



道路工程與綠色建設

陳起鳳／中國文化大學土地資源系副教授

都市化發展以及氣候變遷的雙重壓力下，人類居住的都市環境品質需要有不不斷因應的調適作法，才能維持良好的居住品質，以及減少居住環境災害的發生風險。綠色建設，或稱為綠色基礎建設（Green Infrastructure）即在這種氛圍之下發展出來，其概念廣為世界各國接受。維持人類社會生活與經濟發展的建設，通稱為基礎建設（Infrastructure）。這些建設的設計與建造，不能一成不變，必須因應變遷的社會需求，以及變遷的自然環境條件，才能提供並維持其應有的服務功能，使社會運作順利。基礎建設改變外，整個城市的規劃與未來發展，更需有整體性的方向。一個活絡的城市是有機體，會隨城市內的經濟發展以及外在自然條件，隨之改變調整，如此才能創造韌性，並朝向永續發展的最終目標。

本文以水的挑戰為主題，在都市化下，城市不斷發展與建設，土地表面型態呈現動態變化，且不透水面積比例隨著發展不斷擴大，這導致城市內的水文循環改變，水的治理工法與基礎建設也必須調整。本文所討論的綠色建設，指與都市雨水管理有關的基礎建設。這些都市雨水的基礎建設主要管理對象為地表上的水（地表逕流），受到都市化的影響，地表逕流水質與水量的反應，與非都市化地區不同。其中，道路地表逕流是貢獻都市逕流的最大來源。因此本文探討道路工程除了提供其交通服務外，如何改造成為都市雨水管理的一種綠色建設。

綠色建設與海綿城市定義

綠色建設的定義各異。美國景觀設計師協會（ASLA）將自然是為基礎建設的一種（Nature is infrastructure）。因為大自然具有緩衝洪水、減少極端熱浪、改善空氣與水質等作用，這些提供的生態服務，即保護人類與地球環境健康的重要功能。若人類可以適當的運用大自然，將大自然當作人類社會的基礎建設系統，也就是綠色建設了。所以 ASLA 定義的綠色建設強調運用大自然的能力，在都市中創建自然系統。美國環保署（USEPA）對綠色建設的定義，則是認為是一種濕天氣，包含下雪與下雨的管理方法。以更成本有效並具有韌性的方法，來管理濕天氣的衝擊影響，並同時提供其他地方性的效益。因此，USEPA 對於綠色建設的定義，是在源頭處減少並處理雨水，且在處理的同時能帶來其他環境、社會、經濟上的效益。歐盟（EU）對於綠色建設又是另一種解釋。EU 認為，廣泛來說，綠色建設是一種策略性的計劃網絡，將高品質的自然環境與半自然環境整合一起，經過整體性的設計規劃，可以提供更多的生態系統服務，以及保護生物多樣性。所以 EU 的綠色建設是具

有空間規劃，連結都市與周圍非都市環境，將自然效益帶到人類社會，強化自然資源與服務功能。

ALSA 因為是景觀設計師協會，所以認為綠色建設是在都市區中創建自然，EU 則連結都市與郊區環境，企圖打造和諧，分不清都市與非都市的人類社會。USEPA 的定義則相對具焦，僅針對都市雨水（與下雪）問題，採用源頭管理、多重效益的方式來改變雨水基礎建設。本文僅討論都市雨水議題，因此所採用的綠色建設定義，比較類似 USEPA 的定義，以雨水處理為主要目標，暫不討論創造生態與維護生物多樣性的綠色建設。

討論雨水的綠色建設，不得不提海綿城市。兩者可區分為綠色建設指的是單一基礎建設，而海綿城市是整個城市的規劃，兩者共通點都是都市雨水管理，但兩者的規劃尺度不同。

「海綿城市」一詞首次正式並有完整說明者，為 2012 年 5 月 14 日「低碳生活部落格」文章（柳中明等人^[1]）。柳中明等人^[1]提出一個大膽而創新的構想，認為應改變城市為超級大海綿，成為實體的「海綿城市」。要創造海綿

