地理學報　第五十期：73-100 (2007)
JOURNAL OF GEOGRAPHICAL SCIENCE (50) : 73-100 (2007)

不同網格解析度與流向演算法對蓮華池集水區地形指標之影響

The Effects of DTM Resolution and Flow Direction Algorithms on the Topographic Index in the Lien-Hwa-Chi Watersheds

莊永忠[*]　廖學誠[**]　詹進發[***]　黃正良[****]

Yung-Chung Chuang　Shyue-Cherng Liaw　Jihn-Fa Jan　Jeen-Liang Hwong

Abstract

The purpose of this paper is to study the effects of different grid resolutions and flow direction algorithms on the topographic index in the Lien-Hwa-Chi watersheds No.4 and No.5. The results show that topographic indices with higher values are located near valleys or streams where there are greater cumulative upslope areas and flatter gradient. In addition, when the grid resolution decreases, the mean value of topographic indices will increase due to the decrease of slope. Because the multiple flow direction algorithm results in lower gradient than those of the deterministic-8 and

* 國立臺灣師範大學地理學系博士班研究生
Graduate Student, Department of Geography, National Taiwan Normal University.
** 國立臺灣師範大學地理學系副教授，通訊作者 (e-mail: liaw@ntnu.edu.tw)
Associate Professor, Department of Geography, National Taiwan Normal University, Corresponding Author.
*** 國立政治大學地政學系副教授
Associate Professor, Department of Land Economics, National Chengchi University.
**** 行政院農委會林業試驗所蓮華池研究中心主任
Director, Lien-Hua-Chih Research Center, Taiwan Forestry Research Institute.

deterministic-infinity flow direction algorithms, the mean value of topographic indices calculated by the multiple flow direction algorithm is the highest on the basis of the same gird resolution. Furthermore, the hydrological similarity is compared between the Lien-Hwa-Chi watersheds using the Kolmogorov–Smirnov test. Based on the topographic index, Lien-Hwa-Chi watersheds No.4 and No.5 have the same hydrological similarity.

Keywords: topographic index, flow direction algorithm, hydrological similarity.

摘　要

本文探討不同數值地形模型的網格解析度與流向演算法，對蓮華池四號及五號集水區地形指標之影響，結果顯示，地形指標相對高值多位於集水區內地形低緩之谷地與河川匯集區域，此乃由於該處累積上游水量能力較強，且坡度又較緩所致。此外，網格解析度降低時坡度減緩，因此平均地形指標值相對提升。3 種流向演算法中，由於多流向演算法求得之平均坡度，較八流向演算法與無限流向演算法而言相對低緩，因此相同網格解析度下，多流向演算法所計算出之平均地形指標值，均比八流向演算法與無限流向演算法所計算出之結果爲高。本文並以 KS 檢定比較蓮華池四號及五號集水區水文相似性，就地形指標觀點而言，蓮華池四、五號集水區具相同之水文特性。

關鍵字：地形指標、流向演算法、水文相似性

前　言

影響降雨逕流空間分佈因素眾多，地形爲其中重要因子之一。Beven and Kirkby (1979) 提出 TOPMODEL 水文模式時，即透過地形指標 (topographic index) 將地形因素納入水文模擬之中，作爲反應集水區地形特性之重要參數。地形指標 (ln (α/tanβ)) 是由達西定律 (Darcy's Law) 衍生而出，式中 ln 爲自然對數，α 爲單位等高線上游集流面積，亦可稱爲比集流面積 (specific catchment area) (α＝A/L，A 爲某一網格之上游集流面積，L 則爲有效等高線長度)；tanβ 則爲該網格所在位置之坡度，代表穩定狀態之局部水力梯度，故可反應土壤水份、集水區逕流產生能力與空間分佈。在逕流生成機制之可變來源區域理論 (variable source area) 概念中，地形指標亦可用於預測集水區逕流量之貢獻區域 (contributing area)、過飽和漫地流 (saturation excess overland flow) 與地表下水流 (subsurface flow) 等空間分佈，對集水區水文特性研究幫助甚大 (Quinn *et al.*, 1995)。地形指標另一功能，則可應用於集水區水文相似性之比較探討，若不同集水區具有相似地形指標空間分佈，則其應具有相近之水文反應 (Beven *et al.*, 1995; Brasington and Richards, 1998)。

