



低衝擊開發 規劃與評估

林鎮洋／國立臺北科技大學土木系特聘教授

廖信凱／國立臺北科技大學土木系碩士

高強度的土地利用幾乎是近代世界文明的特徵，都市的擴張改變了土地原有的生態及水環境，入滲、截流與地下水補注等水文循環功能喪失，連帶使都市內水道失去天然河川自淨的功能，都市洪水及水污染問題，成為許多都會區揮之不去的夢魘，為了有效解決都市水患問題與環境永續共生，低衝擊開發技術是現代國家必須要走的一條路。

在臺灣大規模的新市鎮開發如火如荼的展開，其中桃園航空城將成為未來幾年最大的開發案，為避免重蹈覆轍，本文嘗試將分散型低衝擊開發設施導入航空城開發中，藉此彌補開發行為對環境造成之衝擊，同時應用SWMM模式探討基地開發前後地表逕流變化情形。

本文於開發後的基地內規劃雨花園、草溝、透水鋪面以及乾式滯洪池四項LID設施，利用SWMM模擬結果發現，在枯水年與豐水年的情況下，設置LID設施能降低27.4%與20%因開發產生的年總逕流量，而在2016/01/29之平日降雨與2016/06/02之極端降雨下，則能削減29.3%以及11.2%，同時關鍵的洪峰流量也有下降的趨勢，綜合上述模擬結果可確定LID設施能有效控制研究區域內的地表逕流，進而實現都市永續發展的目標。

前言

綜觀全球已開發國家，均有嚴重的都市化現象發生，而擁有八百萬人口的大臺北都會區也是典型案例。在都市蓬勃發展的背後，大規模的建物及道路不斷興建與鋪設，不透水面積逐年增加，使得原本像海綿一樣的大地瞬間變成水泥叢林（concrete jungle）不再透水，原有的水文狀態改變（Burian & Pomeroy^[1]），加上氣候變遷的影響，降雨型態日益極端（Pachauri^[2]；汪中和^[3]；柳中明^[4]），每逢豪大雨發生時，洪峰流量變大，集流時間縮短，既有的排水系統與設計標準已不堪負荷面臨相當嚴峻的考驗，逕流無從宣洩進而衍伸出都市淹水（Urban flood）問題（Chadwick *et al.*,^[5]；Misra,^[6]；Nagy *et al.*,^[7]）。另一方面，此種排水方式將使大量的污染物隨著逕流冲刷至下游承受水體，造成水體中的污染物濃度急劇上升，即為非點源污染（Nonpoint Source Pollution, NPS）（Lee & Bang^[8]；林鎮洋^[9]）。此外，建築物與不透水鋪面大量吸收熱量，再加上入滲與蒸發散減少的情況下，使都市熱島效應（Urban Heat Island）加劇（劉紹臣等人^[10]）。前述提及之

事件皆為人類開發過程中伴隨而來的環境衝擊，因此，需要更多減緩（mitigation）或調適（adaptation）的行動來因應，學習如何與環境共存共榮，建構一個以安全為基礎、生態為導向、永續為目標的城市是未來發展的方向與趨勢，因而，孕育出「低衝擊開發」的新思維。

低衝擊開發（Low Impact Development, LID）是一種以生態系統為基礎的都市暴雨逕流源頭管理技術，最早由美國馬里蘭州喬治王子縣的環境資源局與美國環境保護署於1990年所提出（U.S.EPA,^[11]），同時結合都市計畫、交通建設與建築管理等都市基礎建設，在有限的空間下以傳統水利工程為基礎搭配分散型現地削減設施，透過入滲、停留、蒸發、補注以及過濾等方法，減緩開發行為對都市水環境造成之衝擊（圖1）。常見的LID設施，如植生滯留槽（Bioretention cells）、草溝（Swales）、綠屋頂（Green roof）、草帶（Grass strip）、透水鋪面（Permeable pavements）、樹箱過濾器（Tree box filters）、雨撲滿（Rain barrel）、滲透溝（Infiltration trenches）等（徐年盛^[12]；內政部營建署^[13]）。

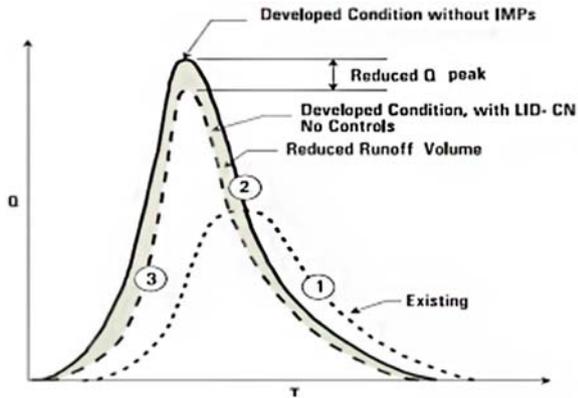


圖 1 LID 削減因開發行為所產生之逕流
資料來源：Prince George's County^[14]

由於 LID 具有環境教育、淨化水質、隔熱降溫、調節氣候以及景觀生態等功能（余嘯雷^[15]），對環境帶來諸多成效已經被廣泛應用在美國、加拿大、英國、瑞典、澳洲、日本、新加坡等國家（表 1）。而國內各單位借鏡國外經驗陸續提出相關因應措施與調適策略，如行政院環保署於 102 年編訂「降雨逕流非點源污染管理（BMPs）技術指引與技術手冊」，內政部建築研究所於 102 年完成「社區及建築基地減洪防洪規劃手冊」，此外，內政部營建署也於 104 年完成「水環境低衝擊開發設施操作手冊編製與案例評估研究計畫」；而在法規面向的部分，中央及地方政府均有適用之規範，例如《建築技術規則》、《建築基地保水設計技術規範》、《建築物雨水貯留利用設計技術規範》、《臺北市市有新建建築物設置雨水回收再利用實施要點》、《臺北市公共設施用地開發保水作業要點》、《新市公共透水保水規範》、《新北市都市計畫規定設置雨水貯留及涵養水分再利用相關設施申請作業規範》以及《高雄市綠建築自治條例》等，透過相關法規的訂定來提升我國都市地區之防洪管理效能與調適能力，進而達成韌性城市與永續發展的目標。

