administration (2019). Solar Calculator Glossary. Retrieved 2019, from <a href="https://www.esrl.noaa.gov/gmd/grad/solcalc/glossary.html">https://www.esrl.noaa.gov/gmd/grad/solcalc/glossary.html</a>
- The American Association of Amateur Astronomers (2016) . 6. Calculating Solar Geometry with SZAQ. Retrieved 2016, from <a href="https://www.nickengerer.org/rmanual/2016/8/17/6-calculating-solar-geometry">https://www.nickengerer.org/rmanual/2016/8/17/6-calculating-solar-geometry</a>
- United Nations Environment Programme (2018). Emissions Gap Report

  2018 key messages. Retrieved November 27, 2018, from

  <a href="https://www.unenvironment.org/resources/report/emissions-gap-report-2018-key-messages">https://www.unenvironment.org/resources/report/emissions-gap-report-2018-key-messages</a>
- World Bank (2005) . Natural Disaster Hotspots: A Global Risk Analysis.

- Retrieved 2005, from https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/7376
- Bo Lei, & Jiu-Lun Fan (2015, October), A Gradient Weighted

  Thresholding Method for Image Segmentation, International

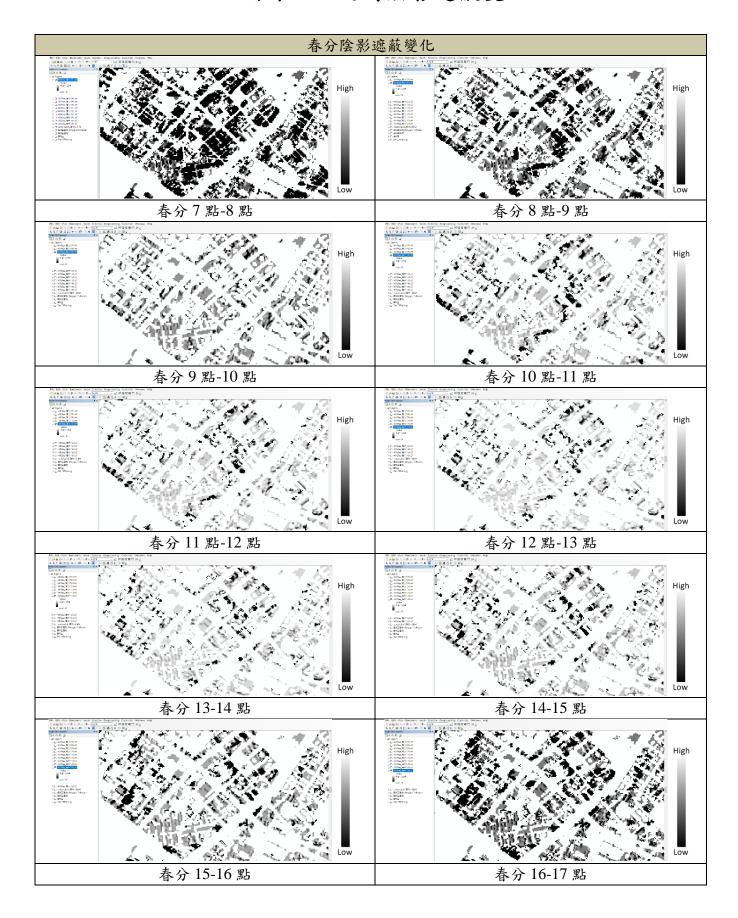
  Conference on Intelligent Science and Big Data Engineering, Suzhou,