城市，城市內的所有人工鋪面，需改變成七個必要條件如下：(1) 高承載：鋪面的抗壓強度必須達到高運量的道路標準。(2) 高透水：雨水直接穿透路面。(3) 高儲水：鋪面之下設置相當厚度的碎石層以儲存雨水，即是具備海綿功能。(4) 高透氣：讓生命存活於鋪面之下，同時允許地下水蒸發而出，達到降溫效果。(5) 增加生態面積：除了綠地生態面積外，還要增加鋪面下的地底生態面積。(6) 平價：無論是造價與長期維護，都必須是平價。(7) 永續：鋪面的各種特性必須每年檢驗確認不變。

根據上述柳中明等人^[1]對於海綿城市的構想，主要著重在於都市內人工鋪面的改變，也是道路工程要轉變為綠色建設的參考條件。一旦人工鋪面依照該海綿城市條件改變後，除了水的問題解決外，額外還能創造其他效益。如 Liu *et al.*^[2]的實驗發現，汽車排放的廢熱與空氣污染物質，至少會有 50% 進入到透水鋪面之下。同時，因為高承載高透水性鋪面下的形成地下濕地，也具有碳捕捉的功能。此多重效益且具成本有效性的想法，與 USEPA 的綠色建設定義相當相似。

都市雨水特性

都市地表逕流有幾個特性需被重新認識，才能達到有效管理。以下三個都市雨水的特性容易被忽略，而都市雨水管理是否有效，端看此三個特性有無確實被了解並被考量納入規劃。

都市雨水也是可用的水資源

下在都市區的雨水，一般對待方式就是快速排除，避免淹水。然而，這些雨水也是水資源，應友善利用。尤其氣候變遷下，極端事件發生頻率高，可用的水資源只會越來越拮据，不能僅靠水庫蓄水。應將都市區視為同水庫集水區般，落在都市區內的雨水也要做水質水量的保護，而不是只有排水一種選擇。此觀念若先改變，則在都市內的雨水基礎設施將會有不同的設計與規劃。也是目前全世界都市雨水管理新思維的共同理念：在源頭管理雨水，加強雨水入滲與儲存，模仿天然水文狀態，將雨水流在當地，不僅為人類所用，同時也創建生態系統。

都市水文循環隨都市化發展持續改變中

都市化發展在都市外觀上最明顯的變化就是綠色植物減少，建築物增多，馬路擴建。所以土地表面的不透水面積隨都市化發展不斷增加。因此，在都市內的水文循環隨著地表特性不同，減少入滲量、增加逕流量、流速增強、集

流時間縮短。而且這些水文特性不斷變動中。下圖 1 是典型的開發前後逕流流量變化。對整個水環境而言，都市化造成地下水補注減少，因此基流流量下降，這對整體環境與自然生態有負面衝擊。而地表上的逕流流速增快，也會造成尖峰發生時間提早，若強降雨發生就會有排水不及情況。特別強調在不同尺度的集水區下游處，會因為集水區上游的開發，不透水面積增加，則此動態變化持續存在，過去所建設的排水設施容量恐怕不足，所以造成下游影響（downstream effects），產生局部低漥地區淹水頻率增加。若要管理都市雨水，則須掌握此動態的逕流歷線變化。

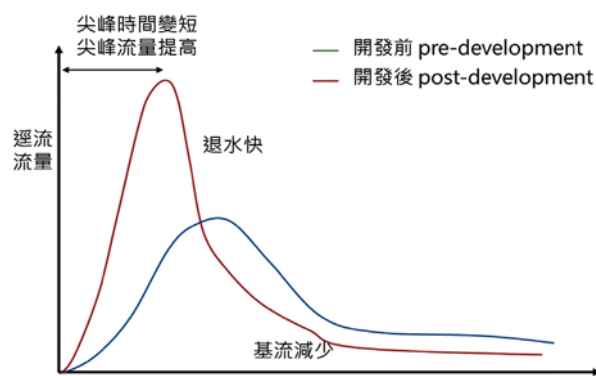


圖 1 開發前後逕流流量變化。特別強調在不同尺度的集水區下游處，會因為集水區內不透水面積增加，造成所謂下游影響（downstream effects），產生局部低漥地區的排水不及，淹水頻率增加。

