

嘉南藥理科技大學專題研究計畫成果報告

計畫編號：非點源污染最佳管制作業之優化模式分析

計畫名稱：CNEM9504

執行期間：94年1月1日至94年12月31日

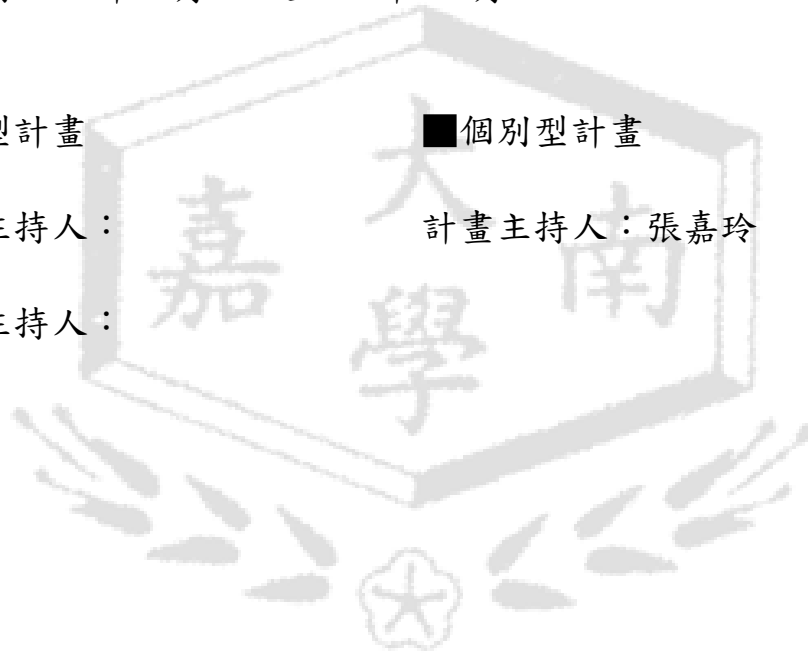
整合型計畫

個別型計畫

計畫總主持人：

計畫主持人：張嘉玲

子計畫主持人：



中華民國 96 年 02 月 02 日

摘要

雖然水污染防治對於點源污染的控制已有顯著的成效，但由於非點源污染的機制較為複雜、範圍較難掌控，且受到許多環境因子的影響，故大部分河川的非點源污染量比重均佔總污染量的一半以上；國內外許多研究報告亦顯示，非點源污染確實在集水區管理及河川水質扮演極重要的角色；因此，許多研究單位及政府單位均相當重視非點源污染的問題。最佳管制作業(Best Management Practices, BMPs)是普遍被用來控制流量及非點源污染量的策略或工法，BMPs 可分為結構型及非結構型，所涉及的層面不僅僅是水環境系統中污染處理的效果，經濟效益的考量亦為 BMPs 規劃時相當重要的一環。由於降雨特性為非點源污染擴散機制中最為重要的一項因子，因此，本研究將探討降雨特性與 BMPs 最佳設計及配置間的相關性，期望可以在符合環境法規限制的條件下，達成 BMPs 最佳化設計及配置的目標。由結果發現，在環境限制標準較嚴格的情況下，降雨空間變異性對 BMPs 最佳配置的影響較大，總降雨量相同的暴雨，當較大降雨量聚集於下游地區時，BMPs 要花費較多的經費方可達到環境限制標準。本研究主要所考慮的環境限制標準為 TSS 去除率，當環境限制標準擴充時，BMPs 在各種降雨空間分佈下之最佳配置，勢必也會隨之而有所變化。

關鍵字：降雨特性、空間分佈、非點源污染、BMPs

一、前言

水庫主要功能為蓄存水資源，以確保吾人平日用水之所需，台灣地區雨量雖充沛，但河川型態屬於水短流急，水資源之保存更為不易，故水庫水質水量之管理甚為重要。而水庫之主要污染源來自於集水區內之點源污染(Point Source Pollution) 及非點源污染(Non-point Source(NPS) Pollution)，其中點源污染的部分，由於現今法令之修訂及科技之進步，大部分已能有效控制，而非點源污染的部分，由於其分佈極廣，故污染物的質與量均不易掌握。國內外許多研究報告顯示，大部分河川之非點源污染量比重佔總污染量的一半以上，且證實非點源污染確實在集水區管理及河川水質問題上扮演極重要的角色(Pegram and Bath, 1995)，故目前探討非點源污染問題確實相當重要。