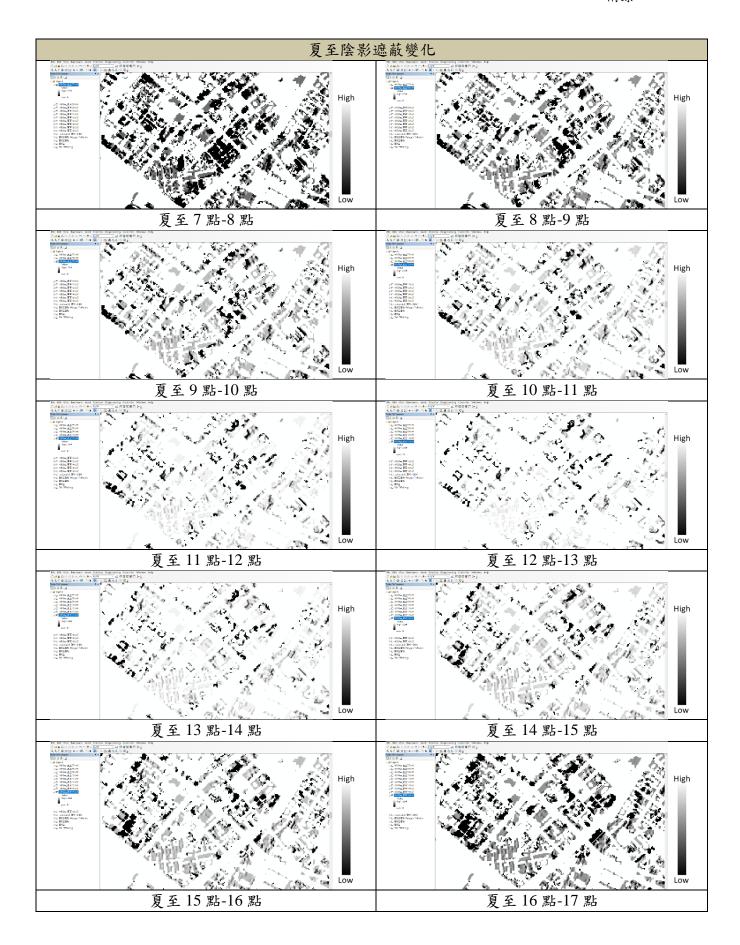
  China.
- Burrough, P. A., & McDonell, R. A. (1998) . *Principles of Geographical Information Systems*. Oxford, U.K.: Oxford University Press.
- Fu, P. (2000). A Geometric Solar Radiation Model with Applications in Landscape Ecology. Published doctoral thesis, University of Kansas, U.S.A. Kansas.
- Fu, P., & P.M. Rich (2000, January), A geometric solar radiation model and its applications in agriculture and forestry, Proceedings of the Second International Conference on Geospatial Information in Agriculture and Forestry, Florida, USA.
- Fu, P., & P.M. Rich (2002). A geometric solar radiation model with applications in agriculture and forestry. *Computers and Electronics in Agriculture*, 37 (1-3), 25-35.
- Hussein A Kazem, Miqdam Tariq Chaichan, Ali H Al-Waeli, & Kavish Mani (2015, August), Effect of Shadow on the Performance of Solar Photovoltaic, MED GREEN FORUM: Mediterranean Green Buildings & Renewable Energy, Florence, Italy.
- Liang Chenga, Shuyi Lid, Hao Xud, Xiaoqiang Liud, Junya Maod, Xiaoguang Ruand, & Manchun Li (2018). Calculating potential of solar energy and CO2 emissions reduction for cityscale buildings based on 3D remote sensing technologies. *Remote Sensing of Environment*, 209, 612-632.
- Mahmoud Abdelhamid (2014) . A comprehensive assessment