都市地表逕流水質差，屬於非點源污染

都市地表逕流水質挾帶地面污染物質，屬於非點源污染，若不妥善處理則影響下游承受水體。一般都市逕流（urban runoff）的污染物包括沉積物、油脂、有毒化學物質、致病菌、農藥、營養鹽、重金屬等。常見的水污染項目幾乎都有。而這些污染物最主要來自道路逕流。根據 Wang *et al.*^[3] 實際採樣台北市與新北市道路逕流的結果，如表 1。懸浮固體物、氮磷營養鹽、有機物、油脂、重金屬，全部都存在道路逕流中，且濃度相當高。換句話說，這些道路逕流若不先行處理，直接排入淡水河，恐有污染水質之虞。

綠色道路

根據上述三個都市雨水特性，可知現在對待都市雨水的態度不能一味把它排出，若要因應自然變遷，應將都市雨水做妥善利用，與水共存，並將逕流水質處理列入考量。道路逕流除了將之排入排水溝進入雨水下水道系統外，應考量都市雨水特性而有所改良。因此很多國外道

表 1 臺北市道路逕流採樣濃度 (mg/L, ppm)

採樣道路代號	D		E	F	平均
	2012/04/05	2012/08/17	2012/12/18	2013/02/27	
SS	73.5	801.2	148.4	416.9	360
NH3-N	1.8	1.0	3.24	1.06	1.77
TP	0.15	0.26	0.65	0.35	0.35
COD	160	200	104	192	164
Oil and Grease	-	10.8	2.5	1.8	5.03
Cu	0.009	0.009	0.009	0.05	0.02
Zn	0.46	0.21	0.22	0.72	0.40
Pb	0.07	< 0.05	0.14	< 0.05	0.08
Cr	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02
Hg	< 0.0005	0.0007	< 0.0005	0.0007	0.001
As	0.0036	0.0006	< 0.0005	0.0005	0.001
Cd	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002	0.002
Ni	< 0.02	< 0.02	< 0.02	0.05	0.028

資料來源：Wang et al.,^[3]

路，將道路工程納入雨水處理功能，改良成為新的綠色基礎建設，稱為綠色道路。

道路交通計畫在很多綠色建設政策中扮演重要角色。將植物、透水材料設計進公路、街道、小巷、停車場等，是源頭處理都市雨水的重要做法，也可以幫助提高住家附近雨水容受能力，減少下游影響 (downstream effects) 程度。綠色道路的改造工作，可以在定期的鋪面重新鋪設工作中加入，不須重新找地再做，提升其工程接受度。由於道路工程最主要功能在於運輸與安全，綠色道路的設計也必須在此前提下進行整合，朝向多目標多效益進行設計。甚至採用再生材料、創建新生態廊道、減少熱島效應、協助節能減碳等，都可以放入綠色道路元素。典型的綠色道路示意圖如圖 2。

綠色道路案例

以下介紹幾個綠色道路案例：

美國波特蘭 Green Street Policy

美國波特蘭市在 2007 年為了將綠色道路推廣到公私部門，開啟綠街道政策 (Green Street Policy)。而這個大規模的政策，事實上是先來自一個 2003 年的小型計畫，也可稱為此綠街道政策的第一個計畫，為 Northeast Siskiyou Green Street Project。該計畫主要特色為將本土植物花園建造在道路兩側。這種作法後來也被視為示範計畫並推廣到全美國。此計畫使用了 590 平方英尺的街道鋪面，將道路邊緣石往道路方向延伸，擴大綠地空間。這種向道路內凹的延伸植栽方式，被暱稱為口袋草溝 (pocket swales)。這個系統收集了道路兩旁住家面積，總共有 9300 平方英尺的集水區面積，地表逕流會排入此系統。他們採用四種當地的植物在攔截道路逕流。實驗結果發現尖峰流量顯著降低，可有效防止淹水。且在 25 年一次的暴雨情境，有 85% 逕流體積受到控制。這個計畫是既有道路改造計畫，大約花了兩萬美金。該計畫示意圖與成果如圖 3。