表 1 各國暴雨管理名稱

國家	中文名稱	英文名稱
臺灣	低衝擊開發	Low Impact Development
中國	海綿城市	Sponge City
美國	低衝擊開發	Low Impact Development
紐西蘭	低影響城市設計與發展	Low Impact Urban Design and Development
加拿大	暴雨源頭控制設計	Storm water Source Control Design
澳洲	水敏感城市設計	Water Sensitive Urban Design
英國	可持續性排水系統	Sustainable Urban Drainage System
新加坡	活躍，美麗，乾淨的水源	Active Beautiful Clean Waters

本文擬將低衝擊開發技術導入桃園航空城開發案中，並以 SWMM 模式作為分析工具，協助設計者預測區域內的水質水量情況，並評估 LID 設施對於暴雨逕流削減之成效，主要目的如下：

1. 於桃園航空城開發案中導入點、線、面三種型態之 LID 設施，並提出一套適用於基地之具體 LID 配置，以期降低因開發所產生之逕流問題。
2. 應用 SWMM 模式進行情境分析，評估不同降雨事件下，基地開發前後與設置 LID 設施，對於地表逕流量之削減成效，並探討個別設施的削減成效。
3. 應用 SWMM 模式分析基地逕流歷線與洪峰流量之變化情形。

研究方法與研究區域概述

研究區域

以桃園市蘆竹區南坎溪與坑子溪匯流處作為模擬之區域，其位於桃園航空城計畫區域範圍內，經現地勘察後依河系、地形等狀況選擇由長興路三段、南山路三段、油管路二段以及南坎溪與坑子溪所劃分出來的 85.67 公頃範圍作為本研究的對象（圖 2）。

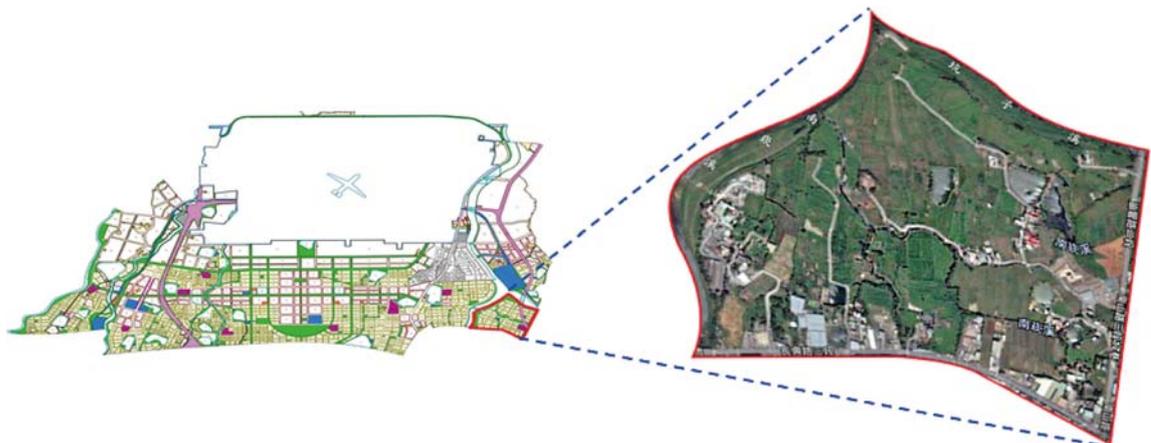


圖 2 研究區域地利位置 資料來源：Google 衛星影像

氣象水文

採用中央氣象局蘆竹測站作為代表，蘆竹地區年平均溫度為 22.6°C；六至九月溫度最高平均在 28.1°C；最低溫度為一月平均 15.6°C，在降雨量方面，年平均降雨量為 1,790 毫米，降雨最多集中在五月至九月，主要受梅雨鋒面、午後對流及颱風所帶來的雨量，而雨量最少的月份在十二月及一月。

水文資料，乃逕流相關研究最為重要之資訊，基地位於南崁溪與坑子溪匯流處，區域內有南崁溪支流以及農田水利排水系統。南崁溪位於桃園市境內，發源於坪頂台地的牛角坡，主流長度 30.73 公里，流域面積約為 214.67 平方公里，涵蓋龜山都市計畫區、桃園市都市計畫區、南崁都市計畫區以及航空城計畫區，常流量不大，根據水利署南崁溪橋流量測站，歷年平均日流量為 6.2 cms，最大流量則為 2001 年納莉颱風時的 614 cms，堤防保護標準係採用 50 年頻率洪水，其支流包括坑子溪、大坑溪、茄苳溪、東門溪、營盤溪、楓樹坑溪（圖 3）。

地理環境

研究基地所在位置地勢平緩，高度介於海拔 14 至 42 公尺之間，坡向由東南走向西北（圖 4）。其地層以現代沖積層及部分的桃園層為主，其下為大南灣層，土壤組成紅土、礫石、粉砂及頁岩等（圖 5）。地下水位約在地表下 2.5 ~ 4 公尺。而基地的排水速率及保水能力與地質土壤型態有關，根據行政院環境保護署設置於蘆竹區編號 H00003 監測井的監測資料得知研究區域內土壤飽和水力傳導係數（hydraulic conductivity）為每秒 4.82×10^{-4} 公尺。

土地利用

(1) 現況

根據內政部國土測繪中心 2013 最新土地使用調查成果，該區域之各土地利用整理於表 2，基地屬於尚未開發之區域，目前以農地佔地最大，面積約 54.24 公頃，佔總面積之 63.3%；其次為其他使用土地，面積為 11.28 公頃，佔全區面積 13.2%，包含未使用土地和草地；建築使用土地面積為 8.56 公頃，佔總面積之 10%（圖 6）。