非點源污染最佳管制作業(Best Management Practices, BMPs)可用來控制集水區水質水量。BMPs 可分為結構型(Structural)及非結構型(Non-structural)。結構型 BMPs 包括滯洪池、溼地、草帶、草溝等等流量及污染量傳輸改變的控制系統；而非結構型 BMPs 則包括一些環境政策、軟性宣導等等(Wanielista and Yousef, 1993)。目的都是為了有效控制及減少洪水量及污染產出量，對下游居民及水庫水質可能帶來的衝擊及危害(Mostaghimi et al., 1997)。本研究考慮結構型 BMPs

中的滯洪池(Detention Pond)及草溝(Swale)，如何在一個集水區內，規劃滯洪池及草溝的數量及配置位置，將會影響到流量及非點源污染量控制的效果。BMPs 所考量的問題，並非單純的水環境系統，尚牽涉到經濟效益的問題，因此，在選擇 BMPs 工法、設計及配置時，必須在環境污染法規的限制條件下，尋求最具有經濟效益的方案，以期能達到水資源及集水區管理多目標規劃的準則，故 BMPs 配置可被視為一個優化分析問題來求解。

降雨特性包括降雨強度、降雨空間分佈、雨量組體圖型態等等，都會影響到下游流量及污染產出量，本研究以探討降雨空間變異性為主。對於降雨空間變異性不完整的了解，將會造成流量及非點源污染模擬相當大的誤差(Vicente, 1996)，即使降雨的變異性是小尺度的，流量模擬結果，再到非點源污染模擬結果，推估誤差的尺度可能會有累積且擴大的情形發生(Faures et al., 1995)。由於 BMPs 的設計及配置與流量及非點源污染量模擬結果息息相關；因此，在不同的降雨空間變異情形下，最佳的 BMPs 設計及配置勢必會有所差異。本研究主要目的則是探討在不同降雨特性下，所造成流量及非點源污染產出的不同，並將分析在以經濟效益為考量的目標及環境法規條件下，最佳 BMPs 的設計及配置受到降雨特性因子的影響情形。

二、研究方法

1. 降雨特性因子分析

由於台灣地區暴雨過後之流量及水質實際監測資料相當有限，往往會提高模式發展及模擬分析之困難度，為克服此問題，有許多學者乃採用人造設計數據(Synthetic data)代替實測資料(Hromadka, 1996a, b)。本研究主要探討降雨特性對流量及非點源污染的影響，進而改變最佳 BMPs 設計及配置的情形，因此，在集水區特性的設計上，原則上均設計為相同的狀況。本研究探討之降雨特性，以集水區內降雨之空間變異為主。圖 1 為虛擬案例區及各種降雨空間分佈下之暴雨示意圖。此虛擬案例區共劃分為 10 個子集水區，每個子集水區面積為 2km^2 ，支流長 2000m，集水區平均坡度為 5%，土地利用型態為森林，Curve number(CN)則給定為 70，SS 的平均污染載重量為 0.15kg/ha/day 。本研究設計三種空間分佈之暴雨，包括降雨集中在上游(子集水區 9)的暴雨事件(upstream rainfall)、降雨集中在下游出水口(子集水區 1)的暴雨事件(downstream rainfall)及均勻暴雨(uniform rainfall)，此三種暴雨型態在集水區內之平均降雨量相等，均為 4mm，降雨延時為 5 小時。

