

第十屆旺宏科學獎

成果報告書

參賽編號：SA10-015

作品名稱：都市面膜-鋪面種類與熱島效應之探討

姓名：陳思妤

關鍵字：熱島效應

摘要

都市熱島效應在全球溫度升高的貢獻度上約占三分之一，因此我們必須在瞭解區域熱島效應貢獻量後，方能正確地對全球暖化做評估，否則會混淆全球暖化訊號。本研究主要分成五個部份，一是利用中央氣象局數據、內政部營建署都市計畫書及相關文獻資料，整理並統計出台灣氣候受熱島效應影響的程度；二是進行現地量測，並進一步探討之間的相關性；三是整理上述統計及量測數據並彙整文獻資料，選出一套利用都市生態系統中，減緩溫度的流體動態系統（即水和空氣）來減緩熱島效應的構想；四是依照減緩熱島效應的構想，製作出減緩模型，並進行模型實測；五是利用探針式溫度計來量測溫度與鋪面深度的關係。

一、氣象統計：利用中央氣象局長時間的量測數據獲得氣象統計。

（一）台灣氣溫明顯增高，尤其以秋、冬兩季最為顯著：

全台各地近 5 年的月均溫高於近 30 年平均值，程度最高達 5%。

（二）都市化程度影響熱島強度：搭配內政部營建署『都市計畫土地使用面積』的統計資料得知，都市化程度將會增強熱島效應。

（三）熱島效應對台灣氣候的影響比全球更為顯著：台灣與全球的平均氣溫均呈現升溫趨勢，台灣從 1990 年至 2010 年間，平均溫度增加了約 1.3°C，比全球增溫超過 60%。

（四）天然鋪面能有效降低熱島強度：將地處偏遠的鞍部、日月潭、阿里山氣象站視為對照組，與北、中、南、東代表性都市相比較，發現天然鋪面能有效減緩熱島效應。

二、現地量測：我們進行為期 5 個月的實地量測，量測時間為 08:00-21:00，測量 9 種鋪面，再以溫差大小做為判斷熱島強度的依據，統整如下：

（一）各式鋪面對熱島效應的貢獻度：

就升溫及降溫程度而言，以天然鋪面『草地』其抑制熱島強度的效果最佳；而人工鋪面以『水泥、透水磚、柏油』（建材鋪面類）與『PU 跑道、富麗克排球場』（合成鋪面類）造成的熱島效應最為顯著。

（二）氣象因子與熱島效應的相關性：與其它文獻資料結果相符。

- 1、氣溫及日照強度與熱島效應呈高度正相關，顯示鋪面溫度隨氣溫及日照強度增加。
- 2、大氣濕度與熱島效應呈高度負相關，顯示濕度增加對鋪面表面產生降溫之作用。
- 3、風速因素在實驗場所中呈現正相關，卻在現地量測時呈現低度相關，其原因在於現地量測時受限於周遭建築物分布，加上台灣冬季受季風影響氣流較不穩定所致。

三、減緩熱島強度的模型構想：

根據我們的研究結果並搭配相關文獻，選出一套可能有效減緩熱島強度的模型構想，即利用都市生態系統中減緩溫度的流體動態系統（即水和空氣）來減緩熱島效應。「都市次系統」產生的增溫，可透過「滲水次系統」流通，以蒸發方式將熱量吸收，接著這些熱量及水氣可再傳輸至「植被次系統」當成植被成長所需的能量，其根部成長後，在「滲水次系統」中又可蘊含更多量的水源，如此良性循環將產生的熱能以流動方式讓三個次系統相互作用，有效舒緩熱島效應。

四、減緩熱島強度的模型實測：

將上述減緩熱島效應的構想製作成模型，並透過實際測量得知，在通風較佳的條件下（溫室氣體中的水氣不易聚集），含有植被及滲水次系統的模型（實驗組）較沙質鋪面的模型（對照組）具備減緩熱島強度的功能。

五、溫度與鋪面深度的關係：

無論在陽光直射或陰涼通風的環境下，植被鋪面模型與沙質鋪面模型的溫度與深度均呈指數遞減（指數擬合的 R^2 高於 0.9）。若能增加量測數據、量測時距、採用更精密儀器，方可進一步驗證其準確性。

壹、 研究動機

最近節能減碳的議題廣大的被討論，在地科的課程中有提到溫室效應的現象，物理課的內容也談到比熱的觀念，市面上也常聽過許多綠建築的想法，他們大都從建築物本體的空間安排和材料的角度下去探討。我們上網搜尋資料後，發現都市在開發後自然植被被轉換成人工都市紋理(建築物、道路、停車場及人造熱源等)，使得都市有如一座發熱的島嶼(熱島效應，Urban Heat Island Effects)。造成地表溫度上升的主要因子中，鋪面是我們較感興趣的部分，因為大多數的綠建築方案中已整合涼屋頂(Cool Roof)與植栽(Shade Tree Planting)，因其對降低建築物的能源費用有較直接的效益，較具經濟誘因而受到重視。反觀鋪面則多應用在道路、停車場、廣場等公共工程，較缺乏建築物降低能源消費的直接效益，發展上較為遲緩。然而鋪面占都市面積比例相當大，如未能加以重視，則整體都市熱島效應之改善將大受影響(林鐵雄，2006)，因此我們想對鋪面種類造成地表溫度上升的差異程度加以探討。

貳、 研究目的

- 一、藉由氣象統計探討全台各地（北、中、南、東、偏遠地區）歷年氣溫變化曲線。
- 二、運用統計資料瞭解都市化程度與鋪面面積對熱島效應的關聯。
- 三、利用校園各式鋪面實施現地測量，探討各式鋪面造成熱島效應的程度。
- 四、分析影響熱島效應的因素（溫度、風速、溼度、日照強度）與熱島效應間的關係。
- 五、統整實驗所得的數據並彙整文獻資料，提出減緩熱島效應之構想。
- 六、依照減緩都島強度的構想製作模型，並透過實際測量檢驗其可行性。

參、 研究設備及器材

一、量測儀器：

<p>(一) 槍型紅外線溫度計 溫度範圍：-30°C~550°C 精確度：①在-30°C~100°C時：±2°C ②在101°C~550°C時：±2%讀值</p>	<p>(一) 紅外線溫度計</p> 	<p>(二) 溫濕度計</p> 
<p>(二) LT-HD-3008 溫濕度計 露點範圍：-25.3~48.9°C 濕度範圍：10.0~95.0% ±3% 溫度範圍：0~50.0°C ±0.8°C</p>		
<p>(三) LT-UV-340 UV 紫外線光強度計 紫外線波長範圍：290~390nm (UVA&UVB) 紫外線強度範圍：① 0~1999 μW/cm². ② 10~19990 μW/cm²</p>	<p>(三) 紫外線光強度計</p> 	<p>(四) 風速計</p> 
<p>(四) LT-AM-4203 風速計 風速範圍：0.4~25.0 m/s.. 溫度測量範圍：0~50.0°C 精確度：風速：±2%、溫度：±0.8°C.</p>		
<p>(五) PASCO 數位化量測套件 主機：CI-7599 不鏽鋼探針式溫度計： 型號：PASCO CI-6605 溫度範圍：-35°C~135°C 精確度：±0.5°C 解析度：0.05°C</p>	<p>(五) 探針式溫度計</p> 	

圖 2-1：量測儀器。

肆、研究過程及方法

研究過程中需要運用到關於全球暖化的觀念，在基礎地球科學課程中雖有介紹到大氣組成與溫室效應間的關係，但對熱島效應並無詳盡解釋。此外，鋪面的熱學特性及數據的統計分析，在自然及數學課程中也有介紹到熱導播機制、熱容量與統計概念，但這些基礎知識仍嫌不足，所以我們從圖書館與網路資源中尋找並閱讀相關的文獻資料，並將相關資料整理如下：

一、熱島效應 (Urban Heat Island Effect)：

原指海島受到太陽照射，氣溫隨地表溫度升高，但周圍海洋的氣溫因為海水熱容量大，溫度上升較海島少的現象。現代大都市有如海島產生的增溫作用，不但白天較周圍郊區熱，連晚上的溫度也較周圍郊區來得高（林憲德，1999），稱為「城市熱島效應」。從全球暖化的角度來看，近50年來全球暖化程度是近千年中最高的，遠高於過去任何50年的平均值。至於最具爭議性的議題：暖化究竟是地球氣候系統的自然變化還是人為活動所造成？2007年聯合國跨政府氣候變遷小組IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 氣候評估報告，將近百年暖化的數據上修至攝氏0.74 度(1906-2005年)。報告中透過電腦模擬指出，人類活動所排放的溫室氣體仍是造成本世紀暖化的主因（林炯明，2010）。此外根據國內外相關研究，以全球尺度估算，二氧化碳等溫室氣體對於全球溫度升高的貢獻約占全部的三分之二；而都市化的熱島效應貢獻度約占三分之一，因為都市化大幅改變了區域的地貌，致使地表的能量收支情形改變。因此必須在瞭解區域熱島效應貢獻量後，方能正確地對全球暖化做評估，否則將混淆全球暖化訊號（林炯明，2010）。

二、統計方法應用：

(一) 標準差 (Standard Deviation)：

在機率統計中最常使用作為統計分布程度上的測量，定義為變異數的算術平方根，反映組內個體間的離散程度。簡單來說，標準差是一組測量數值自平均值分散開來的程度。一個較大的標準差，代表大部分的數值和其平均值之間差異較大；一個較小的標準差，代表這些數值較接近平均值。

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{N}} \quad (4.1 \text{ 式})$$

(二) 相關係數(coefficient of correlation)：

在統計學中，用來描述兩個隨機變數之間線性關係的強度和方向，簡單而言，兩個變數的關係可以直觀地用散點圖表示，當其緊密地群聚於一條直線的周圍時，我們稱這兩變數間存在高度相關。其算法係以變異數的標準差作為分母，將共變數除以變異數的標準差，即得標準化關聯係數，稱為皮氏積差相關係數簡稱 Pearson's r ，相關係數介於±1 之間，越接近±1 時，表示變項的關聯情形越明顯。

$$r = \frac{\text{cov}(x, y)}{\sigma_x \sigma_y} = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \sum (y_i - \bar{y})^2}} \quad (4.2\text{式})$$