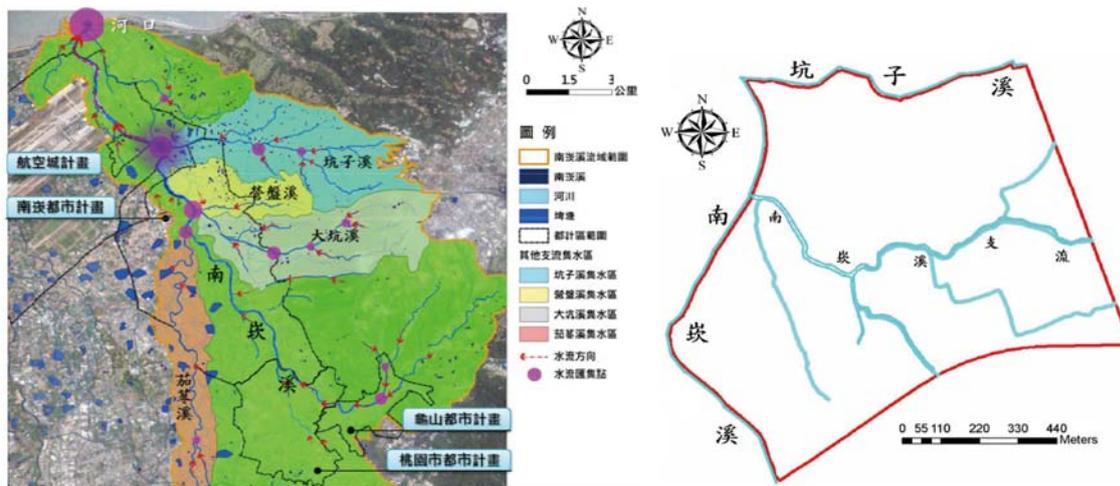


圖 3 研究區域與南崁溪流域圖

資料來源：陳婕雯等人^[16]

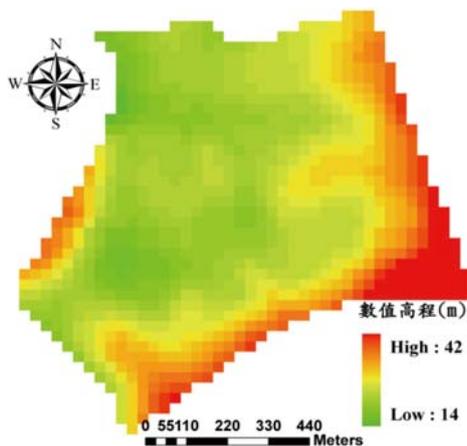


圖 4 研究區域數值高程



圖 5 研究區域岩心影像圖

資料來源：中央地質調查所（2006）

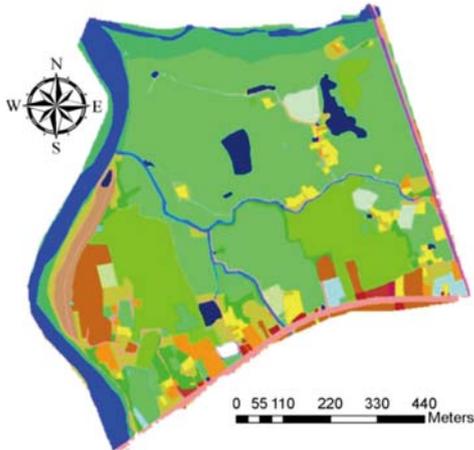


圖 6 研究區域土地利用圖

(2) 未來

根據內政部都委會審議通過之桃園航空城特定區計畫圖顯示，研究區域未來土地利用規劃情形以住宅用地為主，還包括學校、道路以及公園綠地等（圖 7）。根據表 2 統計，建築用地佔地最大，面積約 30.76 公頃，佔總面積的 35.91%，以第三種與第二種住宅區為主；交通用地則為 24.8 公頃，佔基地總面積的 28.97%，包括一般道路與高速公路，相較於開發前 8.55 公頃的建築用地與 4.1 公頃的交通用地，未來在航空城計畫的推動之下，本區將會大面積的開發並促使大量人口移入，將增加超過 3.8 倍的不透水面積，

排水系統與歷史災害

研究區域目前以農地為主屬於未建成區，因此，並未

設置雨水下水道系統，其排水主要仰賴農田水利系統與既有的水利設施，但隨著桃園的迅速發展，早期設置之農田灌排渠道的灌排功能不足以因應豪雨，因此，本文將參考營建署雨水下水道設計指南，以及桃園市現行雨水下水道系統五年重現期 71.7 mm/hr 設計標準進行規劃，並依照道路系統及地形走勢，自行劃定雨水下水道系統（圖 8），以利後續 SWMM 模式之模擬。另外，基地位於南崁溪與坑子溪匯流口，地勢低窪且區域排水不良，每逢豪雨，將面臨內水（internal water）無法外排以及河川外水（external water）入侵之窘境，而在未來大規模開發下，將規劃為住宅區，若未妥善處理，水患問題將一直存在，恐釀成更嚴重的淹水災情，故本文整理研究區域週遭近年來淹水事件於表 3，透過淹水事件回顧分析，瞭解易淹水之地區與待補強之處，作為未來開發時之參考依據。

表 2 研究區域開發前後土地利用分類整理表

代碼	開發前（現況）		開發後（未來）		類別
	面積（公頃）	面積百分比	面積（公頃）	面積百分比	
01	54.242	63.31%	-	-	農業
02	2.808	3.28%	-	-	森林
03	4.102	4.79%	24.82	28.97%	交通
04	3.489	4.07%	-	-	水利
05	8.557	9.98%	30.76	35.91%	建築
06	1.194	1.4%	2.88	3.36%	公共
07	-	-	27.21	31.76%	遊憩
09	11.278	13.17%	-	-	其他
總計	85.67	100%	85.67	100%	-



圖 7 未來土地利用規劃情形

資料來源：內政部營建署城鄉發展分署^[17]



圖 8 研究區域未來排水系統圖

表 3 研究區域周圍歷史淹水災害彙整表

時間	事件	淹水地區	災情描述
2001 年 9 月 17 日	納莉颱風	大園蘆竹、厚生社區	南崁溪水位暴漲，北堤潰堤，淹水及腰，橋樑損毀。
2012 年 6 月 11 日	611 水災	南崁、蘆竹、大園等地，多達百處淹水	西南氣流帶來豪雨，南崁溪水暴漲，多處淹水高過 60 公分，蘆竹南工路工廠與厚生社區 400 多戶民宅，遭受淹水之苦。
2013 年 8 月 28 日	康芮颱風	蘆竹區厚生路	康芮颱風降下豪大雨，造成許多地區淹水，蘆竹區厚生路積水超過 40 公分，現場一片汪洋。
2014 年 5 月 15 日	豪雨	桃園機場二航廈，蘆竹南崁地區	南崁溪水暴漲，蘆竹區台 4 線、機場二航廈積水約十公分。