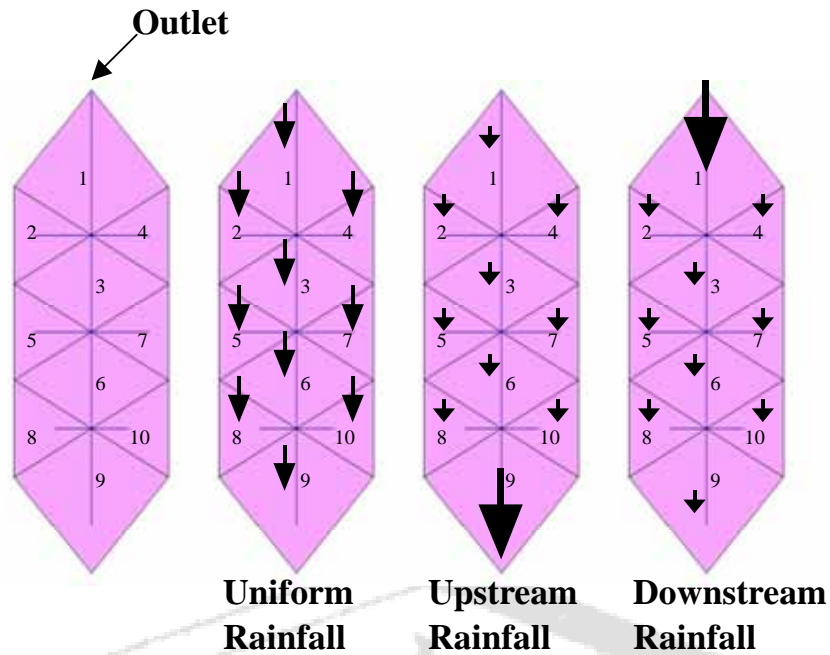


圖 1 虛擬案例區及設計暴雨之空間分佈示意圖

2. 非點源污染模式—WinVAST 模式

許多決策者，例如集水區管理及相關環保單位，均倚賴著模式模擬的結果進行策略規劃，雖然模式本身在整體集水區管理策略上，可能所耗費的經費只是一小部分，然而後續開發工程、管理法規等等成敗與否，卻往往受到模式模擬結果優劣的極大影響，故慎選模式及有效應用該模式實為重要(Lung, 2001)。因此，本研究首要工作，則是根據研究目標、所欲探討分析的議題，以及研究區特性等等，選用合適之非點源污染模式。一套完整的非點源污染模式，除了可以有效推估地表逕流量及非點源污染產出量之外，在集水區管理策略上，亦將扮演相當重要的角色。

本研究選擇 WinVAST 模式作為非點源污染模擬之主要工具。在 2003 年所發展出之 WinVAST 模式，為 VAST 模式之修定版本，經過修定後之 VAST 模式結合了 GIS 視窗介面，在處理空間資訊問題及描述集水區流網狀態，均有相當程度的突破；此外，較具親和力的使用者介面，將大幅提高此模式應用之便利性。WinVAST 模式延伸了原始 VAST 模式之基本演算理論，目前僅能用在單場暴雨事件。此模式將計算水文歷線及其非點源污染物歷線功能之數個子模組整合在一個介面底下，所包括之模組有：VASTQ 模式，用來模擬水文歷線；VASTNPS 模式用來模擬污染物歷線；另外 VAPOLL 模組，可以用來模擬 BMPs 操作下非點源污染控制之效率。吾人可將 WinVAST 模式分成流量模擬、水質模擬及最佳管制作業三個部分，分別介紹其演算理論及所需之參數資料(Tisdale et al., 1996; Yu et al., 2003)。

2.1 流量模擬

模擬水體在集水區地表流動、滯留及入滲等等現象時，所需資料包括：降雨資料及集水區資訊兩大部分。首先必須先定義集水區流域特性，WinVAST 模式(前身 VAST 模式)以二元樹延伸之樹狀結構的概念來描述整個流網狀態，可以將整個集水區之流域依地形及實際流向分成數個小的子流域，並劃分上下游流向關係，其子流域的數目可以依據使用者的需求而進行分割。由於各子流域之降雨特性、地表狀態及土地利用型態均會有所不同，本模式可分別針對各個子流域選擇不同之水文演算方式及輸入其相對之參數資料。同時，必須先決定所要模擬的總時間、計算時間區段，以及系統資料及模擬將使用之單位。在舊版 VAST 模組是模式中，VASTQ 為模擬流量之模組。

在各個子流域資訊輸入的部分，所包括之重要資訊有：基流量、子流域面積、斜率及河道長度、降雨及入滲情況、單位歷線資料、河道演算資料及該區域所採用之最佳管制作業等等。本模式提供了三種方式來作為降雨輸入，三種方式計算降雨損失，且有四種單位歷線法可以計算降雨及逕流關係；在河道演算的部分，利用馬斯金更法(Muskingun method)來進行演算。所選擇的演算法不同，相對應所需要之參數資料亦有所差異。