表4-1：相關係數的強度大小與意義

相關係數範圍(絕對值)	變項關聯程度
1.00	完全相關
0.7 至 0.99	高度相關
0.4 至 0.69	中度相關
0.1 至 0.39	低度相關
0.1 以下	微弱或無相關

資料來源：邱皓政，2007

三、研究流程圖：

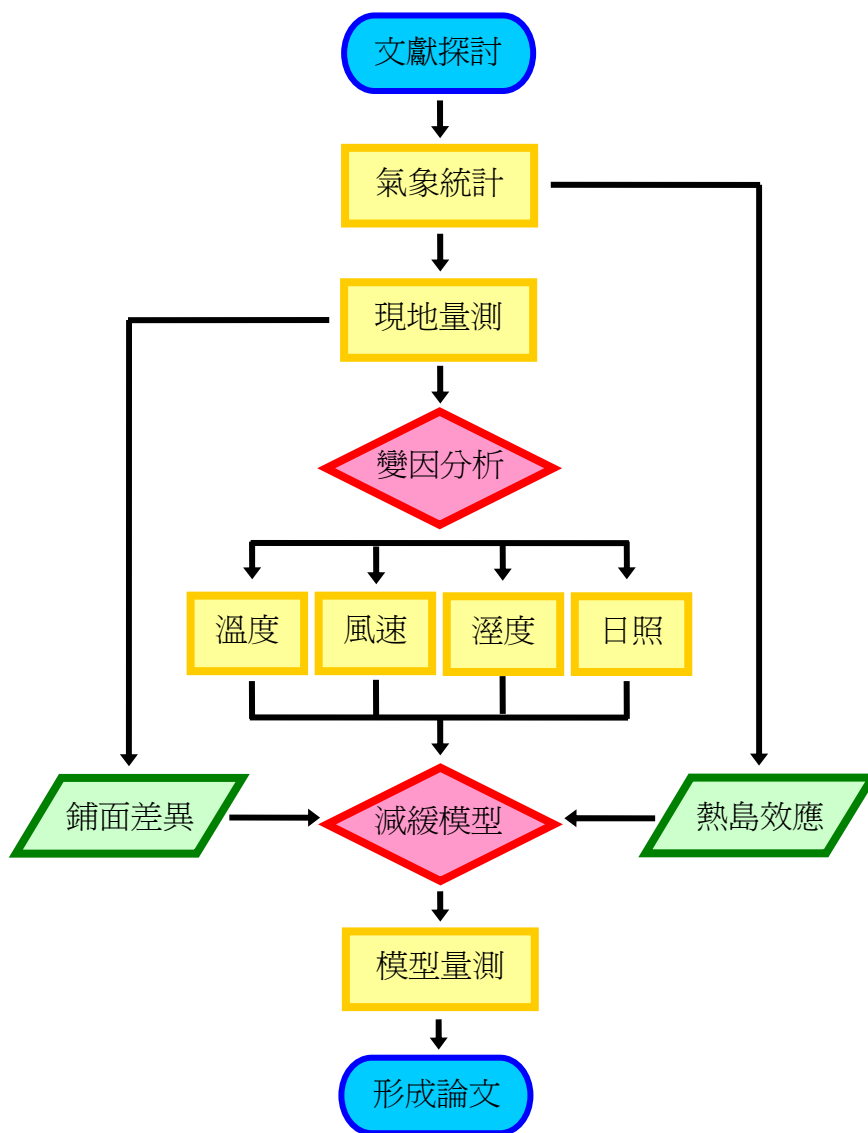


圖 4-1：研究流程圖。

四、研究原理：

(一) 比熱 (specific heat)：

- 1、定義：單位質量的某種物質升高單位溫度所需的熱量。

$$s = \frac{C}{m} = \frac{\Delta Q}{m \cdot \Delta T} \quad (\text{單位：} \frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot ^\circ\text{C}}) \quad (4.3 \text{ 式})$$

2、特性：

- (1) 比熱即 1 克的物質，溫度每升降 1°C 所吸收或放出的熱量。
- (2) 同質量時，比熱較小者，溫度易升降。
- (3) 比熱隨溫度略有變化，嚴格來說非不變的常數，但在一般不甚大的溫度範圍內，計算時可視為定值。

(二) 輻射 (radiation)：

- 1、成因：當物體溫度高於絕對零度時，即發出電磁波而產生熱輻射。
- 2、數學式：史帝芬-波茲曼定律 (Stefan-Boltzmann's law)，1879 年由史帝芬 (Josef Stefan) 做實驗得知，後由波茲曼 (Ludwig Boltzmann) 以理論證實。物體單位時間、單位表面積所放射的輻射能量和絕對溫度的四次方成正比。

$$E = e\sigma T^4 \quad (4.4 \text{ 式})$$

(E ：瓦特/公尺² e ：發射 or 吸收率，黑體 $e=1$ T ：絕對溫度
史帝芬-波茲曼常數： $\sigma=5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$)

3、特性：

- (1) 任一物體，只要溫度不為絕對零度，必在表面放射不同波長的電磁波，溫度逐漸增加時，輻射出的光線（複色光）範圍由紅外線→可見光→紫外線。
- (2) 物體表面愈光滑或淺色，愈易於反射入射的電磁波，反之則否。
- (3) 輻射不需靠介質，且以光速直線傳播。

五、實地測量方式：

(一) 製作實驗記錄表 (附件一)

(二) 量測時距：由於文獻提及熱島效應在秋冬明顯於夏季 (劉紹臣等，2003)，故選訂 2010 年 9 月至 2011 年 1 月，進行為期 5 個月的實地量測。

(三) 量測方式：08：00 至 21：00，搭配學校作息，每隔一小時，利用下課時間測量。

(四) 記錄項目：

- 1、鋪面溫度：天然草坪、沙坑、空心磚 (含少量植被)、柏油、水泥、透水磚、磁磚、PU 跑道、富麗克排球場 (參見，圖 4-2、圖 5-3)。
- 2、氣象參數：氣溫、溼度、風速、紫外線強度、雲量。

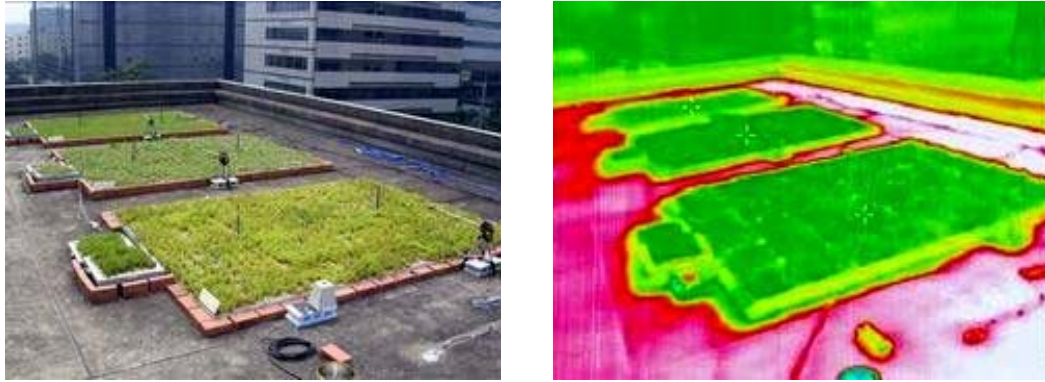


圖 4-2：紅外線攝影機下的鋪面溫度圖（圖片來源：東京都環保署）。

伍、 研究結果

一、氣象統計：

從中央氣象局南區氣象中心下載氣象資料，基於時距長度(time span)及區域面積、地理位置之考量，我們統計出台南與高雄地區 1931 年至 2010 年，9 月至隔年 1 月的平均溫度，參見圖 5-1，其零值線 (X 軸) 代表近 80 年來的總平均溫度 22.9°C。可從圖中發現 1993 年至 2009 年期間，平均溫度均高於總平均溫度，尤其 2006 年時更達 1.6°C。因此我們合理推測，台灣同期平均溫度有變高之趨勢。

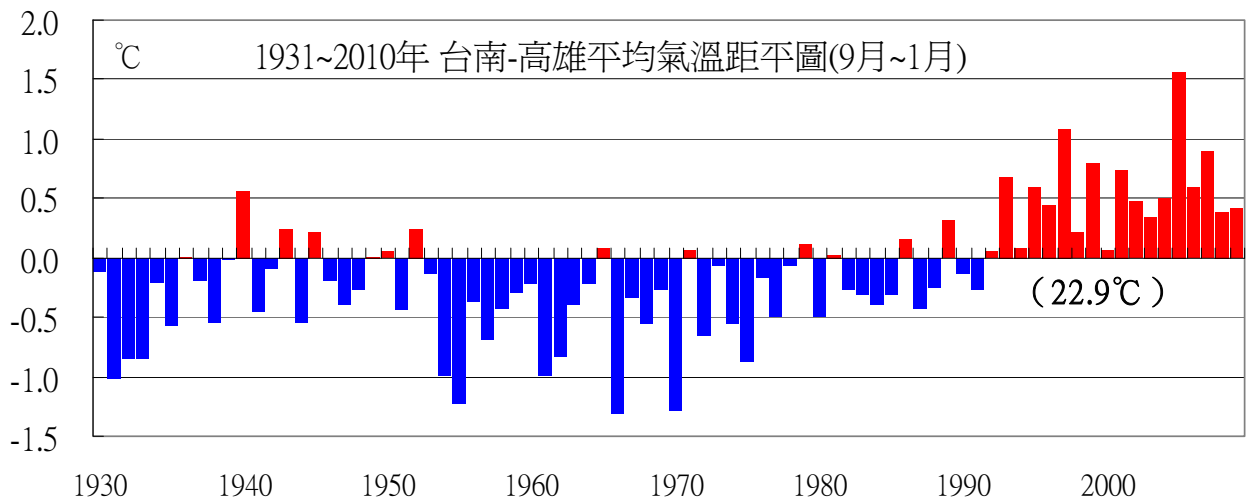


圖 5-1：台南-高雄平均氣溫距平圖。1931 年至 2010 年，9 月至隔年 1 月平均溫度統計圖。圖中零值線(X 軸)表示平均值，如括弧中數值所示 (22.9°C)。

爲了進一步驗證我們的推測，並瞭解全台氣溫變化的情形，我們取近 5 年的每月均溫與近 30 年的每月均溫之差值 (區域擴大至北、中、南、東四大區域，並在各區之中挑選代表性都市)，繪得 圖 5-2。從圖可得：幾乎全台各地近 5 年的月均溫高於近 30 年平均值，程度最高達 5% (如台北、台中等地)。由此可得，台灣氣溫的確有明顯增高的現象，尤其以秋、冬兩季最爲顯著。