研究方法

本文主要探討土地不當開發造成地表逕流增加之嚴重性，並以歐美先進國家推廣多年的低衝擊開發 (LID) 技術結合傳統的治水的觀念，透過綠色基礎設施 (green infrastructure) 規劃來降低都市發展及氣候變遷 (climate change) 下造成之環境破壞與衝擊。首先，利用 Arc GIS 處理相關圖層資料，然後再透過 BASINS 系統將圖層整合與子集水區之切割，最後匯入於 SWMM 模式，並輸入參數與氣象資料後，以便於 SWMM 模式中進行地表逕流模擬。為確認模擬數據之可靠性，本文將模擬值與實際觀測流量進行參數率定 (calibration) 與驗證 (verification)；接著在已劃定土地使用分區之基地中加入四項 LID 設施，再以 SWMM 模式進行情境分析 (scenario)，以瞭解不同土地利用與降雨事件下基地內地表逕流的變化情形，以及 LID 設施之設置是否有抑制地表逕流之功效？瞭解逕流歷線與洪峰流量之變化情況，同時分別探討各項設施的削減成效。

1. BASINS 模式之前置作業

BASINS 如同平臺般可將諸多資料進行整合，因此將先前於 ArcGIS 中處理完成之研究區域 2013 年土地利用圖、數值高程地形圖、河系圖及集水區邊界圖放入 BASINS 模式中 (表 4)，模式會依據河系與高程等資訊，計算出高程、坡度、透水與不透水比例等資訊，並利用集水區切割工具 (Watershed Delineation Tool) 進行子集水區劃分，其劃分塊數與精細程度可由使用者自行設定 (圖 9)。本文將基地切割為 11 個子集水區，最後透過 BASINS 輔助建置工具，將處理完成之圖層資料轉匯入 SWMM 模式，以進行 SWMM 模式之運行。

2. SWMM 模式建置

本文主要探討都市地表逕流的變化情況，需要適用於都市地區且具有下水道模擬功能之模式，另外 LID 為本文

表 4 模式輸入資料格式

格式	所需資料	限制格式	現有資料格式	資料來源		
GIS 圖層資料	河系圖	線圖層	Shp 檔	經濟部水利署		
	邊界圖	面圖層	Shp 檔		國土測繪中心 (2013)	
	土地利用		Shp 檔			
	數值高程圖		Raster 檔	中央研究院		
氣象資料	降雨量	日	日	2000 年至 2015 年		
	露點溫度				中央氣象局 (蘆竹站)	
	輻射					
	溫度					
風速	蒸發散潛勢	水文資料	-	日	2000 年至 2001 年	經濟部水利署
流量						

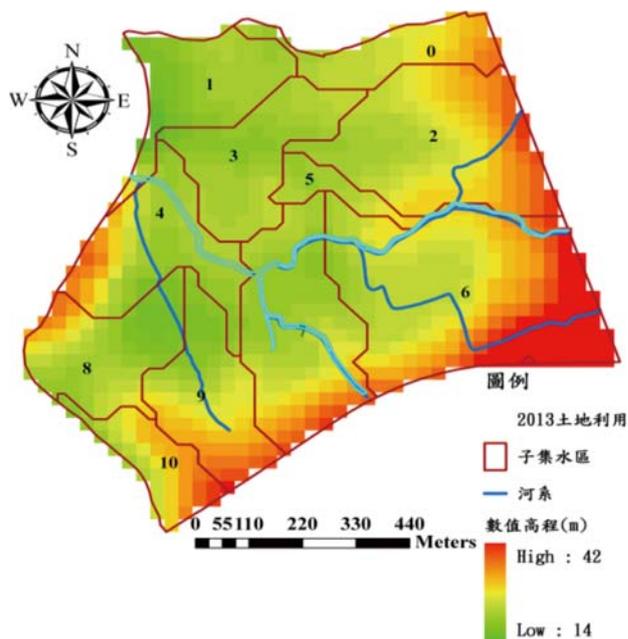


圖 9 研究區域子集水區切割成果

之核心，所以具有 LID 設施模擬功能之模式為優先考量，經功能分析及考量研究之需求，故選用 SWMM 模式作為模擬工具。

暴雨逕流管理模式 (Storm Water Management Model, SWMM) 為美國環保署所開發的一套動態降雨逕流模擬模式，可進行水文、水理和水質模擬，使用者可依單一或連續水文事件來模擬集水區內的逕流傳輸現象，模擬過程中考量降雨、地面水蒸發、自窪地蓄水之降雨截流、未飽和土壤層的降雨入滲、入滲水滲透至地下水層、地下水與排水系統間的中間流、地表漫流之非線性演算以及低衝擊開發措施於降雨逕流之攔阻與貯留等產生逕流的各種水文因素。模式概念分為五大區塊，分別為集水區區塊、氣候區塊、土地利用區塊、地下水區塊以及管線傳輸區塊，為了推廣與落實低衝擊開發之理念，美國環保署於 2010 年 7 月 30 日所推出的 SWMM 5.0.019 版本中加入植生滯留槽 (bioretention cell)、入滲溝 (infiltration trench)、多孔隙鋪面 (porous pavement)、雨撲滿 (rain barrel) 和草溝 (vegetative swale) 五項 LID 設施，更在 2015 年 8 月 5 日所推出的 SWMM 5.1.010 版再加入雨花園 (rain garden)、綠屋頂 (green roof) 及屋簷集水槽 (rooftop disconnection) 三項 LID 設施。另外，模式操作前必須清楚瞭解模式背後的理論基礎。

1. 地表逕流

$$Q = W \frac{1.49}{n} (d - d_p)^{5/3} S^{1/2} \quad (1)$$

式中， Q ：流量 (m³/s)

W ：逕流寬度 (m)

n ：曼寧粗糙係數

d ：窪蓄水深 (m)

d_p ：最大窪蓄水深 (m)

S ：坡度

2. Horton's equation

$$f_t = f_c + (f_0 - f_c)e^{-kt} \quad (2)$$

其中， f_t ：時間 t 內之平均入滲率

f_c ：平衡入滲率

f_0 ：初始入滲率

k ：入滲常數

3. Green-Ampt method

$$f_p = K_s + \frac{K_s M S_{av}}{F_p} \quad (3)$$

式中， f_p ：入滲率 (in./hr)

K_s ：飽和垂直水力傳導係數 (in./hr)

M ： $\theta_s - \theta_i$ 為飽和含水量和初始含水量之差值

S_{av} ：平均濕鋒張力水頭

F_p ：累積入滲量 (in.)