早期地形指標計算大都由等高線地形圖運算得之，但自從網格式數值地形模型 (digital terrain model, DTM) 日益普及後，地形指標之獲得已轉由 DTM 萃取而出。雖然 DTM 帶來相當程度之高效率

與便利性，但由於方格資料結構之限制，在相異網格解析度下會造成坡度值與流向演算法 (flow direction algorithm) 運算結果之變異，因而產出不同之水文特性與地形指標空間分佈。Cai and Wang (2006) 針對 DTM 與地形指標空間自動相關性之研究顯示，不同網格解析度的確會對地形指標空間自動相關性產生影響，不同地形之集水區亦會呈現不同地形指標空間型態，並進而影響水文模擬結果，Pradhan *et al.* (2006) 之實驗亦獲得相同結論。此外，Holmgren (1994) 及 Tarboton (1997) 均曾指出，應用 DTM 時不同流向演算法會計算出不同的水流方向，並進而產生不同的集流面積分佈，此情況會影響到集水區的水文特性分析。

基於上述，本研究擬採用不同數值地形模型網格解析度及流向演算法，進行蓮華池四號及五號集水區地形指標運算，並個別分析其對集流面積、坡度與地形指標之影響，期能找出參數間變動關聯性，以供日後利用水文模式模擬蓮華池試驗林集水區水文特性之所需。此外本文亦將利用地形指標，探討蓮華池四、五號集水區之水文相似性。

地形指標之探討

近年來，地形指標已被廣泛應用於水文模擬及集水區經營等相關研究。國外方面，Kumar *et al.* (2000) 曾指出，地形指標可預測土壤水份空間分佈狀況，並有助於瞭解地表與大氣間交互作用之動態變化。Chaplot *et al.* (2004) 除應用地形指標推估土壤濕潤程度，更進一步整合土壤、水文及地形概念提出水文地形指標 (hydromorphic index)，以及其在空間分佈之方式。Wang *et al.* (2005) 研發以目標爲導向之水文模式，配合 TOPMODEL 模式之模擬，透過地形指標及土壤地形指標 (soil topographic index) 計算土壤水位高低變化。而 Pilesjö *et al.* (2006) 於瑞典集水區之研究則發現，配合 GIS 及 GPS 之整合應用，可準確地預估土壤濕潤程度。Lin *et al.* (2006) 則搭配不同深度之現地土壤水份監測資料，檢核地形指標計算森林集水區中土壤水份空間分佈之正確性。在水文相似性比較方面，Feldpausch *et al.* (2006) 應用地形指標界定出亞馬遜集水區內相似之水文區域，並區分爲上坡及低地兩大類，其發現部份樹種有集中於地形指標較高處之傾向，此外，就樹木密度及地上生物量而言，上坡區域比低地區域明顯地高出許多。

而地形指標除用於推估集水區水文特性並進行水文相似性比較外，亦可做爲坡地災害評估指標。Daba *et al.* (2003) 即提出坡地沖蝕與坡面地形特性密切相關，例如坡地逕流匯流量及坡度等，而地形指標可同時包含此兩面向，故適合作爲坡面沖蝕預測指標。Vanacker *et al.* (2003) 亦應用地形指標配合地表下水流模式、邊坡穩定模式及土地利用改變模式等，進行森林砍伐對南美洲安地斯山集水區邊坡穩定度之影響評估。而由於地形指標可預測過飽和漫地流空間分佈，因此在營養鹽傳輸模擬上亦具有相當高之應用價值，Scanlon *et al.* (2004) 即應用地形指標分析磷之非點源污染傳輸。Agnew *et al.* (2006) 更以美國紐約集水區爲例，探討地形指標用於劃定水文敏感區之可行性，此研究主要基於可變來源區域理論，即假設飽和區域較容易產生地表逕流，並進而造成水質污染，其以距離河川遠近及地形指標兩變數做爲預測地表逕流發生之依據，並以 30 年長期水文資料做爲模擬及檢驗標準，透過 GIS 功能計算距離河川遠近及地形指標，並選擇 3 個土地利用類型包括森林及農田之集水區作爲測試，結果顯示，地形指標比距離河川遠近更適合預測飽和漫地流產生位置，且和現地飽和漫地流分佈大致吻合，

故爲劃定水文敏感區與擬訂水質保護策略之良好參考依據。Chappell *et al.* (2006) 之研究亦支持此論點，其研究數據指出，地形指標能突顯靠近河流兩側土壤易達飽和且易產生回流 (return flow) 之區域，而依據地形指標將該區域劃定爲水文緩衝區，應比採用固定寬度劃設方式爲佳，也更能達到保護環境之目的。