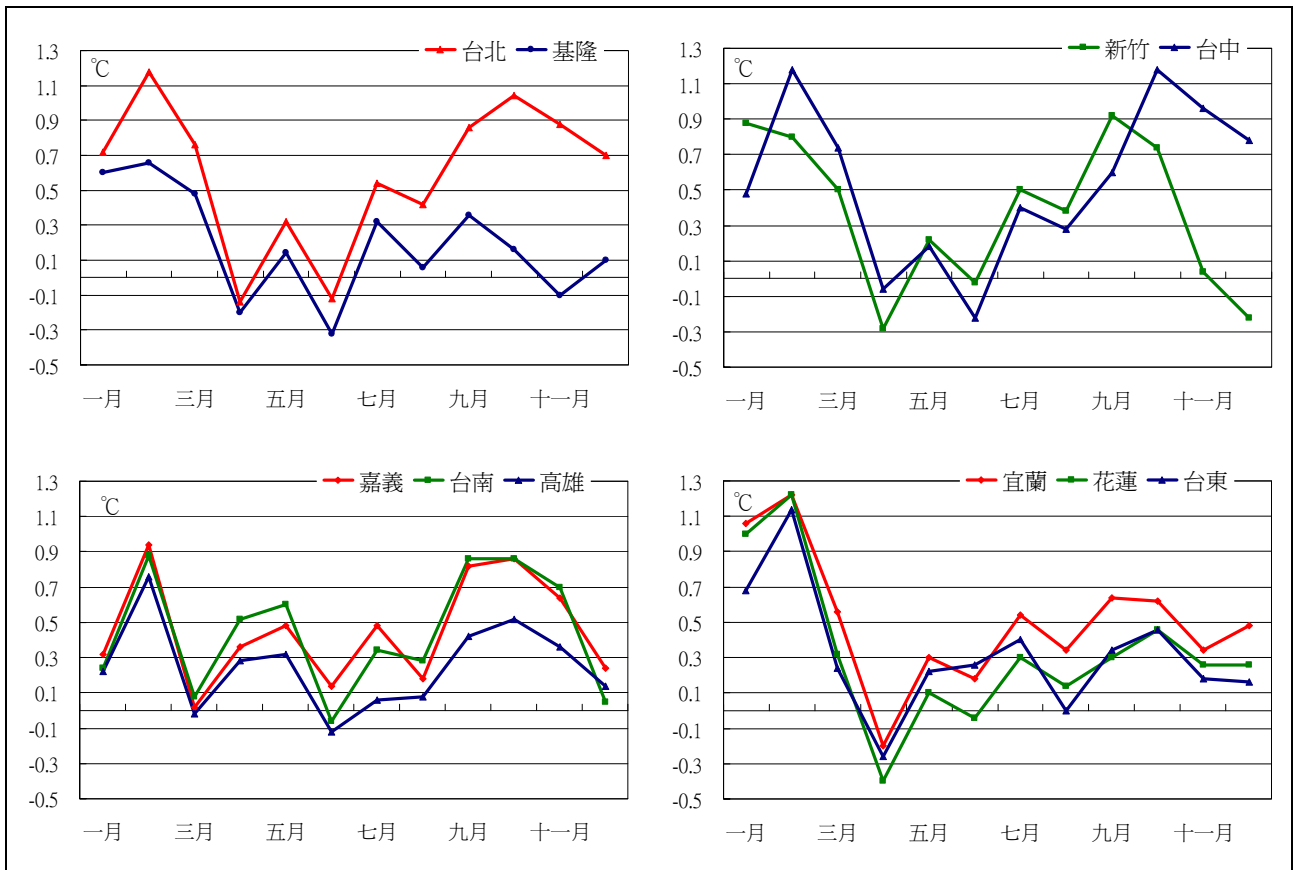


圖 5-2：近 5 年與近 30 年各月均溫的差異曲線。北、中、南、東四區各都市的月均溫在秋、冬季明顯高於 30 年的平均值。左上為北部地區（基隆、台北）；右上為中部地區（新竹、台中）；左下為南部地區（嘉義、台南、高雄）；右下為東部地區（宜蘭、花蓮、台東）。

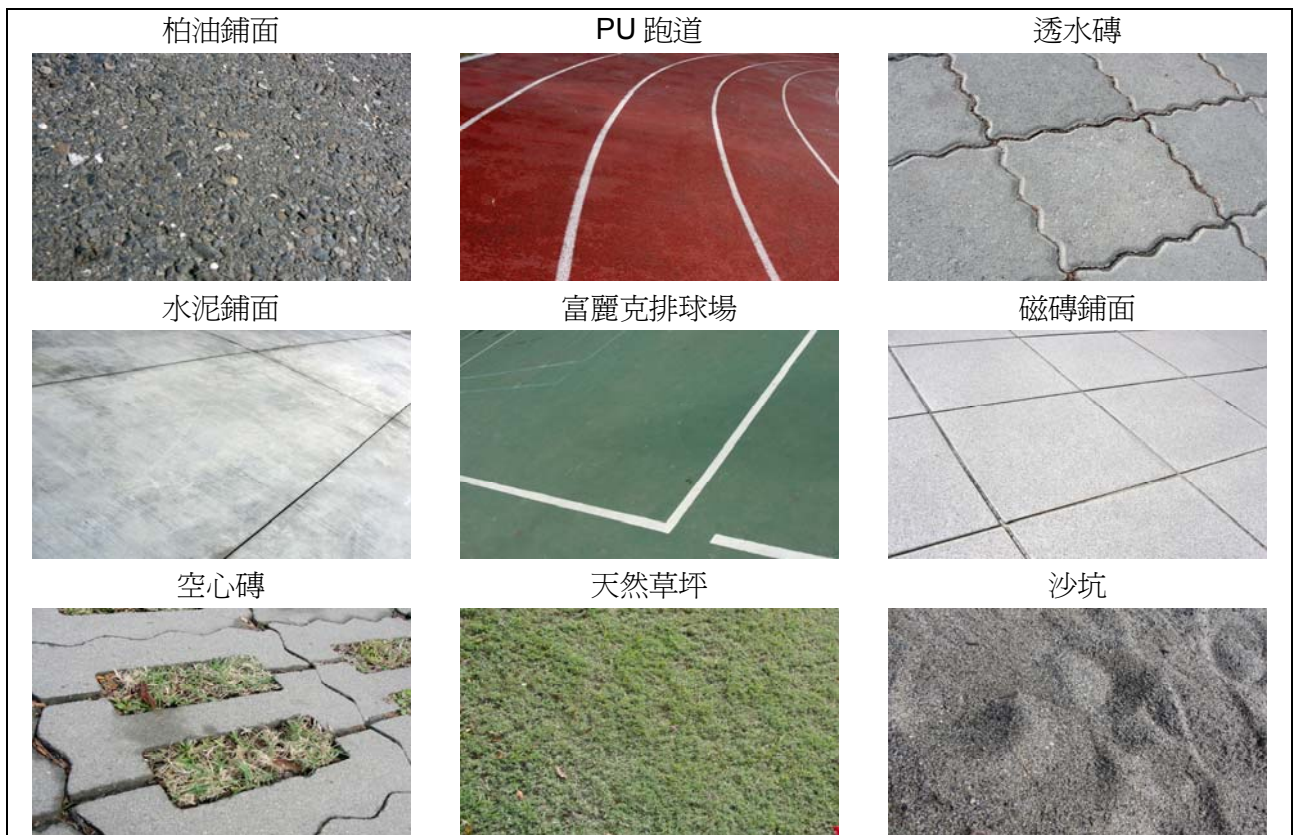


圖 5-3：現地量測實驗的鋪面種類。

二、現地量測：

因為各式鋪面的熱容量、熱導係數、及對陽光的反射和吸收率均不同，導致表面溫度雖高於氣溫卻也不盡相同。在為期5個月的量測時距內，共獲得66天的有效測量。再將各式鋪面溫度與氣溫差值統整成 **表5-1**，並畫得溫差曲線圖（參見 **圖5-5**）。



圖 5-4：實地量測情形

表5-1：各式鋪面實地量測統計表

時間	水泥	磁磚	環保磚	草地	柏油	空心磚	跑道	排球場	沙地
0800	0.99	0.75	2.52	-0.51	1.08	0.24	3.14	2.66	0.25
0900	3.36	1.80	4.90	1.41	3.65	1.38	4.52	4.55	1.74
1000	5.01	2.08	7.47	1.36	5.92	2.71	7.51	8.01	5.66
1100	5.98	3.32	9.28	2.04	8.09	3.62	8.91	8.56	9.48
1200	8.05	3.95	10.15	2.28	8.46	3.82	9.70	9.08	9.81
1300	7.55	3.73	9.64	2.05	7.08	3.90	9.61	9.16	9.86
1400	6.78	3.42	8.70	1.69	5.86	3.75	9.43	9.34	8.44
1500	5.25	2.85	7.43	0.79	3.84	2.12	9.05	8.58	7.10
1600	3.84	2.14	5.51	-0.89	3.55	1.48	5.02	6.23	2.36
1700	3.64	1.91	4.53	-1.06	2.37	1.34	3.59	3.49	0.49
1830	3.83	1.83	4.83	-0.81	1.49	1.16	3.49	3.49	-0.01
1930	3.36	1.47	3.69	-1.39	1.33	1.47	2.30	2.56	-0.94
2030	2.93	1.21	3.25	-1.75	1.07	1.07	1.68	1.64	-1.31