4. SCS Curve Number method

$$\frac{F}{S} = \frac{P_e}{P - I_a} \quad (4)$$

式中， F ：入滲總量

S ：集水區最大蓄水量

P_e ：有效降雨量

I_a ：初期降雨損失量

5. Two-zone Groundwater model

$$Q_{gw} = A_1(H_{gw} - 1)^{B_1} - A_2(H_{gw} - 1)^{B_2} + A_3H_{gw}H_{sw} \quad (5)$$

式中， Q_{gw} 為地下水流量 (cfs)

H_{gw} 為地下水層高程 (ft)

H_{sw} 為地表水高程 (ft)

A_1 為地下水流動係數

B_1 為地下水流動指數

A_2 為地表水流動係數

B_2 為地表水流動係數指數

A_3 為地表水與地下水作用係數

6. Saint Venant equation

$$\frac{\partial Q}{\partial X} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{V}{g} \frac{\partial V}{\partial X} + \frac{\partial Y}{\partial X} = S_0 - S_f \quad (7)$$

其中， Q ：流量

V ：斷面之平均流速

T ：時間座標

X ：沿流動方向之空間座標

Y ：水深

G ：重力加速度

S_0 ：渠底之縱向坡度

S_f ：能量坡度線

3. LID 設施配置

由於區域內入滲能力佳，故選用入滲型的 LID 設施。本文嘗試將雨花園、草溝、多孔隙透水瀝青混凝土鋪面以及乾式滯洪池四種 LID 設施，應用於已劃定土地使用分區的研究區域內，並將設施相互串聯 (圖 10)。雨花園部分：將區域內各塊建築基地中法定空地的 20% 透水面積作為雨花園，槽體總深度為 85 公分；為有效串聯點型與

面型之 LID 設施，另選擇線型的草溝作為聯接，於研究區域內路寬 15 公尺以下之道路單側設置草溝，設計深度為 30 公分，總施作長度達 6,031 公尺；為減少道路地表逕流之問題以及考量道路載重之因素，將區域內 24.8 公頃的交通道路用地由不透水的柏油路改為面層厚度 15 公分的多孔隙透水瀝青混凝土鋪面；除了設置分散型單元式的設施外，還將區域內所有公園綠地（不包括河濱綠地），作為大型的乾式滯洪池，面積共 7.76 公頃，深度為 1 公尺，乾式滯洪池係利用地表凹地或向下挖掘之土製結構，平時一樣為民眾使用的公園綠地，而當下雨時則可作為暫時蓄水之設施，可提供雨天暫時儲蓄水，以上 LID 設施之配置均參考水環境低衝擊開發設施操作手冊以及降雨逕流非點源污染最佳管理技術（BMPs）手冊。

4. 開發前後之比較

本文主要探討基地土地利用的改變，在不同降雨事件下地表逕流的變化情況，故本文利用模式 SWMM 模式針對研究區域進行開發前、開發後以及設置 LID 設施三種情境之模擬。情境一是利用研究區域現況僅有 16% 的不透水面積作為開發前的情境；情境二假設基地依照內政部都市計畫委員會公佈之都市計畫圖進行開發，且尚未加入 LID 設施，不透水面積高達 60% 之情況作為開發後之情境；情境三為基地開發後加入雨花園、草溝、多孔隙瀝青混凝土鋪面以及乾式滯洪池四種 LID 設施之狀態，並以四種截然不同的降雨事件作為模式輸入的資料，進而運用模式推估基地內地表逕流的變化情形。

為瞭解每一場降雨產生之地表逕流的實際變化情形，本文採用過去實測的降雨事件作為模式氣象資料的輸入。根據中央氣象局蘆竹測站近十年氣候統計資料發現桃園地區的枯水年與豐水年分別為 2009 年與 2012 年，故採用蘆竹測站 2009 年與 2012 年的氣象資料作為模式長時間連續模擬之用。此外，為進一步瞭解洪峰變化情況，另選擇兩場降雨作為單一事件之模擬（分別為 2016 年 1 月 29 日以及 2016 年 6 月 2 日的降雨事件），前者屬於中央氣象局定義之「中雨」，降雨從 1 月 29 日 5 時 50 分至 20 時 40 分，總雨量 26.5 毫米；後者即桃園機場淹水事件，降雨從 2016 年 6 月 2 日 9 時 10 分至 14 時 30 分，總雨量高達 167.5 毫米。

結果與討論

參數率定與驗證結果

由於研究區域內並無相關的流量監測資料能作為模式率定與驗證使用，因此，採用水利署於研究區域兩公里處的南崁溪橋流量測站所測得之流量作為觀測值，以該測站為基準往上游推算集水區範圍進行模擬，此作法參考（Chen^[18]），但該測站於 2002 年被撤除，故使用 2000 年與 2001 年之日流量資料作為率定（2000）與驗證（2001）使用，而率定與驗證則同時採用統計學中的決定係數（ R^2 ）以及平均絕對誤差百分比（MAPE）作為判定指標，詳細判定標準如表 5 所示。