在國內方面，陳信雄等 (1997) 曾探討臺灣北部福山集水區地形指標之分佈特性，研究結果指出，地形指標相對高值大都位於河流山谷處，此乃由於其累積之上游集流面積較大，而坡度又較緩所致。廖學誠等 (2000) 曾應用地形指標分析臺灣南部高雄六龜試驗林內中寮溪與扇平溪集水區之水文相似性，得出中寮溪集水區地形指標介於 3.1 至 15.4 之間，扇平溪則介於 3.3 至 15.8 之間，其平均值均爲 5.6，而經 KS 檢定累積機率分佈後得知此二集水區地形指標相似，故就地形觀點而言，中寮溪及扇平溪集水區具有相似之逕流生成能力，或相似之累積水量趨勢。

總合上述前人研究可得知，在水文特性研究與環境規劃分析中，地形指標均可做爲有效之預測與評估依據，且因運算快速簡易，故已大量被研究者所選用。

雖然地形指標應用範圍甚廣，但在部份特殊情況下，地形指標亦有其侷限性。Rodhe and Seibert (1999) 曾應用地形指標預測瑞典濕地相關位置，結果指出，在地勢較陡之瑞典中部集水區，地形指標預測濕地之結果較佳，反之，在地勢較平緩之瑞典南部集水區，地形指標預測結果則較差，其主要原因爲該區土壤水力傳導度空間變異甚大，土壤淺薄且水份流動易被母岩阻隔所致。Desbarats *et al.* (2002) 應用克利金法計算集水區內地下水位高低值之空間分佈特性，比較地形高度、地形指標與地下水位高低之相關性，結果顯示，地形高度較地形指標擁有較高之地下水位空間預測準確性，不過地形指標與地下水位之相關函式仍有助於水文模式 TOPMODEL 之參數校正。Merot *et al.* (2003) 則應用地形指標、土壤地形指標及氣候地形指標等三種不同指標，分別預測歐洲荷蘭、西班牙、法國、英國、波蘭及瑞士等六國之濕地分佈狀況，結果顯示，氣候地形指標比地形指標能更有效預測濕地位置，此乃由於氣候地形指標修正原有地形指標，納入有效降雨概念，故能更精準預測濕地所在，不過在地質結構複雜及地表透水性變異高之山地集水區，氣候地形指標則無法完善預測濕地位置。Pellenq *et al.* (2003) 認爲雖然 TOPMODEL 模式中之地形指標常被成功地應用於土壤水份預測及土壤含水量推估，但對過度乾燥地區而言，其預測結果不一定能非常準確。Candela *et al.* (2005) 亦指出，基於可變來源區域理論基礎，並配合地形指標參數之 TOPMODEL 模式不見得能有效適用於半乾燥區域，必須將集水區土地利用情況或是地表粗糙係數加入模式模擬中，才能獲致較準確之預測結果。Chappell *et al.* (2006) 則應用地形指標預測東南亞熱帶雨林區一級河集水區之土壤濕度及河道起源，並推估坡面回流位置，而後據此劃定水文緩衝區 (hydrological buffer zone)，結果顯示，地形指標可正確預測常流河起源位置，不過卻無法準確反映土壤水份含量情況，主要是因研究區內土壤及地質之空間變異甚大。綜合上述前人研究可發現，地形指標在特定地點與情況下會受制於自然界複雜之機制，因而降低其預測準確性。

除土壤水力傳導度、植生分佈、土壤水份狀態及水流方向等非規律性自然因素影響，因而造成集水區呈現不同之水文反應 (Bloschl and Sivapalan, 1995) 外，地形指標亦會因不同網格解析度，或不同流向與坡度演算法而產生系統性之空間變異。例如採用不同網格解析度 DTM 會切出相異集水區面積，並進而影響河川流量預測 (Bruneau *et al.*, 1995)。又如 Brasington and Richards (1998) 曾指出，地形指標受 DTM 網格解析度影響甚深，經敏感度分析後得知，TOPMODEL 模式所模擬出之結果與網格解析