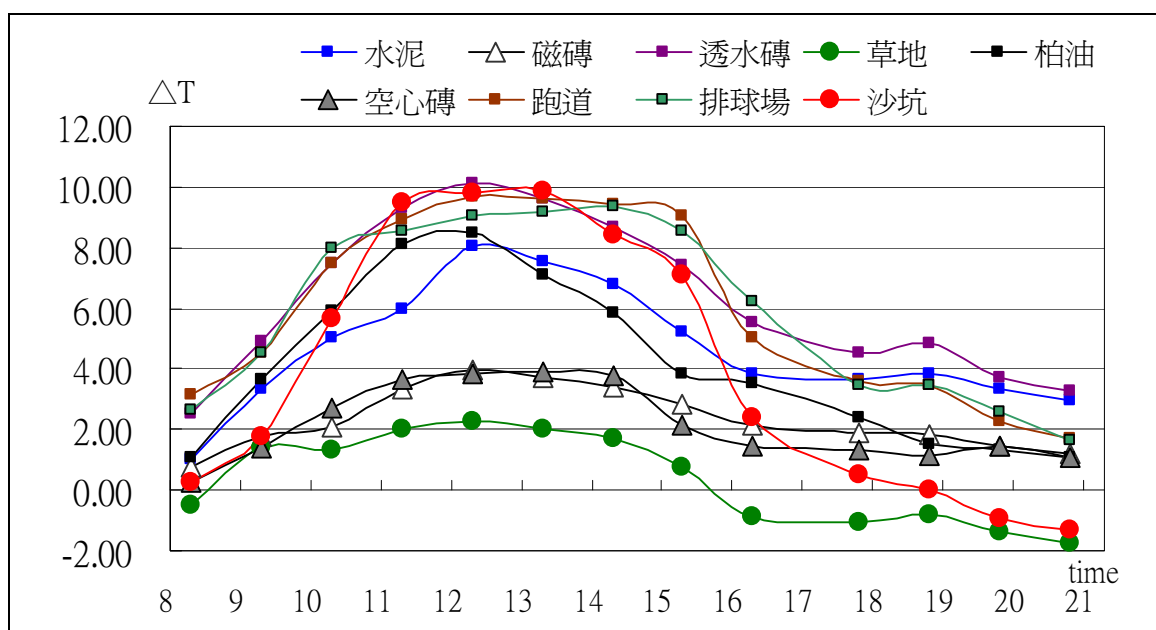


圖 5-5：各式鋪面與氣溫的溫差曲線圖（時間 08:00~21:00）。

我們從 圖5-5 各式鋪面的溫差曲線圖，可以獲得以下幾點歸納：

- (一) 人工鋪面的溫度，在監測時間內，均明顯高於當時氣溫，尤其以『水泥、透水磚、柏油』（建材鋪面類）、『PU跑道、富麗克排球場』（合成鋪面類）最為顯著。
- (二) 『磁磚鋪面』因為表面光滑，加上顏色較淺，其溫差變化相對於(一)所述的人工鋪面較不明顯；而『空心磚』因為有部份植被及泥土故有相近的結果。
- (三) 天然鋪面以『草地』的溫差最低且穩定；『沙坑』在日照時溫差偏高，傍晚卻能降到與草地相當，其原因是沙坑孔隙率較高，不受陽光照射後較易降溫（徐震宇，2008）。
- (四) 『透水磚』孔隙大並搭配高透水性的基底層，來達到保水透氣以利降溫，但本實驗的透水磚鋪設地點位於校門口車輛進出頻繁處，施工單位基於耐用之考量，將基底層改以鋼筋水泥替換，此舉可能是導致透水磚溫差曲線變化與柏油及水泥相當的主要原因。

依照 圖5-5 溫差曲線走勢的相似度，將鋪面區分成五大類（參見 表5-2）。依據 表5-1，我們可以從08:00至12:00數據得出平均升溫速度；從17:00至21:00數據得出平均降溫速度（參見 圖5-6），其中可以發現：以『水泥、透水磚、柏油』、及『PU跑道、富麗克排球場』這兩類人工鋪面的平均升、降溫速度最顯著，而『草地』的最為緩和。

表5-2：依溫差曲線將鋪面區分成五大類

鋪面名稱	備註
(1) 水泥、透水磚、柏油	常見的都市人工鋪面，其溫差曲線位於高溫處
(2) PU 跑道、富麗克排球場	運動場人工鋪面，其溫差曲線亦位於高溫處
(3) 磁磚、空心磚	常見的建築物或公園人工鋪面，其溫差曲線亦位於中間處
(4) 草地	天然鋪面，其溫差曲線保持在低溫處
(5) 沙坑	天然鋪面，其溫差曲線變化急遽

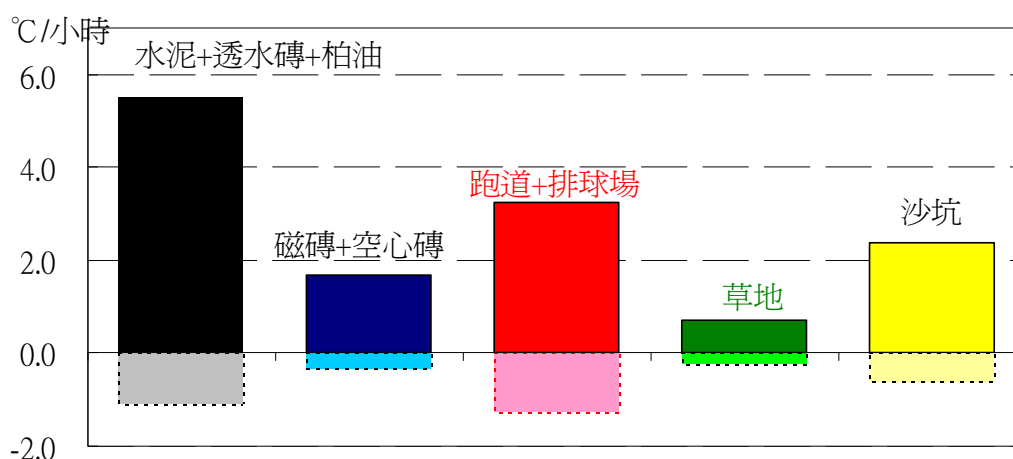


圖 5-6：五大類鋪面的平均升、降溫速度。上方實線色塊代表平均升溫速度；下方虛線色塊則代表平均降溫速度。

陸、 討論

一、都市化與熱島效應：

文獻中提到必須在瞭解區域熱島效應影響後，方能正確地對全球暖化做出評估，否則將混淆全球暖化訊號（林炯明，2010）。有鑑於此，我們將探討都市化程度與氣溫之關係。利用內政部營建署『臺閩地區都市計畫土地使用分區面積』之統計資料，以都市計畫土地使用面積（非天然鋪面，包括住宅、商業、工業、行政、文教、公共設施用地等）量化都市化程度（參見 圖 6-1），圖中顯示，在 2001~2003 年間都市化使用面積有明顯的增加（斜率驟增）；我們再利用中央氣象局統計資料及劉紹臣等人在 2003 的研究，繪出 1897~2010 年台灣平均氣溫距平圖（參見 圖 6-2），圖中黃色區塊為 2000~2010 年的溫差數據（即 圖 6-1 的統計時間）。觀察 1995~2010 年間的曲線，在 2002~2003 年（綠色箭頭所指處）有明顯凸起，恰與 圖 6-1 都市使用面積明顯增加的年份相符，而且之後的溫差持續相差 1°C 以上，因此我們推測：都市化程度將會增強熱島效應。

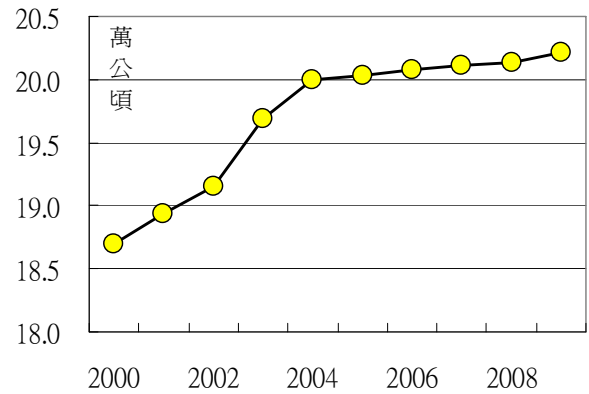


圖 6-1：全台都市計畫土地使用面積曲線

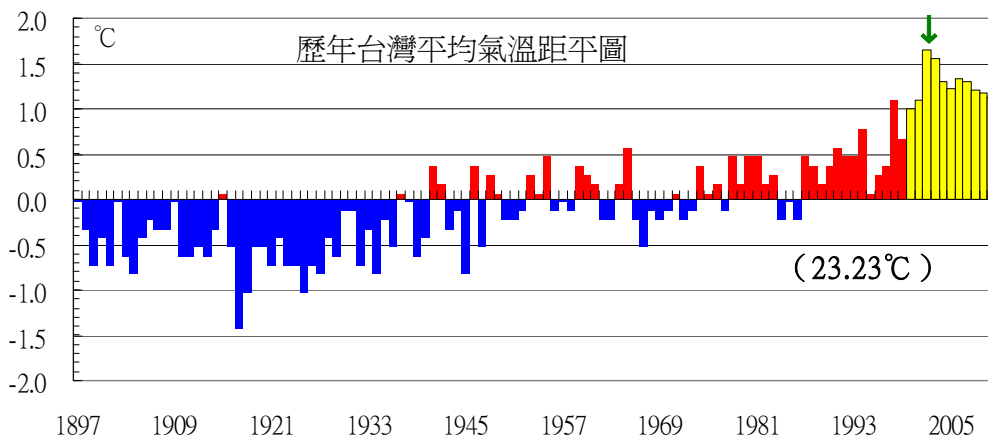


圖 6-2：歷年台灣平均氣溫距平圖。黃色區塊為配合圖 6-1 的統計時間所標示出的數據，圖中零值線(X 軸)表示平均值，如括弧中數值所示（23.23°C）。

二、熱島效應對區域氣候的影響：

熱島效應對區域氣候的影響可由比較長期的全球溫度（參見 圖6-3，引用劉紹臣等，2003）與台灣溫度（參見 圖6-2）得知。兩圖在1980年之前，溫差曲線變化大致相同。然而定量來看，台灣從1990年至2010年間，平均溫度增加了約1.3°C，比全球增溫超過60%，這可能也是台灣熱島效應所造成（劉紹臣等，2003；林炯明，2010）。