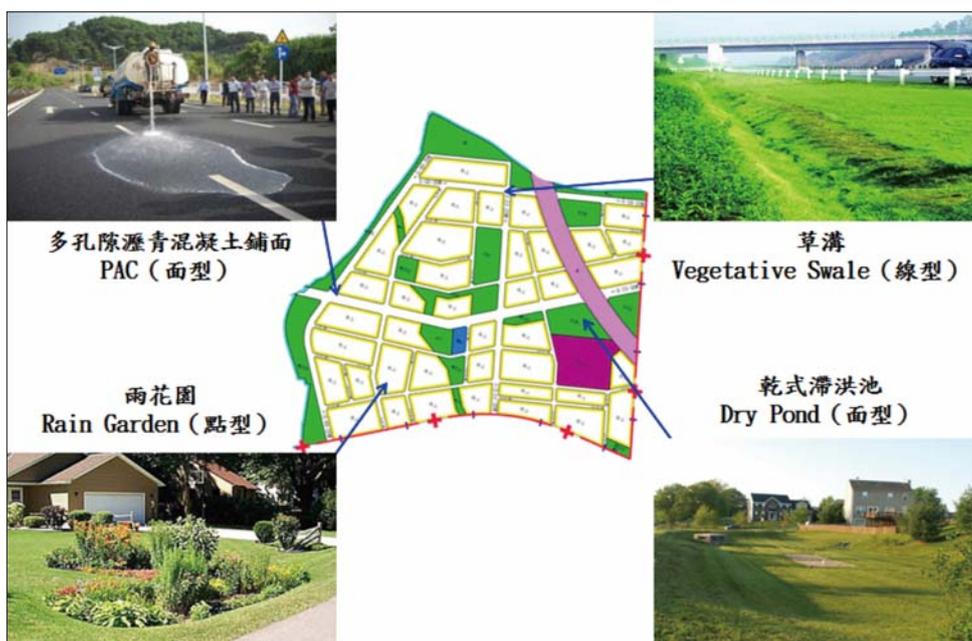


圖 10 研究區域 LID 設施配置圖

SWMM 模式水文參數率定時間為 2000 年，驗證時間為 2001 年，率定與驗證結果其中決定係數 R^2 分別為 0.73 與 0.84，兩者都在可接受值範圍內，而平均絕對誤差百分比 MAPE 分別為 39.9% 與 37.1%，亦在合理範圍內（圖 11 及圖 12）。

表 5 參數率定與驗證判定指標

參數	模式判定指標	範圍值	接受值	文獻
水文參數	決定係數 (R^2)	0 ~ 1	> 0.5	Wahyu ^[19]
水質參數	平均百分比 (MAPE)	-1 ~ 1	< 15% 高準確預測 10% ~ 20% 優良預測 20% ~ 50% 合理預測 > 50% 不準確預測	Lewis ^[20]

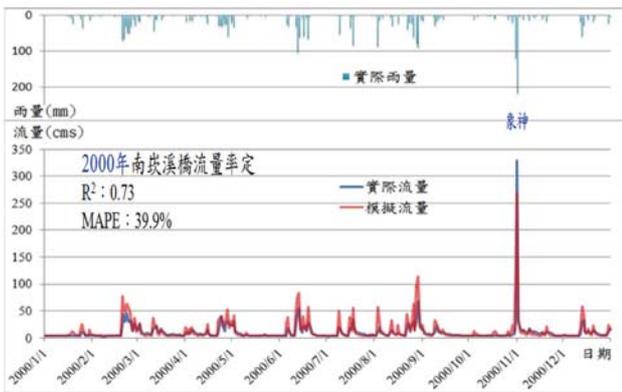


圖 11 2000 年流量率定圖

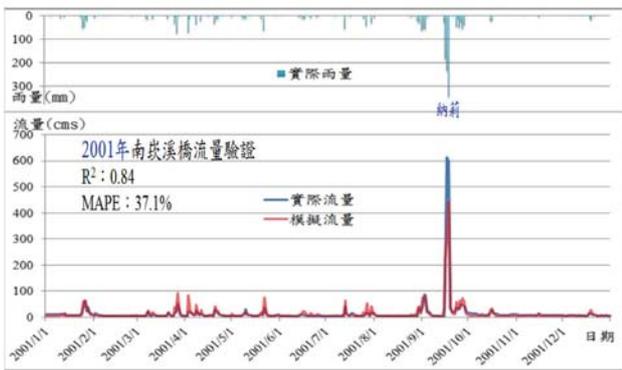


圖 12 2001 年流量驗證圖

總逕流量評估：長時間連續模擬

2009 枯水年模擬結果

根據 2009 枯水年雨量 1,068 毫米進行一年連續模擬，發現開發前基地內高達 63% 的農地入滲能力較佳，其年總逕流量為 457,275 立方公尺，開發後增加超過 3.8 倍的不透水面積，入滲能力變差，逕流量增加 45% (663,048 立方公尺)，但在加入 LID 設施後總逕流量相較於開發後減少 27.4% (481,373 立方公尺) (圖 13)。

2012 豐水年模擬結果

2012 豐水年雨量為 2009 年枯水年的 2.5 倍達 2,724 毫米，開發前年總逕流量為 1,166,832 立方公尺，開發後逕流量大幅增加 51% (1,761,916 立方公尺)，在加入 LID 設施後總逕流量相較於開發後減少 20% (1,409,533 立方公尺) (圖 14)。

由豐枯水年長時間連續模擬結果發現，LID 設施在 2009 枯水年時逕流削減率達 27.4% 較 2012 豐水年的 20% 為佳。為瞭解單場降雨的逕流歷線以及洪峰流量變化情形，另選擇兩場降雨事件進模擬，分別為 2016 年 1 月 29 日的平時降雨以及 2016 年 6 月 2 日的極端豪雨。

總逕流量評估：單一事件模擬

2016/01/29 降雨模擬結果

2016/01/29 降雨事件逕流模擬結果 (圖 15)，該場降雨總延時為 14 小時 50 分，累積雨量 26.5 毫米，屬於氣象局定義之中雨 (< 50 毫米 / 24 小時)，開發前總逕流量為 12,261 立方公尺，開發後逕流量增加 50.2% (18,404 立方公尺)，在加入 LID 設施後總逕流量相較於開發後減少 29.3% (13,011 立方公尺)，而開發前與未來開發加入 LID 設施後相比總逕流量增加 750 立方公尺。而洪峰流量的部分，加入 LID 設施後洪峰流量由開發後的 1.65 cms 降至 1.38 cms。