當該子流域並非最上游支流時，則必須考慮水由上游傳輸至下游過程中，地表逕流量之變化情形，也就是進行河道演算。WinVAST 是以馬斯金更法為河道演算的基礎，主要參數為權因子(Weight factor, X)及貯蓄常數(Routing constant, K)；其中 X 為無因次，代表槓形貯蓄量的多寡，亦即反應洪水波運行過程之水面線特性，其值一般應介於 0.0 ~ 0.5 間，而代表值約為 0.2；而 K 為時間的單位，其意義為水流於該河段之波傳時間(wave travel time)；此外，所給定之 K、X 及計算時間區段 Δt 必須滿足 $2KX < \Delta t < 2K(1-X)$ 。

2.2 水質模擬

雖然 WinVAST 模式已將流量、水質等模組均整合在同一個介面，然而基本演算理論並沒有改變。在舊版 VAST 模式中，VASTNPS 模組則是被應用在模擬非點源污染量，VASTNPS 又分為兩個模組，包括 VASTNPS1 及 VASTNPS2，VASTNPS1 可以模擬懸浮性固體物(Suspended Solids)、可沉降性固體物(Settable Solids)、生化需養量(BOD)、總氮(TN)、正磷酸鹽(Orthophosphate)及大腸菌類(Fecal Coliform)六種預設之污染物；而 VASTNPS2 可以模擬使用者所指定之六種污染物。在水質模擬的過程中，最重要的資訊則是非點源污染負荷。

WinVAST 中污染物模擬之演算理論與美國軍工團所開發之 STORM(Storage, Treatment, Overflow, Runoff Model)類似，由於非點源污染主要是在暴雨沖刷地表土壤後流入水庫水體，因此，暴雨前累積在地表的污染量，為推估污染產出量相當重要的資訊，暴雨前地表污染累積量之公式如式(1)所示。

$$P(p,l) = AREA(l) * LR(p,l) * DD + P0(p,l) \quad (1)$$

其中 $P(p,l)$ 為暴雨前污染物 p 在土地利用型態 l 之累積重量； $AREA(l)$ 為土地利用型態 l 之面積； $LR(p,l)$ 為污染物 p 在土地利用型態 l ，每單位面積單位時間內之污染負荷量； DD 為自從上次暴雨後之乾燥日數；而 $P0(p,l)$ 為污染物 p 在土地利用型態 l ，自上次暴雨後所殘留下污染物之重量。

而在某場暴雨事件中，地表污染物之沖刷量可由式(2)推估而得，在 WinVAST 模式中，可以預測污染物在高達十種以上不同土地利用型態之沖刷情形。

$$M(p,l) = A(p) * P(p,l) * (1.0 - \exp[-k(p) * R]) + FSUS(p) * M(sus) + FSET(p) * M(set) \quad (2)$$

其中 $M(p,l)$ 為每單位時間內從土地利用型態 l 上污染物 p 之沖刷率； $A(p)$ 為污染物 p 在地表上有效沖刷之比率； $P(p,l)$ 為式(1)所推求出之暴雨前乾燥日內之累積污染量； $k(p)$ 為污染物 p 之沖刷衰退係數； R 為地表逕流率； $FSUS(p)$ 為污染物 p 在懸浮固體中之比率； $M(sus)$ 為懸浮固體物在單位時間內之沖刷重量；而 $FSET(p)$ 為污染物 p 在可沉降性固體中之比率； $M(set)$ 為可沉降性固體在單位時間內之沖刷重量。由於 VASTNPS2 可模擬使用者所選擇的污染物，該等污染物可能與懸浮固體物或可沉降性固體物不相關，在此情況下，則可忽略其影響性，且對式(2)進行小幅修定。值得注意的是，無論所選用的系統為英制或公制，沖刷衰退係數 k 均為英制的單位。此外，WinVAST 模式採用 STORM 模式相同的演算公式如式(3)及式(4)來推算懸浮固體物在地表有效之沖刷比率 $A(sus)$ 及可沉降性固體物在地表有效之沖刷比率 $A(set)$ ，而其他污染物在地表之沖刷比率則被預設為 1.0。