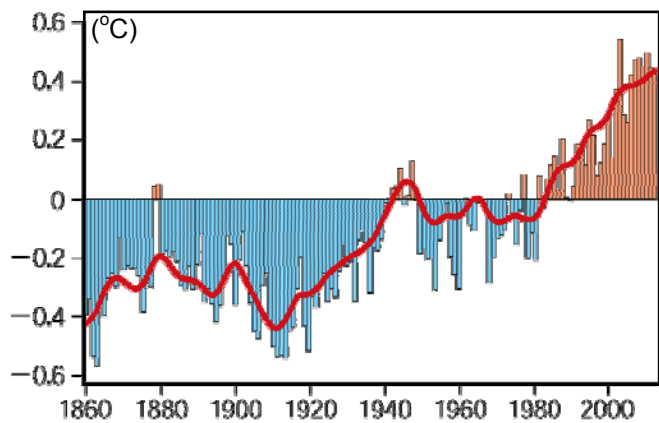


圖6-3：歷年全球平均氣溫距平圖。

三、天然鋪面與熱島效應：

由於偏遠地區的天然植被面積均勻且廣闊，加上較少人為活動，適合進行人工與天然鋪面對熱島效應的比較。我們使用中央氣象局統計資料，將地處偏遠的鞍部、日月潭、阿里山氣象站視為對照組（參見圖 6-4），取近 5 年的每月均溫與近 30 年的每月均溫之差值，與相同時距的北、中、南、東代表性都市相比較，繪得圖 6-5，圖中發現，偏遠地區的熱島效應普遍偏低，而台北、台中這類西部高度都市化的區域則偏高（林炯明，2010），尤其在 9 月過後最為顯著。



圖 6-4：偏遠地區地理位置圖

其中高雄及台南的熱島效應較不明顯，推測可能是緯度偏低氣候較穩定，且地形較開放不像台北、台中屬於盆地地形，故受海陸環流影響大熱島效應較不明顯。綜合以上，我們推測：天然鋪面能有效減緩熱島效應。

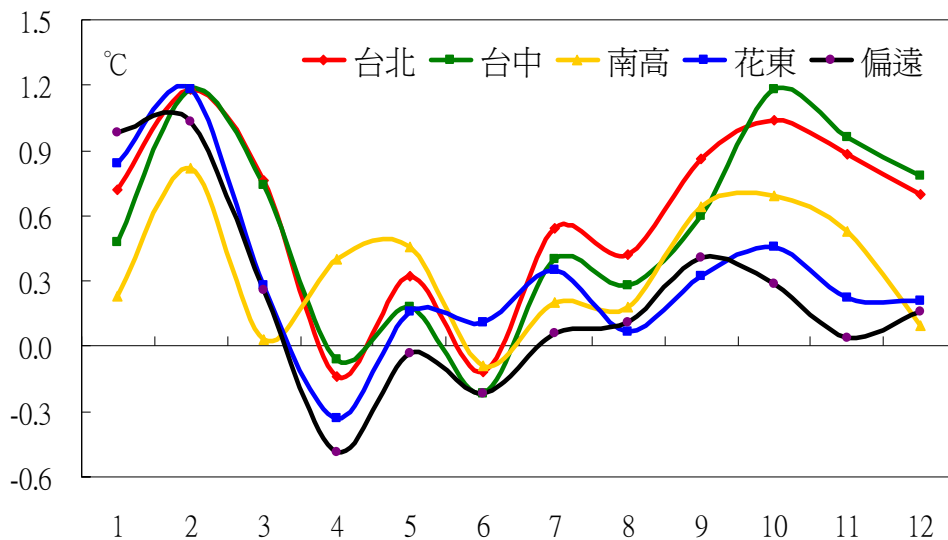


圖 6-5：偏遠地區與其它代表性都市的溫差曲線圖。以黑色線條表示的偏遠地區，熱島效應大致偏低，台北、台中這類高度都市化的區域則偏高，尤其在 9 月過後最為顯著。

四、熱島效應與氣象因子：

諸多熱島效應研究的相關文獻提到，氣象條件會影響其溫度變化情況（林炯明，2010；劉紹臣等，2003；徐震宇，2008），於是我們使用「現地量測」實驗中，人工鋪面（水泥、透水磚、柏油、跑道、排球場）的數據，與 2008 年徐震宇論文（透水連鎖磚、透水瀝青混凝土）相互比較，整理成表 6-1，發現兩者相符性極高，推得鋪面種類的差異並不影響氣象因子對溫度變化的關聯性。

- （一）氣溫：在 22~32°C 範圍內，共 55 天的數據，獲得相關係數 $r=0.844$ 。
- （二）日照：在 200~1100 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 範圍內，共 38 天的數據，獲得相關係數 $r=0.712$ 。
- （三）溼度：在 51~73% 範圍內，共 48 天的數據，獲得相關係數 $r=-0.725$ 。
- （四）風速：在 0.6~3.6 m/s 範圍內，共 47 天的數據，獲得相關係數 $r=0.148$ 。

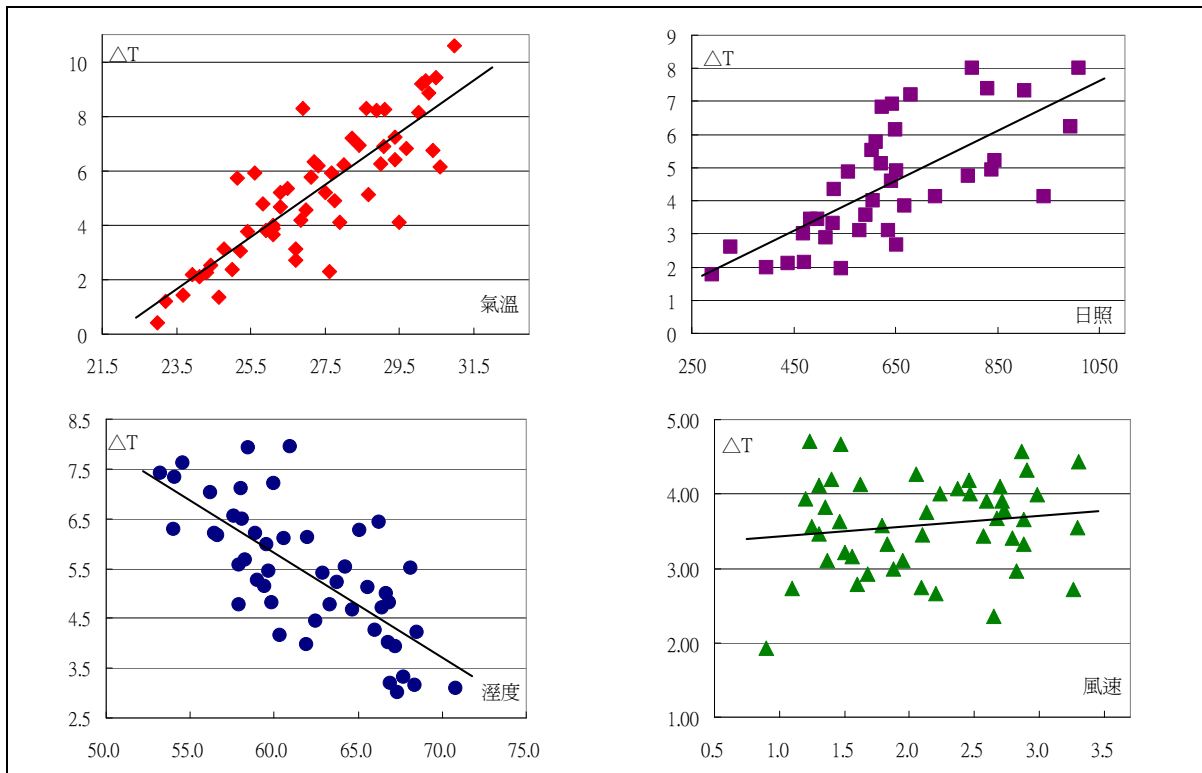


圖 6-6：影響鋪面溫度的氣象因子。左上為氣溫 ($r=0.844$)；右上為日照 ($r=0.712$)；左下為溼度 ($r=-0.725$)；右下為風速 ($r=0.148$)。

表6-1：影響鋪面溫度的氣象因子，本實驗與文獻資料(徐震宇，2008)之比較。

氣象因子	實驗室預測	新店實驗區	觀音國小	本實驗
氣 溫	0.904	0.962	0.825	0.844
日 照	0.749	0.796	0.767	0.712
溼 度	-0.872	-0.972	-0.769	-0.725
風 速	0.693	0.625	-0.382	0.148

比較 表 6-1 中四個現地量測的氣象因子，從相關係數得知：

- 1、『氣溫』及『日照』強度對鋪面表面溫度之相關係數較高（大於 0.7，高度相關），顯示鋪面溫度隨氣溫及日照的上升而增加。
- 2、大氣『濕度』呈負相關（小於-0.7，高度負相關），顯示濕度增加對鋪面表面產生降溫之作用。在討論的第三點中，取鞍部、日月潭、阿里山氣象站為偏遠地區代表，從 圖 6-7 可以發現以日月潭的溫差偏低，此與濕度呈負相關相符。
- 3、『風速』因素在實驗室預測及新店的實驗區所量測的結果呈正相關，卻在觀音國小及本實驗中呈現低度相關（絕對值小於 0.4），原因可能在於研究中所採用的現地，受限於周遭建築物分布，加上台灣冬季受季風影響氣流較不穩定，所以在此項因素的相關性並不顯著。

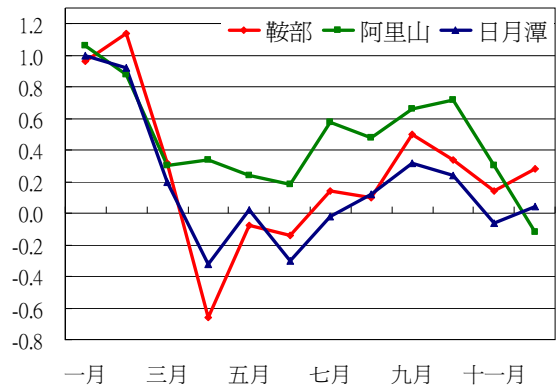


圖 6-7：偏遠地區溫差曲線

五、減緩熱島效應的模型構想：

從全台的氣溫與近10年來台灣都市計畫使用面積（非天然面積的總和）的曲線圖，似乎透露出都市化與熱島效應的關聯性，都市化愈高，升溫愈顯著（參見 圖 6-1、圖 6-2）。無獨有偶，從 圖5-2的東部三都市可以看出，宜蘭高於另花蓮及台東，其原因可能就是雪隧在2006年全線通車後，加速交通及商業活動增加，所以有此現象。除此之外，台灣高鐵於2007年1月通車，未來對於都會區的發展勢必產生影響，特別是西半部地區，加上西半部的五都也於2011年合併，一旦新的都會區形成，也會造就新的熱島中心，到時對於當地的都市氣候，包括溫度、溼度、懸浮微粒以及區域的大氣環流將會造成影響。換句話說，新、舊都會區的發展或重構將會對台灣西半部地區熱島效應的強度與分布產生影響（林炯明，2010）。未來都市熱島的空間分布與日與劇增的人為活動，兩者間的動態關係、以及如何降低未來新都會地區的熱島效應，都將是刻不容緩的議題。