美國明尼蘇達雙子城

在美國明尼蘇達的雙子城區域 (Twin Cities region)，在 2002 年共 17 個鄉鎮的大眾運輸系統共同簽署技術規範，要將綠色措施應用於大眾運輸系統中。而很多的計畫元素，就是要讓一般民眾、社區能感覺更有活力、同時也有更好的水資源管理方式。在這些區域內，至少下雨事件的前 0.5 英寸，被要求要在現地入滲，不能排出。有些則提高要求至 1 英寸。這些計畫的經費來源由民眾與政府共

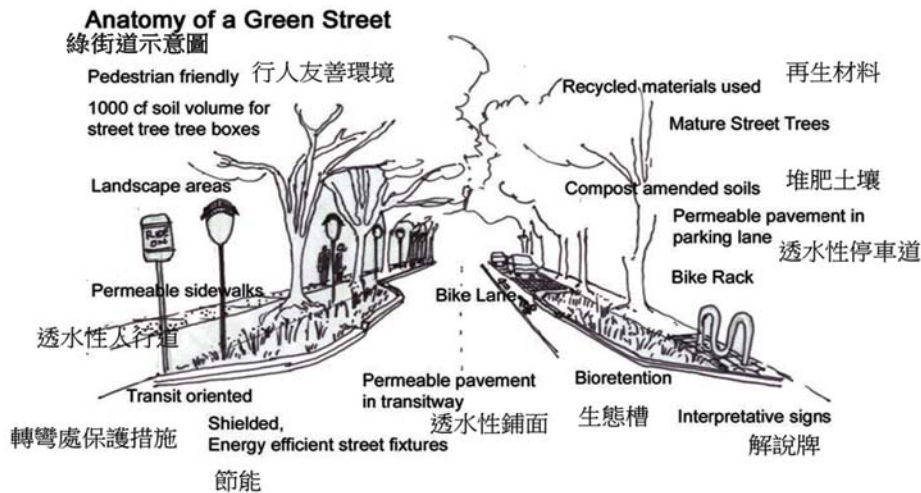


圖 2 典型綠色道路示意圖

資料來源：<http://www.lowimpactdevelopment.org/greenstreets/practices.htm>

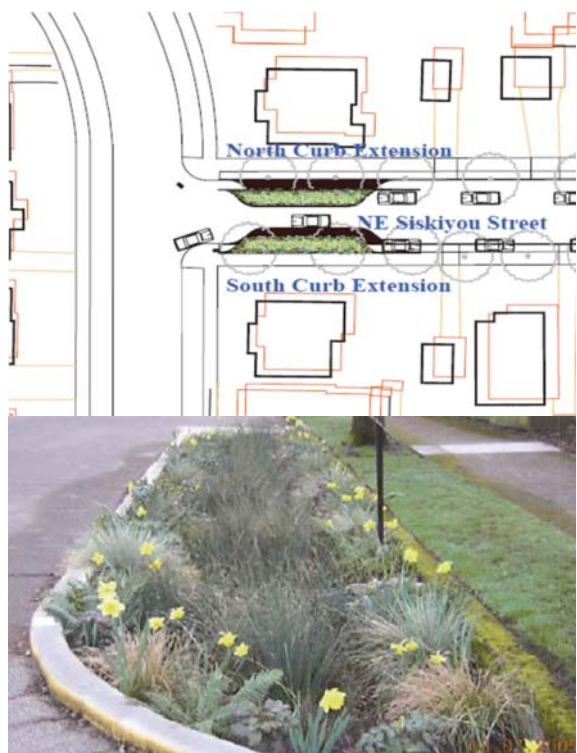


圖 3 美國波特蘭 Northeast Siskiyou 道路之綠街道計畫
圖片來源：美國波特蘭市政府 <https://www.portlandoregon.gov/bes/45386>