$$A(sus) = 0.057 + 1.4R^{1.1} \quad (3)$$

$$A(set) = 0.028 + 1.0R^{1.8} \quad (4)$$

2.3 非點源污染最佳管制作業分析

除了 VASTQ 及 VASTNPS 模組之外，VAST 模式尚有一個很重要的 VAPOLL 模組。在 VASTNPS 模擬出污染物之累積及沖刷量之後，可以 VAPOLL 模組來評估在 BMPs 控制下，污染物之去除效率以及推求污染歷線圖，可用來評估滯留池或草溝適用性及其管制效果，以作為 BMPs 配置之參考依據。在新版 WinVAST 模式中，此模組亦被整合在單一的 windows 介面下。

非點源污染最佳管制策略主要用來控制流量及減輕污染物對水庫水體的直接衝擊。WinVAST 模式提供兩種最佳管制作業之污染控制效益模擬，包括：滯留池(detention pond)及草溝(grassed swale)。當選擇滯留池作為最佳管制作業時，可經由三種方式輸入滯留池之資訊，分別為：Volume-Flow Points、Volume-Flow Equation 及 Weir-Pipe Equation。Volume-Flow Points 方法是以線性補遺的方式推求在最佳管制作業下之地表逕流；而 Volume-Flow Equation 方法及 Weir-Pipe Equation 法則是分別以方程式(5)及方程式(6)推求之。

$$Outflow = A * (vol * B) \quad (5)$$

$$Outflow = C * Y * (H ^ x) \quad (6)$$

其中 vol 為滯留池體積；H 為水高過壩頂之高度或水超過管中心線之高度；Y 為壩頂長度或管截面積；而 A、B、C 及 x 則為校正係數。當選擇草溝作為最佳管制作業時，所需資料則包括：草溝長度、縱向斜率、曼寧粗糙係數(the Manning's roughness coefficient)、入滲率及測向斜坡斜率等等。本模式可同時模擬最佳管制作業前後之地表逕流量及非點源污染產出量，因此可以進一步探討集水區內 BMPs 經濟有效之設計及配置。

3. 最佳 BMPs 設計及配置優化問題分析

本研究採用 Scatter search 作為優化之工具，相對於普遍被應用的遺傳演算法，Scatter search 並非著重於隨機的演化過程，而是較有系統地整合優化程序中的元素，以建立新的解答，並強調整個過程中演化的軌跡(Glover, 1977; Glover, 1998; Campos et al., 1999)，因此，在較為複雜系統，Scatter search 具有有效率較高之優勢(Glover, 1999)。BMPs 最佳化配置的主要目標函數及限制式如下：

$$\text{目標函數: } \text{Min} \sum_{i=1}^n \text{cost}(BMP_i) \quad (7)$$

$$\text{cost}(BMP_i) = \alpha \text{cost}(dp_i) + \beta \text{cost}(sw_i) \quad (8)$$

$$\text{限制式: } L_k \leq L_{\max k} \quad (9)$$

$$BMP_i \in \text{可行的範圍} \quad (10)$$

其中由於本虛擬案例共劃分為 10 個子集水區，故 n=10。而 α 和 β 為二元變數，當集水區內設有滯洪池時， α 為 1，反之 α 為 0；相同地，當集水區內設有草溝時， β 為 1，反之 β 為 0。 $\text{cost}(dp_i)$ 是在子集水區 i 內所設置滯洪池的總工

程經費， $cost(sw_i)$ 是在子集水區 i 內所設置草溝的總工程經費， $cost(BMP_i)$ 則為子集水區 i 內所設置之結構型 BMPs 的總經費。優選的主要目的是降低 BMPs 所需之支出，但仍必須滿足水質標準的， L_k 為水質項目 k 之水質濃度，而 L_{maxk} 為該水質項目之最低水質標準，也就是在經濟有效之控制作業下，所能忍受之最大污染情況(Yu et al., 2003)。本研究以 TSS 的去除率作為目標函數之限制式，分別探討 TSS 去除率在 50%、60%、70%、80% 及 90% 時之 BMPs 最佳配置情形。另一個限制條件，則是要求 BMPs 的設計必須在合理的範圍之內。