要減緩熱島效應的發生，簡單講就是要把都市變成一座“冷島”，因此我們參考其它文獻資料（劉紹臣等，2003；徐震宇，2008；林炯明，2010），搭配本篇的研究結果，挑選出以下可能減緩熱島效應的模型構想：

由於熱島效應是受到大氣、植被與水文等交互作用與全球暖化複雜影響的結果，我們想利用都市生態系統中減緩溫度的流體動態系統（即水和空氣）來減緩熱島效應。

簡單講就是將性質相近者視為同一系統，包括：(一)由人為活動因素，包括建築物、汽機車廢氣、人工鋪面及低反射材料等所組成的，稱為都市次系統(urban subsystem)；(二)由公園綠地、街道植栽、天然植被等組成，稱為植被次系統(plantation subsystem)；(三)由滲水性較佳的物質，包括地下水、透水鋪面、池塘、河流、水庫等組成，稱為滲水次系統(permeated water subsystem)，參見圖 6-8，圖中的「都市次系統」產生的增溫，可透過河流或街道鋪面等「滲水次系統」相互流通，以蒸發方式將熱量吸收並將水蒸氣外散到大氣中，達成調節或降低熱島效應的功能，接著這些熱量及水氣可再傳輸至「植被次系統」當成植被成長所需的能量，植被受到高溫成長快速，而根部在「滲水次系統」中又可涵養更多量的水源，如此良性循環將產生的熱能以流動方式讓三個次系統相互作用，能有效舒緩熱島效應。

(一) 都市次系統：根據我們的研究結果得知，人工鋪面的升溫效應極高，且“深顏色”的鋪面較易提高熱島效應（參見 圖5-6），根據Rosenfeld等人（1995）估計全美如果都市中都使用淺色表面與植樹等措施，每年可節省約一百億美元，且每年可以減少2700

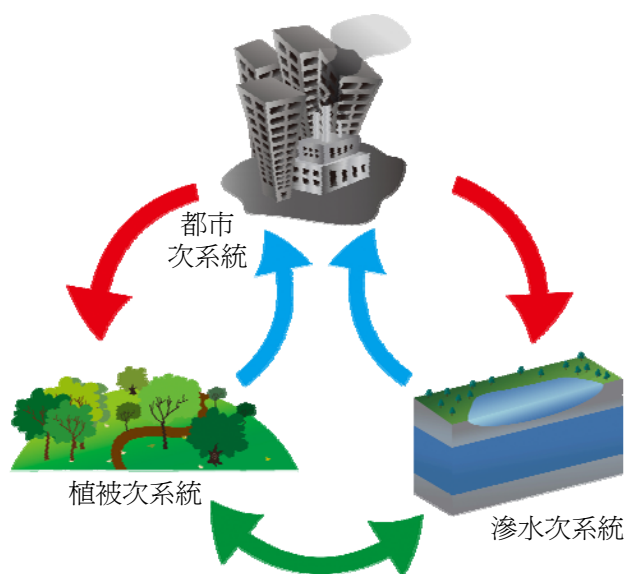


圖 6-8：減緩熱島效應的構想模型。利用都市生態系統中減緩溫度的流體動態系統相互調節，降低熱島效應。

萬噸的排碳量，減緩溫室效應的增加速度。熱島效應往往又會與能源的使用形成惡性循環，即熱島效應提高了都市氣溫，造成冷氣使用量增大，而冷氣排放的廢熱又再次提高都市氣溫，導致冷氣使用量又再增加，從台灣能源使用的角度來看，若以夏季氣溫30°C為計算基準，每升高1°C就要增加約60萬瓩的電量，相當核電廠一部主機每月的供電量（林炯明，2010），如此惡性循環將耗費更多的能源。

(二) 植被次系統：從實地量測及各地氣象統計圖的結果可以得知，天然鋪面有良好的維持低溫效果，尤其含有植被效果更為顯著（參見 圖5-6、圖6-5）。依此結論，搭配都市景觀規劃與設計的角度來看，增加都市綠化（提升道路的綠覆蓋率）、多種植栽、減少道路的開闢度皆可達到減緩的功效。文獻研究顯示，一棵大樹每日蒸散450公升的水量，消耗230,000千卡，相當於約25部冷氣空調機運作19小時的能量（Federer 1970）。也因此，蒸散作用所造成的降溫效應可以使綠地附近的溫度較周圍低約2-8°C（Taha et al. 1991），以更大空間尺度考量，一個在東京都會區的模擬研究指出，將建築物附近綠化可以使正午氣溫降低效果達0.47°C（Dhakal 和Hanaki 2002），由此可見植栽與綠化對減輕都市熱島效應的效果與潛力。

(三) 滲水次系統：此系統除了地下水、池塘、河流、水庫等，我們想特別強調在都市開發中，容易被忽略的道路柏油鋪面。根據國科會的專題研究報告指出（張琪如、陳恩右，2005），道路面積與都市熱島強度呈正相關，道路極有可能成為小型的熱島中心，周圍也可能受波及而溫度提高。根據我們的研究，沙坑孔隙率較高，不受陽光照射後較易降溫，甚至能降到與草地相當（參見 圖5-5），依此理論，我們可以多採用孔隙大、透水性高的鋪面，利用其熱傳導係數較低的特性，雖然白天受熱後表面溫度仍會迅速提升，但不至於儲存大量熱能於鋪面中，到了夜晚容易與空氣溫度達到平衡。因此增加道路的綠覆蓋率、使用高透水性鋪面，並提高通風性，將減緩此類人工鋪面所造成的熱島強度。

六、減緩熱島強度的模型實測：

透過實際測量，檢驗上述提出的減緩熱島強度模型並分析其可行性。首先，將水生植物黃金葛栽種於模型箱內以模擬減緩模型（實驗組）；再將沙石填充於另一個模型箱中做為對照組，以模擬一般都市的人工建築物及鋪面（因為沙石容易鋪設在模型箱中，且其溫差曲線圖在白天與多種人工鋪面相近。參見 圖5-5，故以其替代人工鋪面），量測時，在模型箱四周鑽洞以利適度通風，並加上頂蓋減少環境因素造成誤差，參見 圖6-9。在為期47天的量測時距內，共獲得33天的有效測量，並依量測地點不同，將減緩模型及其對照組的溫度、溼度變化統整成 表6-2，並繪得溫變曲線圖（參見 圖6-10）及溼度變化曲線（參見 圖6-11）。

從 圖6-10得知：(1)在陽光直射處的溫度遠高於陰涼通風處。(2)在陰涼通風處，實驗組確實可降低熱島強度，尤其12~15點最為顯著。(3)在陽光直射處，實驗組溫度卻高於對照組，其原因是溫室氣體-水氣所致，參見 圖6-11，由於陽光直射處的蒸發量過快且過量，不只四周的孔洞通風不及，模型箱的頂蓋也會阻擋其逸散，導致箱內溼度偏高造成溫室效應。總和以上，在通風較佳的條件下，提出的構想模型確實具備減緩熱島強度的功能。



圖 6-9：減緩熱島強度的構想模型與對照組模型。

表6-2：減緩模型與對照組之量測統計表

時間	直射處		陰影處		溼度	
	實驗組	對照組	實驗組	對照組	直射處	陰涼處
0800	32.07	32.27	28.85	28.86	79.20	76.02
0900	35.12	34.71	29.27	29.54	82.76	75.61
1000	37.94	37.82	29.45	29.65	88.34	75.27
1100	39.71	38.74	30.06	30.62	91.43	73.18
1200	40.84	40.17	31.04	32.15	90.61	72.03
1300	40.92	40.05	31.11	32.04	91.48	72.58
1400	40.67	39.75	31.05	32.15	89.87	73.54
1500	39.41	38.07	30.77	31.45	87.32	72.51
1600	36.72	36.15	30.45	30.77	87.51	73.38
1700	33.86	33.21	29.15	29.39	86.08	74.28
1800	32.13	31.56	28.81	28.65	84.55	73.81

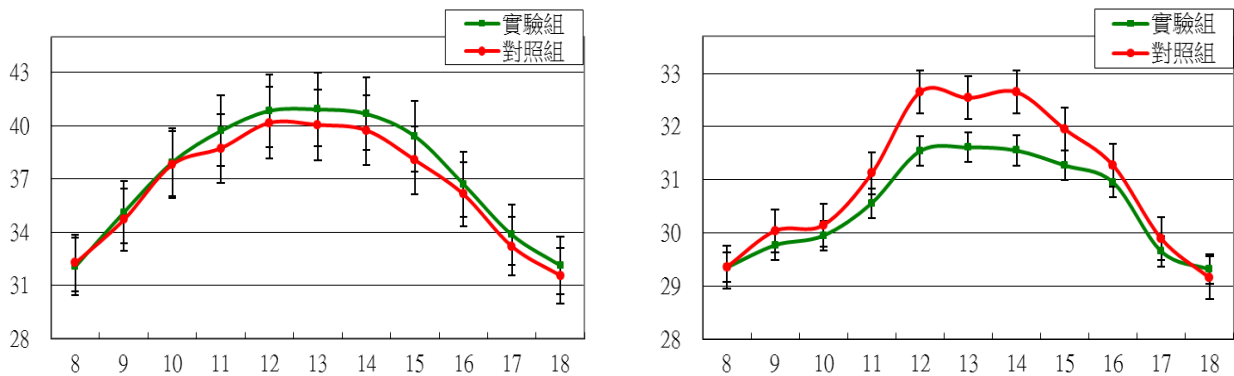


圖 6-10：分別將模型箱置於陽光直射處（左圖）、及陰涼通風處（右圖）。由右圖得知：在通風較佳的條件下（溫室氣體中-水氣不易聚集），明顯具備減緩熱島強度的功能

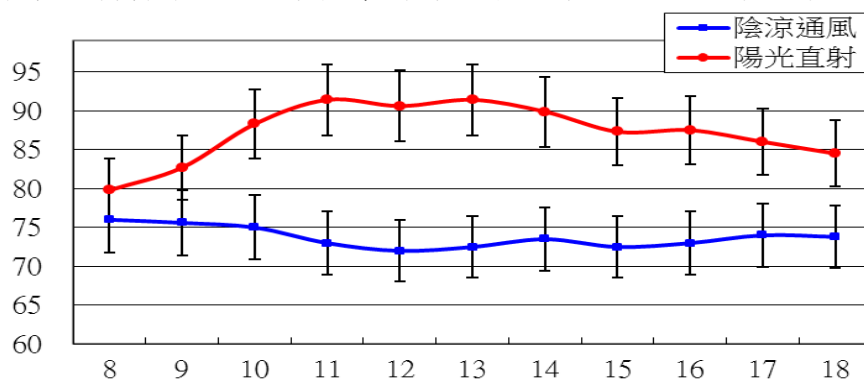


圖 6-11：溼度變化曲線圖。將模型置於陽光直射處（紅色）；將模型置於陰涼通風處（藍色）。

七、鋪面深度與溫度的關係：

爲了進一步瞭解溫度隨鋪面深度的變化關係，使用探針式溫度計，插入鋪面下量測不同深度的溫度，依不同量測地點，統整成 **表6-3**、**表6-4**，並繪得各深度的溫差曲線圖（參見 **圖6-12**、**圖6-13**）。在各溫變曲線中，11~14點的光源最爲穩定（無斜射問題），故截取此時段數據做方程式擬合，進一步分析溫度隨深度變化之關係（參見 **圖6-14**、**圖6-15**）。