同負擔。例如其中 Maplewood 區，在 1996 年至 2004 年間在六條街道的重建中，建設了 350 個的雨水花園 (rain gardens)。這些經驗導致未來所有的街道重建計畫，都要把雨水花園納入街道中。而這些雨水花園的維護與建造則交給距離最近的住家來管，政府提供整地、改良的土壤、植物以及技術支援。民眾可以自己選擇他想管的那個雨水花園類型，不過必須從政府提供的 10 個標準雨水花園設計模型中選取，以保證這些雨水花園的功能性。

下圖 4 照片顯示其中一個計畫成果，該計畫在雙子城輕軌捷運系統之綠線 (green line) 沿線建設雨水處理設施，有照片顯示在輕軌旁的植生帶。另外也有旁邊人行道與車道道的其他設施，將該輕軌線打造成名符其實的綠線。下圖 5 則是雙子城之一的聖保羅市之活道路計畫 (St. Paul Living Streets Project)。命名為“活道路”(Living Streets) 主要是要用來形容一種新的道路類型，它比較窄、比較少鋪面。將原來既有的道路寬度減少，可以減少建設成本，也可以讓出更多的空間來種樹與設置雨水花園處理雨水。如果需要的話，也可以把自行車道與人行道加進去，以維護行人與騎腳踏車的安全。這跟原有道路指示設計給車用的理念不同，活道路是要設計給車、人與環境使用的。雨水花園與行道樹可以減少逕流中汙染物，較窄的街道面積以及行道樹的用意，在於減慢車行速度，創造更安全的交通環境。這計畫除了原先的雨水處理目的外，



圖 4 美國明尼蘇達雙子城將雨水處理設施與大眾運輸計畫結合設計。此為其中輕軌綠色支線 (green line) 的植生滯留槽設施照片，成為名副其實的綠線 (green line)。

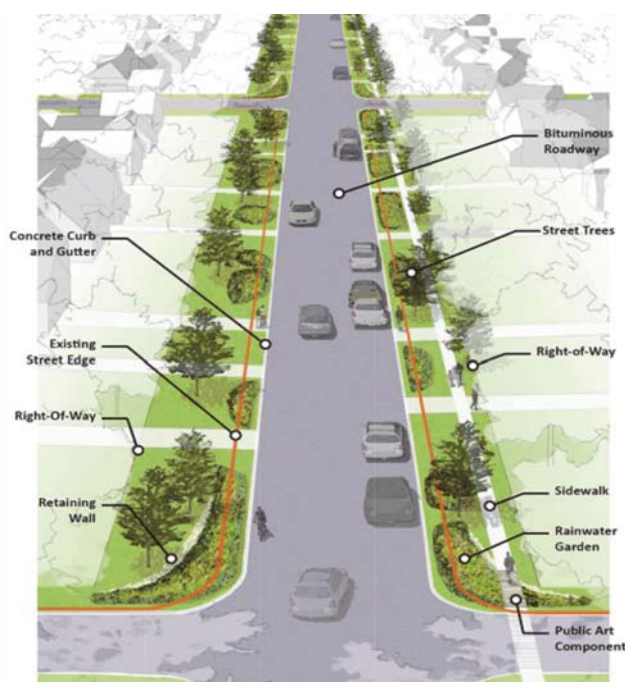


圖 5 聖保羅市之活道路計畫 (St. Paul Living Streets Project) 示意圖

(http://www.rwmwd.org/index.asp?SEC=FD1328AC-CEEF-455E-A806-BCEF42A2A1B6&Type=B_BASIC)