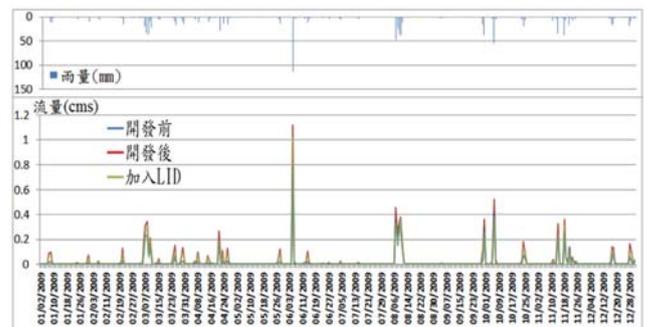


圖 13 2009 年枯水年地表逕流模擬結果

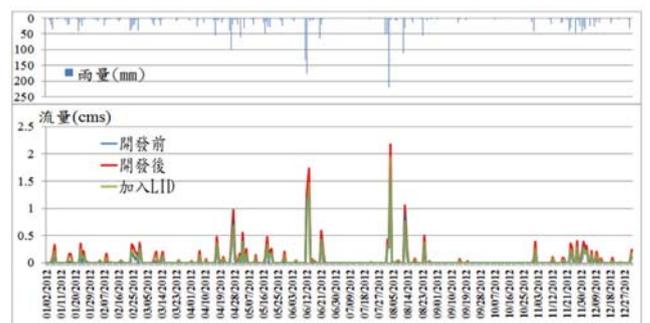


圖 14 2012 年豐水年地表逕流模擬結果

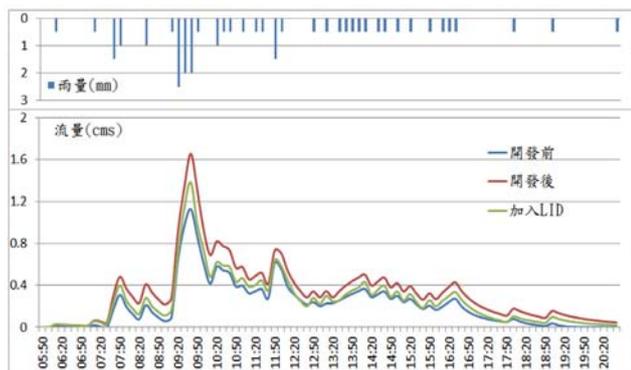


圖 15 2016/01/29 降雨事件地表逕流變化情況

2016/06/02 豪雨模擬結果

2016年6月2日降雨事件逕流模擬結果(圖16),該場降雨總延時為5小時20分,累積雨量167.5毫米,屬於中央氣象局定義之豪雨(>100毫米/3小時),經過模擬發現,開發前總逕流量為73,194立方公尺,開發後逕流量增加至111,036立方公尺,在加入LID設施後總逕流量相較於開發後減少11.2%(98,545立方公尺),而開發前與未來開發加入LID設施後相比總逕流量增加25,351立方公尺。而洪峰流量的部分,在第一個洪峰時,加入LID設施後洪峰流量由開發後的12.9 cms降至9.4 cms,有明顯的降幅,不過只持續約40分鐘,之後一直至本場降雨結束兩者間的流量差距並不大,甚至有重疊的現象,雖有效降低洪峰但保水成效有限。

LID 設施個別削減成效評估

接著針對2016/01/29以及2016/06/02兩場單一降雨事件進一步探討LID設施的個別成效。在2016/01/29降雨事件下,基地內設置LID設施能減少5,393立方公尺因開發產生的總逕流量,其中多孔隙透水瀝青混凝土鋪面削減3,268立方公尺為最多,佔總削減量的60.6%;其次為乾式滯洪池削減1,035立方公尺,佔總削減量的19.2%;再

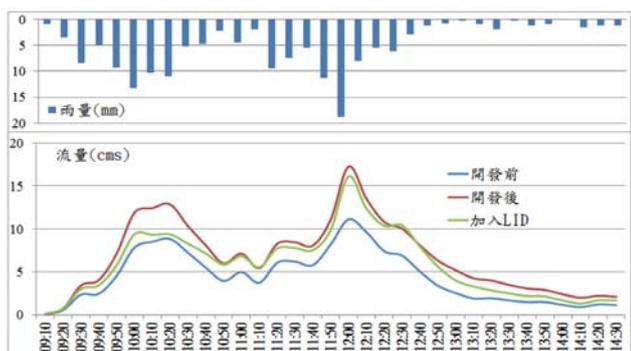


圖 16 2016/06/02 降雨事件地表逕流變化情況

者為雨花園削減884立方公尺,佔總削減量的16.4%;最後是草溝削減151立方公尺,佔總削減量的2.8%。

在2016/06/02降雨事件下,基地內設置LID設施能減少12,491立方公尺因開發產生的總逕流量,其中多孔隙透水瀝青混凝土鋪面削減6,246立方公尺為最多,佔總削減量的50%;其次為乾式滯洪池削減3,223立方公尺,佔總削減量的25.8%;再者為雨花園削減2,523立方公尺,佔總削減量的20.2%;最後是草溝削減475立方公尺,佔總削減量的3.8%,詳整理於表6。

表 6 個設施逕流削減百分比

	2016/01/29		2016/06/02	
	削減總量	削減率	削減總量	削減率
多孔隙透水瀝青	3,268 m ³	60.6%	6,246 m ³	50.0%
乾式滯洪池	1,035 m ³	19.2%	3,223 m ³	25.8%
雨花園	884 m ³	16.4%	2,523 m ³	20.2%
草溝	151 m ³	2.8%	475 m ³	3.8%

透過個別設施削減成效分析發現,LID設施設置面積與削減成效呈正向關係,當設施設置面積越大其削減成效也越大。設施削減成效與降雨強度也有密切關係,多孔隙透水瀝青鋪面在平均降雨強度1.7 mm/hr的2016/01/29降雨事件下,削減成效達60.6%,而在平均降雨強度31.6 mm/hr的2016/06/02降雨事件下,削減成效則降為50%;乾式滯洪池在2016/01/29的降雨事件下,削減成效為19.2%,而在2016/06/02降雨事件下削減成效則提高至25.8%,另外,雨花園與草溝兩項設施在兩場降雨下的削減成效變化不大,總而言之,在面對強降雨時多孔隙透水瀝青削減成效較差,而乾式滯洪池則較佳。

結論與建議

本文透過文獻分析與研究區域模擬,獲致以下結論:

1. 經由率定與驗證確定模式參數的合理性,能於未來桃園航空城開發之用,作為預測及應用LID之設計依據。
2. 在2009年枯水年的情況下,所配置之LID設施相較於開發後能削減27.4%的年總逕流量;而在2012年豐水年時,僅能削減20%的年總逕流量。
3. 在2016/01/29平常小雨的雨型下,所配置之LID設施相較於開發後能削減29.3%的地表逕流;而在2016/06/02極端豪雨的雨型下,僅能削減11.2%的地表逕流。
4. LID設施針對洪峰削減的部分,在2016/01/29的雨型