表6-3：陽光直射處，深度與溫度量測統計表

時間	植被鋪面				沙地鋪面			
	5cm	10cm	15cm	20cm	5cm	10cm	15cm	20cm
0800	28.32	27.52	27.61	27.40	31.73	30.25	30.07	28.69
0900	30.41	29.94	27.78	28.02	33.51	33.21	31.12	29.47
1000	33.52	32.17	29.13	28.16	36.63	35.63	32.13	29.94
1100	36.95	33.97	29.31	28.79	38.53	38.22	35.08	33.15
1200	38.83	35.82	30.21	29.83	39.02	39.09	37.11	34.71
1300	38.91	36.69	31.08	29.98	39.43	38.73	36.91	35.31
1400	38.61	35.76	29.98	29.63	38.79	38.31	36.15	34.04
1500	36.92	34.29	29.53	29.01	37.27	37.17	34.07	32.13
1600	35.63	32.98	29.17	28.42	35.02	34.62	32.11	30.09
1700	32.58	29.74	28.28	27.92	32.52	32.11	30.62	29.06
1800	29.76	28.14	28.07	27.83	31.07	30.09	29.73	28.94

表6-4：陰涼通風處，深度與溫度量測統計表

時間	植被鋪面				沙地鋪面			
	5cm	10cm	15cm	20cm	5cm	10cm	15cm	20cm
0800	27.83	27.34	27.48	27.29	28.98	28.23	28.29	28.47
0900	28.38	28.18	27.69	27.88	29.22	28.71	28.38	28.35
1000	28.72	28.24	27.83	27.79	29.56	28.76	28.57	28.26
1100	29.33	28.47	28.13	28.03	30.17	28.99	29.03	28.52
1200	29.58	28.94	28.52	28.36	30.29	29.19	28.93	28.84
1300	29.64	28.91	28.61	28.46	30.31	29.28	28.84	28.74
1400	29.42	28.87	28.26	28.41	30.11	29.24	29.03	28.89
1500	29.46	28.30	27.83	28.01	29.85	29.18	28.79	28.48
1600	28.96	28.27	27.88	27.98	29.80	28.94	28.67	28.45
1700	28.68	28.13	27.89	28.03	29.15	28.65	28.39	28.49
1800	27.87	27.93	27.46	27.51	28.71	28.18	28.34	28.19

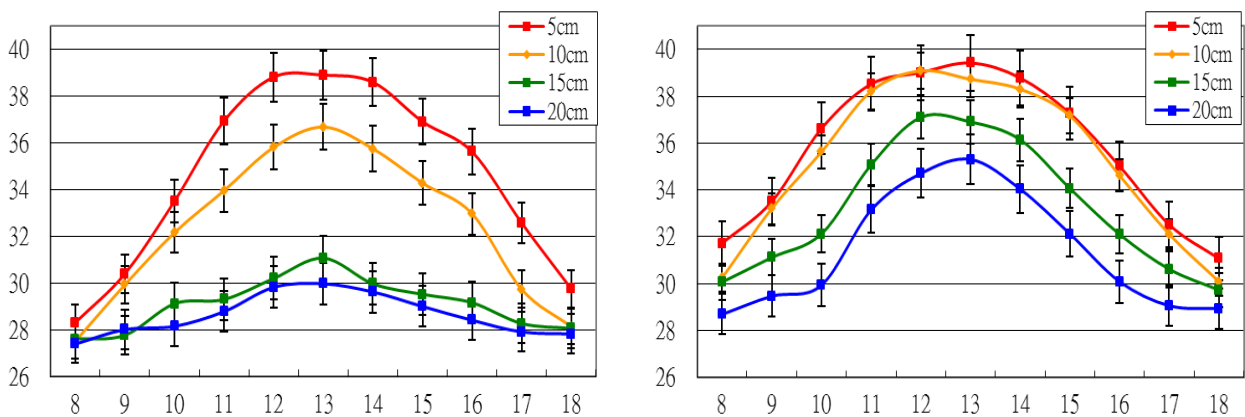


圖 6-12：陽光直射處，各深度的溫變曲線圖。左圖爲植被鋪面、右圖爲沙地鋪面。比較兩圖，左圖雖然地處陽光直射處，但 15 及 20 公分處的溫變曲線明顯偏低，說明植被具有降溫之效果，但厚度太薄效果卻不佳。

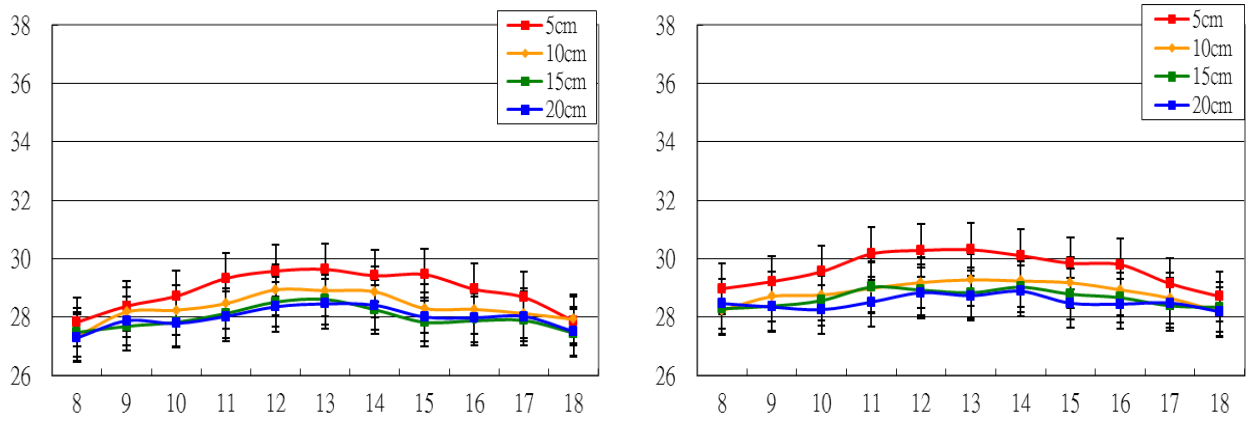


圖 6-13：陰涼通風處，各深度的溫變曲線圖。左圖為植被鋪面、右圖為沙地鋪面。除了表面 5 公分處的溫變曲線較顯著外，其餘深度溫變曲線並不顯著（過度重疊）。

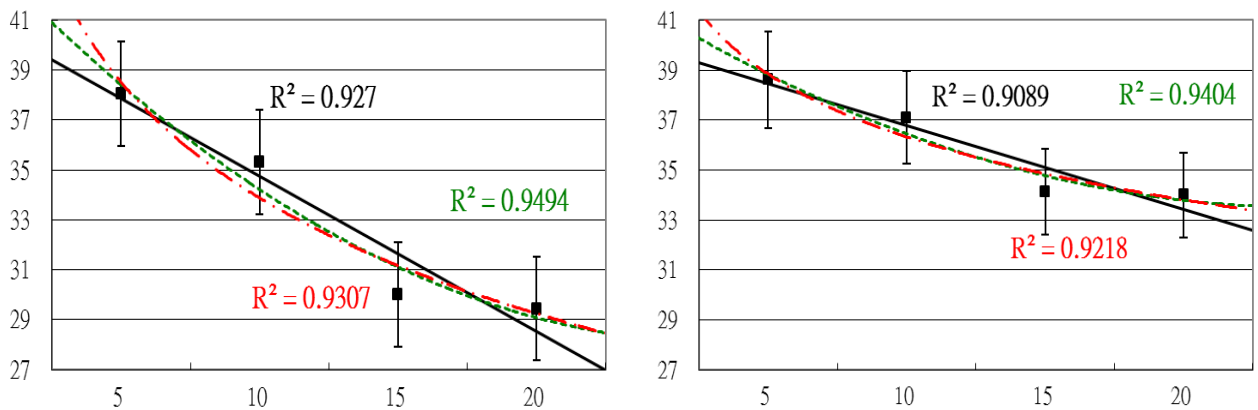


圖 6-14：陽光直射處，溫度隨深度變化的擬合曲線（左圖為植被鋪面、右圖為沙地鋪面）。截取光源穩定（無斜射問題）11~14 點的數據做擬合，黑色為一次直線、紅色為二次曲線、綠色為指數擬合。其中以指數擬合最佳（ R^2 值達 0.94）。