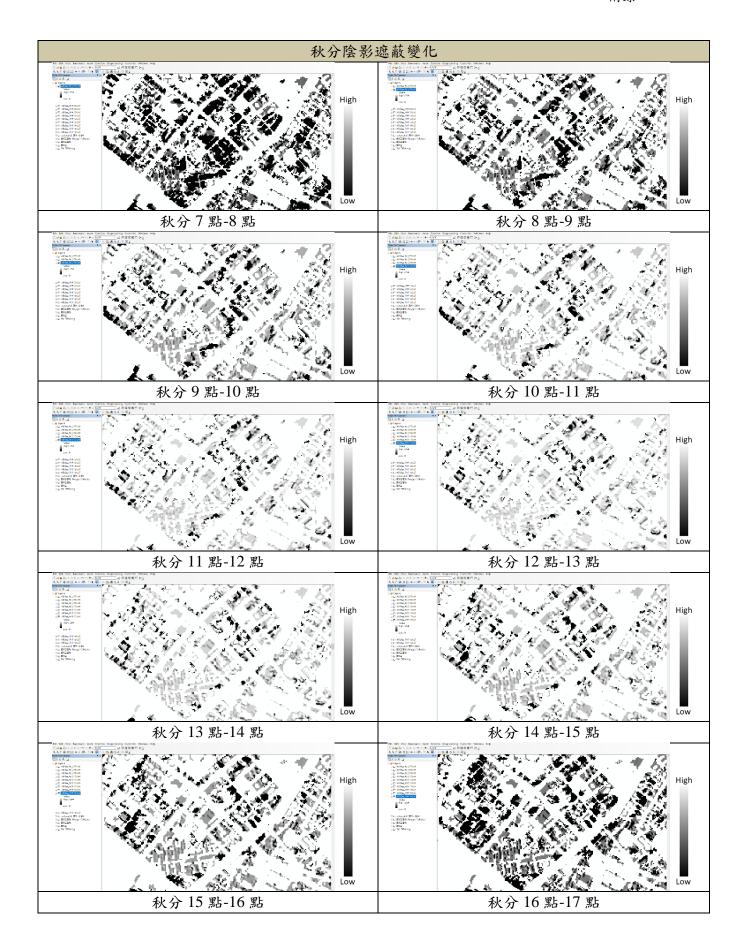
- methodology based on life cycle analysis for on-board photovoltaic solar modules in vehicles. Published doctoral dissertation, Clemson University, U.S.A. - South Carolina.
- Megumi Yamashita, & Mitsunori Yoshimura (2019). Estimation of Global and Diffuse Photosynthetic Photon Flux Density under Various Sky Conditions Using Ground-Based Whole-Sky Images, *Remote Sensing*, 11 (8), 932.
- N. Chaintreuil, F. Barruel, X. Le Pivert, H. Buttin, & J. Merten (2008, January), Effects of shadow on a grid connected PV system,
  23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Valencia, Spain.
- Rich, P. M., & P. Fu. (2000, January), *Topoclimatic Habitat Models*,

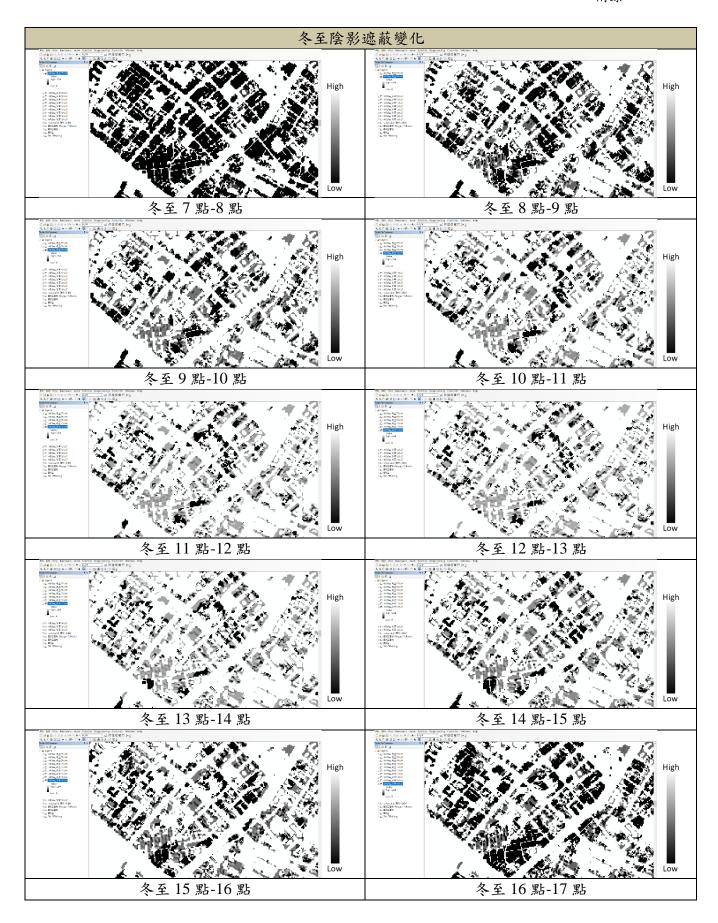
  Proceedings of the Fourth International Conference on Integrating GIS and Environmental Modeling, Alberta, Canada.
- Rich, Paul M., Ralph Dubayah, William A. Hetrick, & Shawn C. Saving.
   (1994) . Using Viewshed Models to Calculate Intercepted Solar
   Radiation: Applications in Ecology. *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing Technical Papers*, 524-529.

# 附錄一、逐時陰影遮蔽變化









## 附錄二、逐時太陽輻射量變化