三、結果與討論

本研究僅考慮滯洪池及草溝的配置情形，也就是固定此兩種結構型 BMPs 的設計，由於設計規格相同，當集水區所配置的滯洪池及草溝數量固定時，BMPs 總經費則固定。然而，在不同的 BMPs 配置情形下，會影響到下游出水口位置水量及水質的輸出結果，因此，盡可能在環境限制標準下，降低 BMPs 的總經費，尋求 BMPs 最適之配置，為水資源及集水區管理政策規劃上，相當重要的議題之一。許多研究均已證實降雨空間變異確實對流量及非點源污染均相當大的影響，因此，BMPs 最佳配置也隨之受到影響。由表 1 所示的結果，可知在 TSS 去除率要求較低的情況下，例如：所要求之 TSS 去除率為 50%、60% 及 70% 時，有時往往僅需設置一個滯洪池或草溝，即可以達成 TSS 去除率的要求，因此，在不同的降雨空間分佈情況下，BMPs 最佳化配置的差異並不顯著。然而，當 TSS 去除率要求較高的情況下，例如：所要求之 TSS 去除率為 80% 及 90% 時，降雨空間分佈的差異對於 BMPs 最佳化配置及 BMPs 總經費的影響則相當大。由結果可知，當降雨集中在下游時，往往較降雨均勻或集中在上游的情況，需要花費更多的 BMPs 工程經費，方能達到所要求的 TSS 去除率，如圖 2 所示。

由圖 2 之結果可知，當環境條件提高時，如 TSS 削減效果提升至 80%，甚至更高時，則必須花費較多之 BMPs 經費，方能符合環境限制之條件，因此，吾人在進行 BMPs 最佳配置及設計時，必須進行完整之規劃，以達到既符合環境法規條件，且同時具有經濟效益之雙重目標。以本研究所設計之下游集中暴雨事件為例，當環境條件限制較小，如 TSS 削減效果在 70% 以內時，BMPs 配置成本均小於 600,000 元，但當 TSS 去除效率要求達 90% 時，BMPs 設置成本則高達約 115,0000 元之多，此成本提高的幅度相當大，集水區管理單位及相關規劃人員，實應檢討環境限制條件的必要性，方可避免不必要的 BMPs 設置成本的浪費。

表 1 在不同降雨空間分佈的情況下之 BMPs 最佳配置情形

限制 條件	均勻降雨事件			上游集中暴雨事件			下游集中暴雨事件		
	R	Min_c	R_m BMPs 配置	Min_c	R_m BMPs 配置	BMPs 配置	Min_c	R_m BMPs 配置	BMPs 配置
0.5	552701	0.76	1 0 0 0 0 0 0 0 0 0	552701	0.76	1 0 0 0 0 0 0 0 0 0	563355	0.76	1 0 0 0 0 0 0 0 0 2
0.6	552701	0.76	1 0 0 0 0 0 0 0 0 0	563355	0.76	1 2 0 0 0 0 0 0 0 0	574010	0.61	0 0 3 0 0 0 0 0 0 2
0.7	552701	0.76	1 0 0 0 0 0 0 0 0 0	563355	0.76	1 0 0 2 0 0 0 0 0 0	552701	0.76	1 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0.8	605974	0.90	3 0 0 0 0 2 2 0 2 2	584664	0.90	3 2 0 0 0 0 0 0 0 2	627283	0.81	1 2 2 2 0 2 2 0 2 2
0.9	616628	0.90	3 0 2 0 3 0 0 2 2 2	584664	0.90	3 0 2 0 0 0 2 0 0 0	1148020	0.90	1 2 1 2 0 2 0 0 0 2

註: Min_C: BMPs 總經費(單位: \$)

R_m: 在花費最少 BMPs 經費下之 TSS 去除率 ($R_m > R$)

R: TSS 去除率(環境限制標準)

BMPs 配置 → 0: 未設有滯洪池及草溝; 1: 僅設有滯洪池;