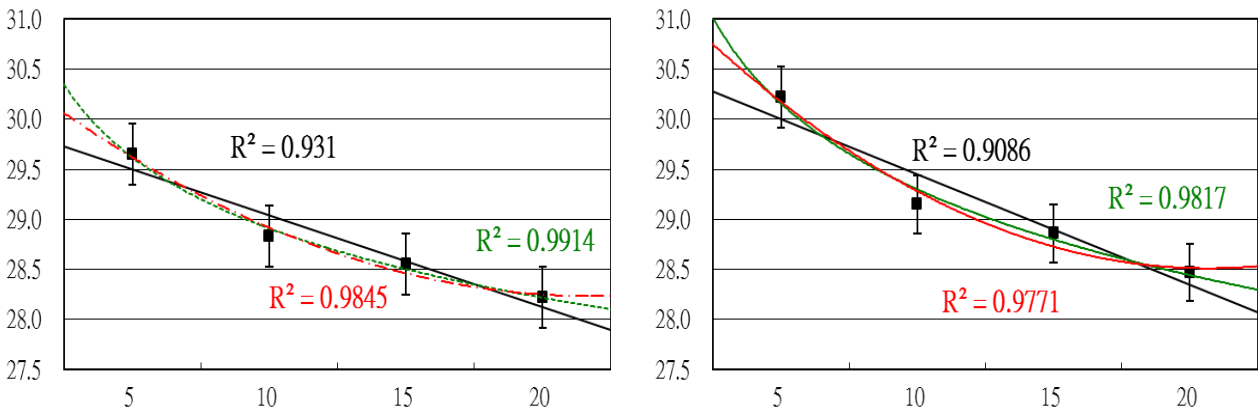


圖 6-15：陰涼通風處，溫度隨深度變化的擬合曲線（左圖為植被鋪面、右圖為沙地鋪面）。截取光源穩定（無斜射問題）11~14 點的數據做擬合，黑色為一次直線、紅色為二次曲線、綠色為指數擬合。其中以指數擬合最佳（ R^2 值達 0.98 以上）。

（一）陽光直射處：從 圖6-12的左圖得知，在深度15、20公分處的溫變曲線圖，明顯偏低溫，說明植被能有效達到減緩熱島效應，但厚度太薄效果不佳。此外，圖6-12的右圖，沙地鋪面的表面5公分與10公分處的溫變曲線幾近重疊，原因可能是沙地鋪面顏色深，熱輻射強，加上結構過於鬆散，熱傳導容易所致。再將各溫變曲線中，截取11~14點光源最穩定（無斜射問題）的數據做方程式擬合（參見 圖6-14），其中以『指數擬合』最佳（ R^2 值達0.94），故知溫度隨深度變化呈指數關係遞減。

(二) 陰涼通風處：從 **圖6-13**得知，除了表面5公分處的溫變曲線較顯著外，其餘深度並不顯著（過度重疊）。承上，再截取各溫變曲線11~14點的數據做方程式擬合（參見 **圖6-15**），其中仍以『指數擬合』最佳（ R^2 值達0.98以上），故得溫度隨深度變化，在陰涼通風處仍呈指數關係遞減。

柒、結論

本研究主要分成五個部份，一是利用中央氣象局數據、內政部營建署都市計畫書及相關文獻資料，整理並統計出台灣氣候受熱島效應影響的程度；二是進行現地量測，並進一步探討之間的相關性；三是整理上述統計及量測數據並彙整文獻資料，選出一套利用都市生態系統中，減緩溫度的流體動態系統（即水和空氣）來減緩熱島效應的構想；四是依照減緩熱島效應的構想，製作出減緩模型，並進行模型實測；五是利用探針式溫度計來量測溫度與鋪面深度的關係。以下將本研究所得結論列舉如下：

一、氣象統計：

- (一) 透過台灣近年與歷年各月均溫的差異曲線（參見 **圖 5-2**）得知，台灣氣溫有明顯增高的現象，尤其以秋、冬兩季最為顯著。
- (二) 都市化程度將會增強熱島強度，其變化量不僅與都市使用面積開發量相符，且溫差高於 1°C 以上（參見 **圖 6-1、6-2**）。
- (三) 台灣與全球平均氣溫呈現一致的升溫趨勢，但暖化速度更甚於全球平均值（參見 **圖 6-2、6-3**）。
- (四) 天然鋪面能有效減緩熱島效應，尤其在 9 月過後更為顯著（參見 **圖 6-5**）。

二、現地量測：

- (一) 各式鋪面對熱島效應的貢獻度（參見 **圖 5-5**）：
 - 1、人工鋪面以『水泥、透水磚、柏油』（建材鋪面類）與『PU跑道、富麗克排球場』（合成鋪面類）最為顯著。
 - 2、『磁磚鋪面』因為表面光滑、顏色較淺，其熱島效應的貢獻度相對上述人工鋪面較不明顯；『空心磚』因含有部份植被及泥土故有相近的結果。
 - 3、天然鋪面以『草地』的溫差最低且穩定；『沙坑』雖在日照時溫差偏高，但因孔隙率較高，傍晚能降溫到與草地相當。
 - 4、本研究的『透水磚』因為鋪設地點位於校門口車輛進出頻繁處，基於耐用之考量，將基底層改以鋼筋水泥替代，此舉導致其貢獻度與柏油及水泥相當。
- (二) 氣象因子與熱島效應的相關性（參見 **圖 6-6、表 6-1**）：
 - 1、『氣溫』（ $r=0.844$ ）及『日照』強度（ $r=0.712$ ）與熱島效應呈現高度相關，顯示鋪面溫度隨氣溫及日照強度的上升而增加。
 - 2、大氣『濕度』（ $r=-0.725$ ）與熱島效應呈現高度負相關，顯示濕度增加對鋪面表面產生降溫之作用。
 - 3、『風速』因素在實驗場所中呈現正相關，卻在現地量測時呈現低度相關（ $r=0.148$ ），其原因在於現地量測時受限於周遭建築物分布，加上台灣冬季受季風影響氣流較不穩定，所以在此項因素的相關性並不顯著。

三、減緩熱島強度的模型構想：

根據我們的研究結果並搭配相關文獻，選出一套可能有效減緩熱島強度的模型構想，即利用都市生態系統中減緩溫度的流體動態系統（即水和空氣）來減緩熱島效應。「都市次系統」產生的增溫，可透過「滲水次系統」流通，以蒸發方式將熱量吸收，接著這些熱量及水氣可再傳輸至「植被次系統」當成植被成長所需的能量，其根部成長後，在「滲水次系統」中又可蘊含更多量的水源，如此良性循環將產生的熱能以流動方式讓三個次系統相互作用，有效舒緩熱島效應。

四、減緩熱島強度的模型實測：

將上述減緩熱島效應的構想製作成模型，並透過實際測量得知，在通風較佳的條件下（溫室氣體中的水氣不易聚集），含有植被及滲水次系統的模型（實驗組）較沙質鋪面的模型（對照組）具備減緩熱島強度的功能。

五、溫度與鋪面深度的關係：

（一）陽光直射處：植被鋪面模型的溫度與深度呈指數遞減（ $R^2=0.94$ ）；沙質鋪面模型的溫度與深度亦呈指數曲線遞減（ $R^2=0.94$ ），參見 圖 6-14。

（二）陰影通風處：植被鋪面模型的溫度與深度呈指數遞減（ $R^2=0.99$ ）；沙質鋪面模型的溫度與深度亦呈指數曲線遞減（ $R^2=0.98$ ），參見 圖 6-15。

綜合上述兩點，即便指數擬合的 R^2 均達 0.9 以上，卻與二次曲線的 R^2 極為接近，因此需要增加量測數據、量測時距、採用更精密儀器...等，方能進一步驗證其準確性。

六、未來發展與展望：

（一）量測時間：本研究為配合學校作息採用 0800~2100 的測量時間，但國內外相關研究文獻則指出熱島效應的影響在夜間比白天明顯（劉紹臣等，2003；林炯明，2010；Hjelmfelt，1982）建議以後可考慮利用暑假期間進行夜間量測。再者，季節的選擇也會影響熱島效應的強弱，相較而言冬天皆比夏天明顯（劉紹臣等，2003）卻有其它論文指出夏季應該會大於冬季（林憲德等，1999），因此未來可以延長監測時距，比較季節與熱島效應的關聯。

（二）量測地點：研究中所採用的現地，受限於面積大小及周遭環境之故，易受周遭環境彼此交互影響，未來可以在較大的基地面積進行量測，以降低交互影響之因素。

（三）量測方式：本研究只量測鋪面的表面溫度，但人大多數時間卻在室內活動，若能進行室內外同時監測，或許可以獲得更有意思的數據。

（四）模型製作：模型尺度過小，與真實空間分布有所差距而影響通風效果，導致減緩熱島強度的效益不夠明顯，因此未來可選擇「區域性空間」，如：公園、湖泊、溼地等較大尺度空間，甚至是利用衛星遙測技術進行量測，以避免量測誤差。

捌、 參考資料及其他

一、參考資料：

- (一) 林明瑞 (民99)。南一 高中物理 (下)。台北市：南一書局。
- (二) 褚德三 (民99)。龍騰 高中物理 (下)。台北市：龍騰文化。
- (三) 邱皓政，量化研究與統計分析-SPSS中文視窗版資料分析範例解析。2007。五南圖書，臺北，第13.4-13.7頁
- (四) 林憲德，李魁鵬，陳冠廷，林立人，郭曉青，陳子謙。1999。臺灣四大都會區都市熱島效應實測解析(1)--國內外都市熱島強度之比較。建築學報31: 51-73。
- (五) 林炯明。2010。都市熱島效應之影響及其環境意涵。林炯明。2010。環境與生態學報，第3卷第1期：第1-15頁。
- (六) 劉紹臣、劉振榮、林傳堯、許乾忠、林文澤。2003。台灣西部平原熱島效應，劉紹臣等，2003。看守台灣，第五期。
- (七) 徐震宇。2008。不同透水性鋪面材料對鋪面溫度影響之探討，碩士論文，國立中央大學土木工程系，中壢。
- (八) 張琪如、陳恩右。2005。都市綠地特性對其減緩都市熱島效應之成效研究(II)-台北市道路綠地與道路熱島效應關係之探討，行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告。計畫編號：NSC93-2415-H-034-006，中國文化大學景觀學系暨研究所。

玖、 附 錄

一、實地量測記錄表：

日期：		月	日	星期	天氣：(早)					(中)	(晚)	日落時間：				
	氣溫(日)	紫外線	溼度	風速	雲量	前 門				側 門						
						水泥	磁磚	環保磚	草地	柏油	空心磚	跑道	排球場	沙地		
0800																
0900																
1000																
1100																
1200																
1300																
1400																
1500																
1600																
1700																
1800																
1900																
2000																
2100																
	氣溫(日)	紫外線	溼度	風速	雲量	水泥	磁磚	環保磚	草地	柏油	空心磚	跑道	排球場	沙地		