下，洪峰流量由開發後的 1.6 cms 降至 1.3 cms；而在 2016/06/02 的雨型下，第一個洪峰流量由 12.9 cms 大幅降至 9.4 cms。

5. 透過個別設施逕流削減率分析發現，在 2016/01/29 降雨事件下，四項 LID 設施共削減 5,393 立方公尺因開發產生的地表逕流，其中多孔隙透水瀝青削減量佔 60.6%、其次為乾式滯洪池的 19.2%、再者為雨花園的 16.4%，最後是草溝的 2.8%。另外，在 2016/06/02 降雨事件下，四項 LID 設施共削減 12,491 立方公尺因開發產生的地表逕流，其中多孔隙透水瀝青削減量佔 50%、其次為乾式滯洪池的 25.8%、再者為雨花園的 20.2%，最後是草溝的 3.8%。
6. 綜合上述之模擬結果，相較於開發後，有設置 LID 設施確實能有效抑制地表逕流，以及降低洪峰流量，但絕不是廣設 LID 就能解決都市洪患問題，由模擬結果可看出 LID 有一定成效，但應結合既有都市排水系統，發揮「一加一大於二」的功效。
7. 目前本文僅利用 SWMM 模式進行逕流推估，是否能完全反應實際狀況，希冀未來能安裝流量計、溫度計、入滲儀等自動監測系統，藉由這些感測器形成物連網，打下智慧城市 (smart city) 的基礎。
8. 研究結果初步證實開發後產生的地表逕流，可因 LID 設施獲得部分控制，未來若能針對 LID 設施進行最佳化配置 (optimization)，則對都市熱島效應、水污染以及綠美化等課題亦能有所裨益。

誌謝

本文的完成要感謝台灣世曦工程顧問公司提供「以近自然工法建置低衝擊開發社區之本土化設計參數及水環境效益評估技術」(計畫編號：03930)及「以低衝擊開發技術建構海綿城市之研究」(計畫編號：04928)研發經費，特此申謝。

參考文獻

1. Burian, S.J., and Pomeroy, C.A. (2010), "Urban Impacts on the Water Cycle and Potential Green Infrastructure Implications", *Urban Ecosystem Ecology*, 55, pp. 277-296.
2. Pachauri, R.(2007), " Climate Change 2007: Synthesis Report, IPCC Secretariat, 7 bis Avenue de la Paix C. P. 2300 Geneva 2 CH- 1211 Switzerland".
3. 汪中和 (2007),「氣候變化對台灣地下水環境的衝擊：回顧與

前瞻」, 經濟部中央地質調查所特刊, 第十八期, 第 243-259 頁。

4. 柳中明等 (2009),「臺灣氣候變遷趨勢、衝擊、脆弱度評估與調適措施之現況認知報告」, 國立臺灣大學全球變遷研究中心。
5. Chadwick, M.A., Thiele, J.E., Huryn, A.D., Benke, A.C. (2012), "Effects of urbanization on macroinvertebrates in tributaries of the St. Johns River, Florida, USA", *Urban Ecosystems*, 15 (2), pp. 347-365.
6. Misra, A.K. (2011), "Impact of urbanization on the hydrology of Ganga Basin (India)", *Water Resources Management*, 25 (2), pp. 705-719.
7. Nagy, R.C., Lockaby, B.G., Kalin, L., & Anderson, C. (2012), "Effects of urbanization on stream hydrology and water quality: the Florida Gulf Coast", *Hydrological Processes*, 26 (13), pp. 2019-2030.
8. Lee, J.H., and Bang, K.W. (2000), "Characterization of urban storm water runoff", *Water Research*, 34(6), pp. 1773-1780.
9. 林鎮洋 (2007),「以出流機率法評估濕式滯留池除污效率」, 中華水土保持學報, 第三十八卷, 第三期, 第 205-215 頁。
10. 劉紹臣、劉振榮、林傳堯、林文澤 (2003),「台灣西部平原熱島效應」, 看守台灣期刊, 第五卷, 第四期, 第 14-21 頁。
11. U.S.EPA. (2000) "Low Impact Development (LID) – A literature review", Office of Water, Washington, DC.
12. 徐年盛 (2014),「低衝擊開發綠色減洪新技術」, 營建資訊期刊, 第三百七十三期, 第 33-45 頁。
13. 內政部營建署 (2015), 水環境低衝擊開發設施操作手冊編製與案例評估計畫, 內政部營建署委託, 國立臺灣大學執行。
14. Prince George's County (1999), "Low-impact development design strategies: An integrated design approach", Department of Environmental Resources, Programs and Planning Division, Prince George's County, Maryland.
15. 余嘯雷 (2013),「低衝擊開發技術：來由與內涵」, 城市低衝擊開發防洪論壇講義資料, 國立台北科技大學水環境研究中心主辦。
16. 陳婕雯、柯佩吟、劉品賢、陳淑儀、鄧伊菱等 (2015),「氣候變遷下南崁溪下游強降雨調適以坑子口周邊地區為例」, 銘傳大學都市規劃與防災學系地區發展與規劃管理實務畢業專題發表。
17. 內政部營建署城鄉發展分署 (2014), 擬定桃園國際機場園區及附近地區特定區計畫書, 內政部擬定, 內政部營建署城鄉發展分署規劃。
18. Chen, C.F., Sheng, M.Y., Chang, C.L., Kang, S.F., & Lin, J.Y. (2014), "Application of the SUSTAIN Model to a Watershed-Scale Case for Water Quality Management", *Water*, 6 (12), pp. 3575-3589.
19. Wahyu, A., Kuntoro, A.A., and Takao Yamashita. (2010), "Annual and Seasonal Discharge Responses to Forest/Land Cover Changes and Climate Variations in Kapuas River Basin, Indonesia", *Journal of international development and cooperation*, 16(2), pp. 81-100.
20. Lewis, E.B. (1982), "Control of Body Segment differentiation in Drosophila by the Bithorax Gene Complex, Embryonic Development", pp. 269-288.
21. 台灣世曦 (2014), 以近自然工法建置低衝擊開發社區之本土化設計參數及水環境效益評估技術, 台灣世曦工程顧問股份有限公司委託, 國立臺北科技大學水環境研究中心執行。
22. 台灣世曦 (2015), 以低衝擊開發技術建構海綿城市之研究, 台灣世曦工程顧問股份有限公司委託, 國立臺北科技大學水環境研究中心執行。