度密切相關。Kuo *et al.* (1999) 探討不同 DTM 網格解析度對 TOPMODEL 模式逕流及土壤水份模擬之影響，發現較低網格解析度將產生較高之土壤水份含量及蒸發散速率，而在濕季時，逕流模擬受網格解析度影響程度較低，但在乾季時，網格解析度越高逕流量卻越大，另由於網格解析度越低，對真實地表地形起伏取樣之距離增加，取樣密度降低，使整體坡度平緩化，反映地景原貌之能力亦因此降低。Rodhe and Seibert (1999) 則應用不同網格解析度 DTM 計算地形指標，以預測濕地的位置，結果指出，當使用之 DTM 網格解析度過低 (50 m×50 m) 時，將無法精準反應出地形特色，以致於在地勢較平緩之集水區，地形指標預測濕地之結果較差。Merot *et al.* (2003) 亦指出，解析度較差之 DTM 會影響到濕地位置預測準確率。除此之外，Ibbitt and Woods (2004) 發現 DTM 網格解析度與飽和水力傳導度模擬值也密切相關，網格解析度降低會影響土壤水含量及基流之運算產出，模式因而模擬出過多飽和漫地流，並導致流量預測偏高。故採用不同網格解析度 DTM 進行地形指標運算時，應留意此空間變異現象。

另外，在流向與坡度演算法產生之變異方面，Raaflaub and Collins (2006) 研究結果則顯示，地形指標可反映出土壤水份、地表飽和漫地流及逕流生成歷程之空間分佈情況，但應用 DTM 時，不同坡度及坡向演算方式將會產生不同之地形指標，並進而影響模式模擬結果。不同流向演算法亦會侷限水流方向，因而產生不同集水區水文特性與集流面積分佈 (陳清目，1996；黃誌川等，2002；Holmgren, 1994)，故探討不同流向與坡度演算法對集水區水文模擬之影響亦相當重要。

材料與方法

(一) 研究試區簡介

蓮華池試驗林位於南投縣魚池鄉 (圖 1)，屬淺山丘陵地帶，地質組成爲新生代第三紀砂岩及頁岩；土壤爲趨紅化作用黃壤，表土爲灰褐色砂質黏壤土，底土黏質夾有岩石碎塊，植生以樟科及殼斗科爲主 (葛錦昭等，1978)。研究試區年平均降雨量約爲 2,181 mm，5-9 月降雨量較多，佔全年降雨量 78.7%，可視爲濕季，10 月至翌年 4 月降雨較少，佔全年降雨量 21.3%，可視爲乾季，年降雨量雖豐沛，但乾濕季分明，年均溫爲 20.8 ℃，年平均蒸發散量爲 1,033 mm，年平均相對濕度達 85.6% (林業試驗所，1997)。蓮華池四號 (LHC-4) 與五號 (LHC-5) 集水區面積分別爲 5.86 ha 及 8.39 ha，海拔高介於 720 m 至 790 m，平均坡度爲 40%左右。蓮華池四號集水區植生爲 30 年生杉木人工林，五號集水區則爲天然闊葉林。

(二) 不同網格解析度數值地形模型之生產

由於數值地形模型網格解析度會影響產出坡度及單位等高線長度，進而造成地形指標 ln (α/tanβ) 空間分佈變異。故本研究透過地理資訊軟體 ArcGIS 9.1，由 1/5,000 地形圖數化 (等高線間距 5 m)，分別轉換產出 10 m、20 m、30 m 及 40 m 四種不同網格解析度數值地形模型，並代入運算，以評估網格解析度對地形指標之影響。