也會平衡所有人使用道路的安全性與便利性。因此計畫的必要元素包含：至少一邊的人行道、腳踏車道、清楚的標示、舒服與方便的休息點、雨水花園、樹木、植物。

中國深圳市光明新區

深圳市在 2004 年在中國率先引入低衝擊開發 (LID) 理念，企圖在城市發展轉型和南方獨特氣候條件下的創造城市規劃建設新模式。深圳市自 2004 年引入低衝擊開發理念，2007 ~ 2008 年編制《深圳市光明新區雨洪利用詳細規劃》，首次在城市區域開發中引入低衝擊開發理念，提出雨水綜合利用設施的規劃、設計、審查納入建設專案管理體系。2010 年深圳市政府批准《深圳市光明新區低衝擊開發雨水綜合利用示範區整體工作方案》，示範區創建工作正式啟動。



圖 6 深圳市光明新區低影響開發市政道路
(圖片來源: 深圳市城市規劃設計研究院)

深圳市光明新區在門戶區南片區 1.8 平方公里，為了將該片區打造成低衝擊開發設計示範區，所有 23 條市政道路均採用低衝擊開發技術進行設計。光明新區門戶區是光明新區近期重點開發的片區，廣深港客運專線光明火車站即位於該片區，該專線將於 2010 年底建成通車。光明新區目前已建成的示範專案主要有兩條市政道路、牛山科技公園等。部分專案已在建或已完成施工圖設計。

在《深圳市光明新區雨洪利用規劃指引》中對市政道路雨洪利用提出市政道路目標，開發建設後的綜合徑流係數 0.6。同時要求人行道應採用透水鋪裝地面。一般採用透水磚，草格等。路面雨水應引入兩邊綠地或隔離帶綠地入滲，道路兩邊綠地和隔離帶綠地宜低於路面 100 釐米，並合理設計路牙建適當的引水設施以便雨水能自流入綠地入滲。已完成的三十六號路與三十八號路，路面均採用透水瀝青，厚 12 公分，下面依次為礫石層與路基；綠化帶採用下凹式植生滯留槽，雨水口設於綠化帶內，雨水口高程高於綠地約 10 公分；路牙採用孔口道牙，下雨時，路面雨水經透水瀝青入滲，經下層礫石層儲存、彙集至道路一側的邊溝，再流入下凹式植生滯留槽入滲，超滲雨水經雨水口流至市政雨水管道。路面雨水流入下凹式植生滯留槽後，首先進入一沉砂池，雨水徑流中較大的顆粒物可沉澱去除，然後漫流至兩側的植生滯留槽入滲。

台灣台中道路

臺中生活圈二號線高架橋道路工程，是國內少數採用 LID 設施，減少道路開發逕流量的實際案例。臺中生活圈二號線環中路高架橋工程屬臺中生活圈道路之一環，橫跨臺中市及臺中縣潭子鄉。工程西起中清路東側，即自中彰快速公路（中清路地下道）終點起東沿臺中市八十米外環道，至臺中縣潭子鄉台 3 省道止。本道路原為寬 80 公尺、兩側各有人行道寬 4 公尺、車道寬 21 公尺、中央綠

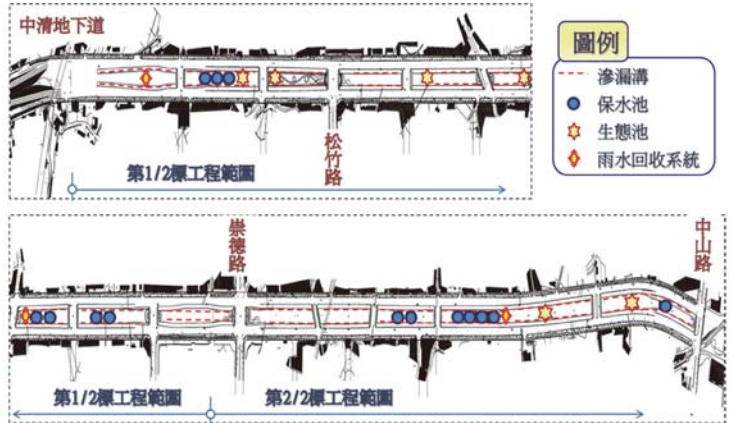


圖 7 臺中生活圈 2 號線環中路高架橋工程之 LID 設施位置圖
(資料來源: 林鎮洋等人^[4])