2: 僅設有草溝; 3: 同時設有滯洪池及草溝

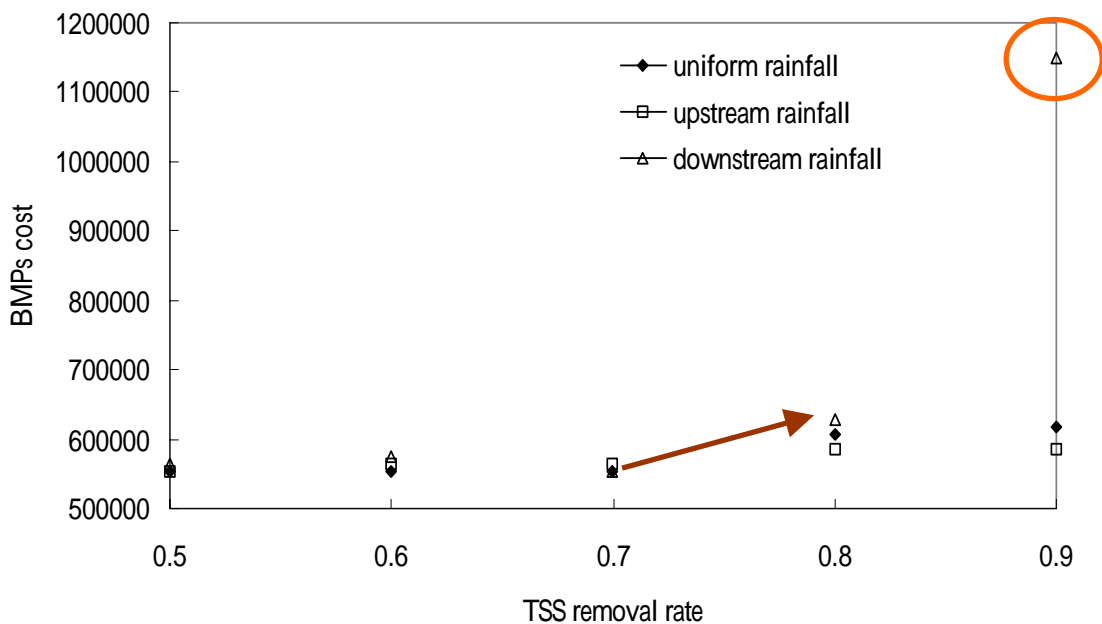


圖 2 BMPs 設置成本與環境限制條件之關係

由結果亦可得知，在多數情況下，將 BMPs 設置在下游地區，可以較為有效地降低 TSS 產出量。因此，為有效提高 TSS 去除率及降低 BMPs 總經費，多數 BMPs 最佳配置的結果，在最下游子集水區(子集水區 1)均規劃同時設有滯洪池及草溝；在 TSS 去除率要求較低的情況，也多半會規劃在下游設有一個滯洪池。由表 2 可知，當滯洪池設置在上游或下游子集水區內，對於 TSS 去除效果雖有差異，但差異並非相當顯著；相反地，對於洪峰流量的消減作用則有顯著的不同。在本研究中，並未要求於洪峰流量消減程度，因此，當吾人將此限制條件加入優化問題時，所優化出的 BMPs 最佳配置將有所差異。此外，值得注意的是，固然滯洪池對於 TSS 的去除效果及對洪峰流量消減的功效，均較草溝來得好；然而，在一般情況下，滯洪池的工程費用要較草溝來得高，有時甚至可高達 50 倍之多，因此，在經濟條件的考量下，滯洪池並非各子集水區內 BMPs 設置的必然選擇。

在優化問題中，必須特別注意最佳解是否收斂，也就是要避免陷入局部性最佳解的情形，為克服這個現象，唯一的解決方法則是增加優化過程求解的次數，另外配合驗證的過程，讓所得之最佳解可以更具有可信度。本研究僅考慮 BMPs 的配置問題，若將降雨空間分佈對 BMPs 設計規格及配置的影響一併討論，或是探討加入其他降雨特性因子綜合分析，則 BMPs 最佳化分析的問題將更為複雜，也將與實際集水區管理問題更為貼近。

表 2 BMPs 設置位置及其對應之洪峰消減率及 TSS 去除率

設置位置	子集水區 1		子集水區 9	
	滯洪池	草溝	滯洪池	草溝
洪峰流量減少率	0.76	0.10	0.10	0.02
TSS 去除率	0.46	0.02	0.43	0.01