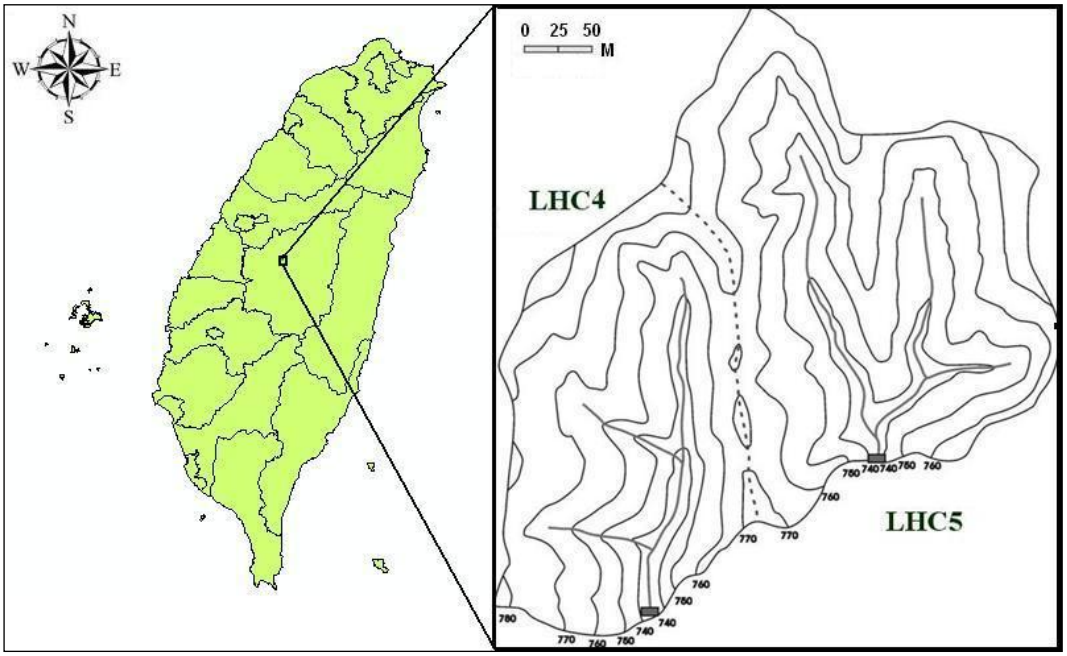


圖 1　蓮華池四號與五號集水區地理位置圖

Fig. 1. Maps of the Lien-Hwa-Chi watersheds No.4 and No.5.

(三) 計算地形指標

根據地形指標 ln (α/tanβ) 之公式，首先必須計算各網格單元之集流面積 (A) 與等高線長度 (L)，進而推出單位等高線上游集流面積 α (α＝A/L)，並配合 tanβ 以求出地形指標值。本研究採用八流向演算法 (deterministic-8 flow direction, D8) (O'Callaghan and Mark, 1984)、多流向演算法 (multiple flow direction, MFD) (Quinn *et al.*, 1991) 與無限流向演算法 (deterministic-infinity flow direction, D-INF) (Tarboton, 1997) 等 3 種目前常見之流向演算法，針對不同網格解析度之蓮華池四、五號集水區數值地形模型進行地形指標運算，流程如下：

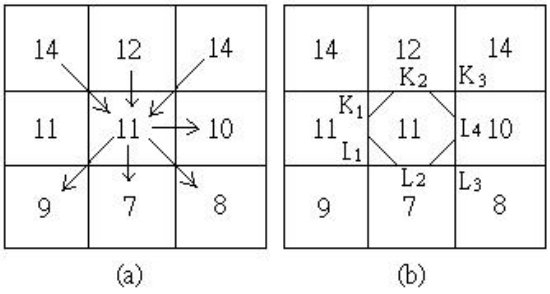
1. 八流向演算法 (O'Callaghan and Mark, 1984)：

本研究利用 ARC/INFO GRID 模組內建之功能，進行八流向演算法之套用與計算。本流向演算法採 3×3 網格移動視窗爲基礎運算單元，中央網格水流會全數傳遞給下坡相鄰網格中高差最大者，有效等高線長度等於網格邊長，而坡度則爲下坡相鄰網格中之最陡坡度，其中 α 定義爲：α＝A/L，式中 A 爲某一網格之上游集流面積，*L* 則爲有效等高線長度，在本研究中亦即選用之數值地形模型網格解析度。

而該網格之坡度則定義爲：tanβ＝ $\Delta h / \Delta l$ ，式中 Δh 爲中央網格與下坡相鄰網格之最大高程差，Δl 則爲網格中心點間之距離，垂直方向之 Δl 等於網格邊長，對角線方向 Δl 等於 $\sqrt{2}$ ×網格邊長。將 α 與 tanβ 代入即可求得八流向演算法之地形指標。

2. 多流向演算法 (Quinn *et al.*, 1991)：

多流向演算法亦採 3×3 網格移動視窗爲基礎運算單元，但中央網格水流會依高程差異程度分配給所有下坡相鄰網格。本演算法依參數設定不同而區分爲數種模擬類型 (Quinn *et al.*, 1991; Holmgren, 1994; Tarboton, 1997)，本文則以 Quinn *et al.* (1991) 提出之多流向演算法，來模擬蓮華池四、五號集水區之集流面積與地形指標。



資料來源：解河海與黃國如 (2006)。

圖 2 多流向演算法流向分配方法

Fig. 2. Multiple flow direction algorithm for runoff distribution.