地 30 公尺之道路，為因應未來交通量需求，整建為兩側人行道（含綠帶）寬 8 公尺、側車道寬 15.2 公尺、中間高架段寬 33.6 公尺，橋下並設雙向平面道路。

臺中環中路高架橋全長共 4.7 公里，LID 設施計有入滲池 16 處、入滲溝 6170 公尺、雨水貯集系統 3 處及生態池 7 處，其相關設置位置如圖 7，相關設施尺寸如表 2。並將收集的雨水，經過濾後再利用於中央分隔島植栽噴灑用水。臺中環中路高架橋總工程經費約 60 億元，其中約 5,000 萬元經費用於施作 LID 設施。林鎮洋等人^[4]利用模式工具（Storm Water Management Model, SWMM）以及環保署公告的保水量計算公式，評估此綠色公路逕流削減效益。顯示設置 LID 設施後，年逕流削減可達 43.5 ~ 54.5%。全部 LID 設施可提供 5,365 立方公尺的保水體積，為環保署規定基準保水量（2,850 立方公尺）的 1.9 倍。

綠色建設與既有建設（灰色建設）之分工合作關係

傳統道路工程改良成綠色道路，成為綠色建設之一，分攤雨水管理的部分責任，並不代表既有的雨水排水基礎設施，或稱為既有的灰色建設，就被取代不再使用。在整個城市還無法完全像海綿一樣吸收雨水，降雨時還是須仰賴基礎建設。綠色建設的主要作用在於調適都市化過程時變動的逕流影響，處理那些變動狀態下的多餘逕流量，分攤灰色建設的排水能力。

下圖 9(A) 為降雨後產生的地表逕流歷線圖，傳統既有的排水系統，為排除逕流下半段的逕流量，處理大部分的逕流量。因為地表變動造成的尖峰流量變化，則可由綠色建設在源頭處理之，如圖 9(B)。兩者分工合作，分攤比例隨著都市化發展逐漸調整。若全部逕流仍仰賴排水系統，

表 2 臺中生活圈 2 號線環中路高架橋工程 LID 設施尺寸表

設施名稱	每單元	長 (公尺)	寬 (公尺)	深 (公尺)	直徑 (公尺)	面積 (公頃)	說明
入滲型設施	入滲池	35	18	0.35	-	0.063	16 處
	入滲溝	1	1	0.6	-	依現場 長度換算	6,170 公尺， 每間隔 5 公尺 1 處可 入滲
貯留型設施	生態池	40	24	0.35	-	0.096	7 處
	雨水貯集系統	8	-	-	1.1	0.002	1 處 24 座 提供 192 立方公尺 容量本工 程共 3 處

(資料來源:林鎮洋等人^[4])



圖 8 臺中生活圈 2 號線環中路 LID 設施完工後照片

這些硬體設施沒有彈性調整空間，若要在變動的都市化過程中保持最大排水能力，而以最大尖峰流量作為設計值，則如圖 9(C) 所示，在逕流體積上將有浪費（如圖 (C)）斜線面積，不符合成本效益。所以綠色建設搭配灰色建設，可減少既有排水系統負擔，同時減少工程成本。

結論

綠色道路保持原有道路交通功能，但創造更多其他的環境效益。綠色道路的施作建議結合既有道路重新鋪面的維護時機，在那時候改良設計，加入植物與排水等元素。或者在道路重新設計時，如臺北市建構自行車道，並擴大人行空間，在這些既有規劃的計畫中，可加入綠色道路元素，提高其排水能力與雨水容受能力。都市內道路若改為綠色道路，由於廣泛應用植物與透水材料，同時可達到減緩熱島效應的效果，創造更舒適的生活品質，構成宜居都市基本條件，甚至提高因應氣候變遷的調適能力，這些都是綠色道路直接或間接帶來的效益結果。