子集水區 1: 最下游之子集水區
子集水區 9: 最上游之子集水區

四、結論與建議

在過去許多研究中證實降雨空間分佈狀態，確實會影響下游地區出水口的出水量、洪峰到達時間及污染產出量等等。本研究探討降雨特性中最為重要的降雨空間變異性，對於 BMPs 最佳配置可能的影響，結論及建議歸納如下：

1. 本研究固定 BMPs 的設計，僅考慮滯洪池及草溝，因此，當滯洪池及草溝總數量固定的情況下，BMPs 的總經費將相同，然而，BMPs 的配置位置將會影響到水量及水質的輸出量，因此，在環境限制標準下，盡可能降低 BMPs 總經費為集水區管理相當重要的一環。
2. 本研究以 TSS 去除率為環境限制條件，值得注意的是，當吾人將限制條件

擴大，例如：限制下游出水量等等，BMPs 最佳化配置的優化結果將會隨之而有所差異。

3. 當所限制的 TSS 去除率較低時，往往僅需一個滯洪池或草溝則可有效降低 TSS 釋出量，而達到環境限制標準，因此，在不同空間分佈下之暴雨，所相對應之 BMPs 最佳配置的結果，並沒有顯著的差異。反之，當所限制的 TSS 去除率較高時，在不同空間分佈之暴雨事件，其相對最適之 BMPs 配置則有相當明顯的差異。
4. 未來建議將降雨各因子對 BMPs 的設計及配置也一並考量，將使得規劃結果更具有實用的價值。

參考文獻

Campos, V., M. Laguna, and R. Marti, "Scatter search for the linear ordering problem," In: *New Methods in Optimization*, D. Corne, M. Dorigo and F. Glover (Eds), McGraw-Hill (1999).

Faures, J.M., D.C. Goodrich, A.W. Davis, and S. Soroosh, "Impact of small-scale spatial variability on runoff modeling," *Journal of Hydrology*, Vol. 173, pp. 309-326 (1995).

Glover, F., "A template for scatter search and path relinking," In: *Artificial Evolution, Lecture Notes in Computer Science 1363*, J. K. Hao, E. Lutten, E. Ronald, M. Schoenauer and D. Snyers (Eds.), Springer, pp. 13-54 (1998).

Glover, F., "Heuristics for integer programming using surrogate constraints," *Decision Science*, Vol. 8, No. 1, pp. 156-166 (1977).

Glover, F., "Scatter search and path relinking," In: *New Methods in Optimization*. D. Corne, M. Dorigo and F. Glover (Eds.), McGraw-Hill (1999).

Hromadka, T.V., "A rainfall-runoff probabilistic simulation program: 1. Synthetic data generation," *Environmental Software*, Vol. 11, No. 4, pp. 235-242 (1996).

Hromadka, T.V., "A rainfall-runoff probabilistic simulation program: 2. Synthetic data analysis," *Environmental Software*, Vol. 11, No. 4, pp. 243-249 (1996).

Lung, W.S., "Water Quality Modeling For Wasteload Allocations and TMDLs," John Wiley & Sons, Inc., USA (2001).

Mostaghimi, S., S.W. Park, R.A. Cooke, and S.Y. Wang, "Assessment of management

alternatives on a small agricultural watershed,” *Water Research*, Vol. 31, No. 8, pp. 1867-1878 (1997).

Pegram, G.C., and A.J. Bath, “Role of non-point sources in the development of a water quality management plan for the Mgeni River Catchment,” *Water Science & Technology*, Vol. 32, pp. 5-6 (1995).

Tisdale, T.S., R.J. Kaighn, and S.L. Yu, “The Virginia storm (VAST) model for stormwater management — User’s Guide version 6.0.,” Department of Civil Engineering, University of Virginia, Charlottesville, V.A., USA (1996)..

Vicente, L.L., “On the effect of uncertainty in spatial distribution of rainfall on catchment modeling,” *Catena*, Vol. 28, pp. 107-119 (1996).

Wanielista, M.P., and A.Y. Yousef, “Stormwater Management,” John Wiley & Sons, Inc (1993).

Yu, S. L., R.L. Stanford, and Y.Y. Zhai, “Virginia stormwater model for windows — User’s Manual version 1.0.,” Department of Civil Engineering, University of Virginia, Charlottesville, V.A., USA (2003).