多流向法將 3×3 網格移動視窗基礎運算單元中，中央網格之八種可能流向分爲垂直方向與對角方向兩大類，圖 2 (a) 即爲網格流向圖，圖 2 (b) 則爲對應中央網格之有效等高線圖，其中各網格中央數字表示高程值，K_i (i＝1,2,3) 爲與水流流入方向垂直之等高線長，L_j (j＝1,2,3,4) 爲與水流流出方向垂直之等高線長，八個流向各自對應不同之權重，其中垂直方向權重爲 0.5，對角線方向權重爲 0.354。而自中央網格分流流出至周圍網格之集流面積值 A_j 則與該方向之坡度呈比例，故下坡坡度較大之方向將獲得較多之集流面積，其式定義爲 (解河海與黃國如，2006)：

$$A_j = A\frac{L_j \tan\beta_j}{\sum_{j=1}^{n}(L_j \tan\beta_j)} \qquad (1)$$

而其有效等高線長度 L 亦採多流向演算法之分流比例原理，設定爲：

$$L = \sum_{j=1}^{n} L_j \qquad (2)$$

式中 n 爲呈下坡流出方向之網格數，故根據 (1) (2) 兩式即可求出比集流面積 α (α＝A/L)。

另一方面，中央網格之坡度值，爲各下坡方向坡度之加權平均，其計算式爲：

$$\tan\beta = \frac{\sum_{j=1}^{n}(L_j \tan\beta_j)}{\sum_{j=1}^{n} L_j} \qquad (3)$$

故該中央網格之地形指標爲：

$$\ln\left(\frac{\alpha}{tan\beta}\right) = ln\left[\frac{A}{\sum_{j=1}^{n}(L_j \tan\beta_j)}\right] \quad (4)$$

透過上式，即可求出集水區全域之多流向演算法地形指標分佈。

3. 無限流向演算法 (Tarboton, 1997)：

無限流向演算法由 Tarboton (1997) 提出，原理爲利用最陡之下坡趨勢面方向向量定義流向 (0 至 2π)。本法先連結 3×3 網格移動視窗基礎運算單元中 9 個高程點，成爲 4 個方格，再將 4 個方格切出 8 個三角形趨勢面 (圖 3A)，如此各三角形趨勢面均會有一組坡面產生。以圖 3 (B) 爲例，其坡面是由向量 (S_1, S_2) 構成，其值如下式：

$$s_1 = (e_0 - e_1)/d_1 \quad (5)$$

$$s_2 = (e_1 - e_2)/d_2 \quad (6)$$

e_1 與 d_1 分別爲網格之高程，以及其網格中心點距離另一網格中心點之距離 (圖 3B)，故其坡向 r 與與坡度 s 分別爲：

$$r = \tan^{-1}(s_2/s_1) \quad (7)$$

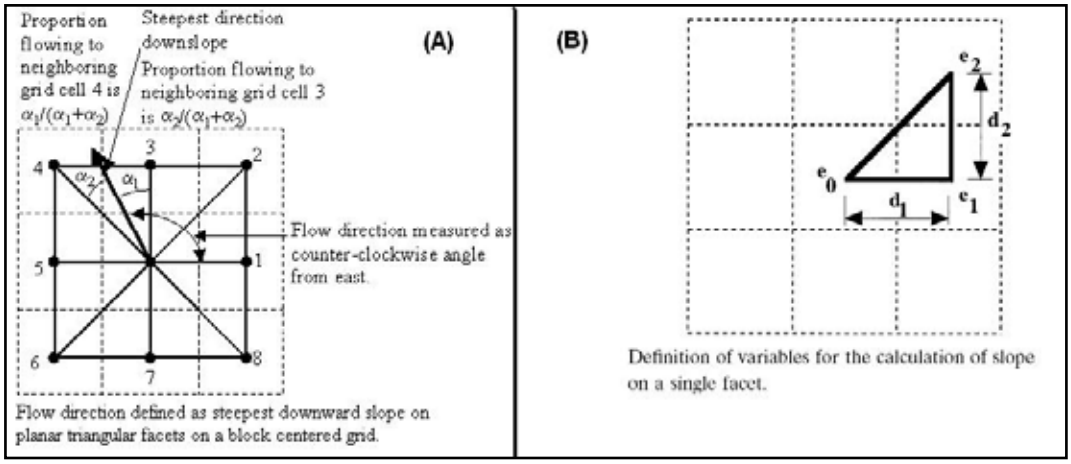
$$s = (s_1^2 + s_2^2)^{1/2} \quad (8)$$

其中若 r 值非介於 $(0, \tan^{-1}(d_2/d_1))$ 間，r 之方向則依循通過中央網格之三角形趨勢面兩邊線走向，s 亦取決於邊線所呈現之坡度值，其決定式如下：