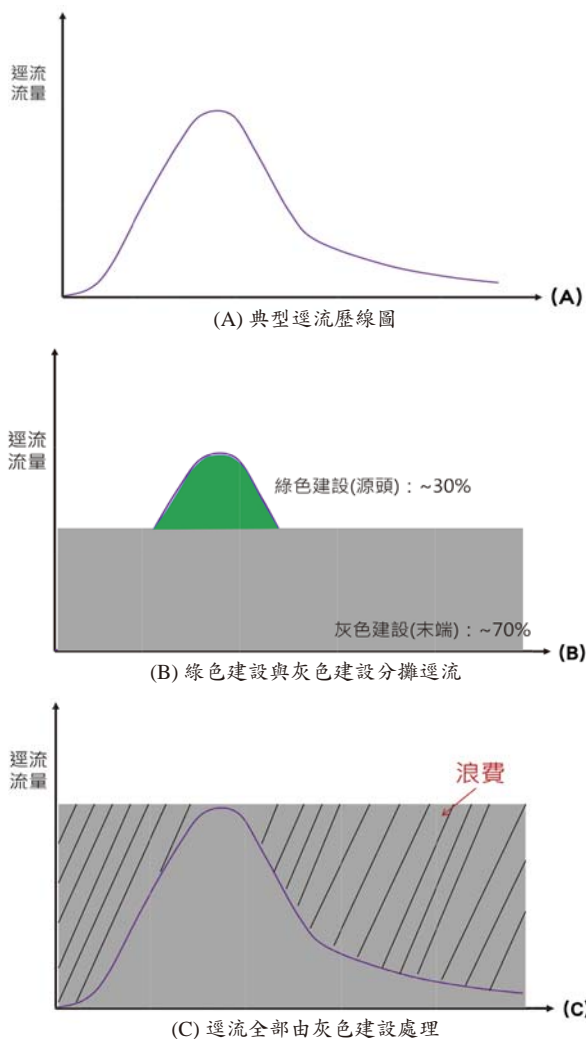


圖 9 綠色建設與灰色建設的分工合作關係

參考文獻

- 柳中明、陳瑞文、陳起鳳、劉銘龍、陳明烈、陳瑞成、蕭香娟、陳世勳、陳庭豪，「因應氣候變遷，創造海綿城市—由建設海綿社區、海綿工業區著手」，2012 年 5 月 14 日發表於「低碳生活部落格」，http://lowestc.blogspot.tw/2012/05/blog-post_8603.html (2012)。
- Liu, C. M., J.-W. Chen, J.-H. Tsai, W.-S. Lin, M.-T. Yen and T.-H. Chen, "Experimental studies of the dilution of vehicle exhaust pollutants by environment-protecting pervious pavement," *Journal of the Air & Waste Management Association*, 62(1), 92-102 (2012).
- Wang, Y. J., Chen, C. F., Lin, J. Y. "The Measurement of Dry Deposition and Surface Runoff to Quantify Urban Road Pollution in Taipei, Taiwan," *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 10, PP. 5130-5145 (2013).
- 林鎮洋、王佳偉、陳羿秋、陳正惠、陳起鳳「綠色公路逕流抑制設施功能評估」中國土木水利工程學刊，第 27 卷，第 2 期，第 105-111 頁 (2015)。
- 丁年、胡愛兵、任心欣，「深圳市低衝擊開發模式應用現狀及展望」，*給水排水*，第 38 卷，第 11 期 (2012)。
- 唐紹傑、翟豔雲、容義平，「深圳市光明新區門戶區—市政道路低衝擊開發設計實踐」，*建設科技*，第 13 期，第 47-56 頁 (2010)。