$$\text{If} \quad r<0, \quad r=0, \quad s=s_1 \quad (9)$$

$$\text{If} \quad r>\tan^{-1}(d_2/d_1), \quad r=\tan^{-1}(d_2/d_1), \quad s=(e_0-e_2)/(d_1^2+d_2^2)^{1/2} \quad (10)$$

透過上式，即可發現 8 個三角形趨勢面可各自運算出 1 條通過中央網格中心點之最陡坡度與坡向，比較並找出 8 個平面中具下坡趨勢且坡度 s 最陡者，即定義爲中央網格之坡度 tanβ，而順其最陡坡度之方向向量即爲中央網格水流流向。流向確定後，即根據圖 3 (A) 分流模式求出中央網格之集流面積值 A，並以數值地形模型之網格解析度作爲有效等高線長度 L，求得比集流面積 α (α＝A/L)，最後將 tanβ 代入地形指標式 ln (α/tanβ)，即可計算出該中心網格之地形指標，並進而推導出集水區全域各網格之地形指標值。



資料來源：Tarboton (1997)。

圖 3　(A) 無限流向演算法之分流原則圖示，以及 (B) 單一趨勢面之坡度計算方式

Fig. 3. (A) D-infinity flow direction algorithm for runoff distribution. (B) Definition of variables for the calculation of slope on a single facet.

(四) 集水區水文相似性之判斷

不同地理位置或地表植生覆蓋集水區之水文相似性，可由水文歷線之洪峰流量、洪峰到達時間及地形指標比較得知 (Elbadaway, 1995; Peters *et al*., 2001; Lyon *et al.,* 2004)，其中 Elbadaway (1995) 利用地形指標測試夏威夷 Molokai 島上 3 個集水區之水文相似性，以 5%顯著水準 (significance level) 之 KS 檢定 (Kolmogorov-Smirnov Test) 進行評斷。本研究亦採用此方法，進行蓮華池四、五號集水區之水文相似性檢核。

研究結果

地形指標可依據地形與土壤性質之角度，預測集水區整體逕流生成能力與水文特性空間分佈 (Beven and Kirkby, 1979)，此物理性指標無疑提供了一種替代高成本現地調查之有力工具。然而透過數值地形模型萃取之地形特徵參數與現地相較是否合理有效，於不同網格解析度下產出結果穩定與否，以及各參數間之相互影響作用是否具有規律性，卻仍是相關模式發展與驗證上最大之瓶頸 (黃誌川與徐美玲，2001; Zhang and Montgomery, 1994; Martz and Garbrecht, 1995)。故如何於多種資料類型與演算法中，找尋參數之間變異性最低，推估誤差最小，並能代表自然界複雜地形之組合模式，一直爲近年來相當受矚目之課題 (Brasington and Richards, 1998; Raaflaub and Collins, 2006)。

而網格式數值地形模型具地形抽樣與規則分佈之特性，故於相同地區不同網格解析度下會造成不同之地表呈現方式 (賴進貴，1996)，進而影響集水區面積、高程、坡度，甚至地形指標以及流向演算法之運算成果。爲瞭解各因子之影響效應與相互關聯性，本研究採用 4 種網格解析度與 3 種流向演算法搭配組合，針對蓮華池四號及五號集水區進行地形效應分析、地形指標影響評估與水文相似性檢測，

茲概述結果如下：

(一) 不同網格解析度之窪地產生機率

網格式數值地形模型地形分析中，窪地之定義與處理爲相當重要的一環 (O'Callaghan and Mark, 1984; Band, 1986; Jenson and Dominque, 1988)。自然地形中，窪地可能出現於冰河或石灰岩地形之地表面；但以網格式數值地形模型之製作與運算而言，窪地多爲地形取樣或內插調整解析度過程中所造成，故常被視爲資料處理上之錯誤 (Band, 1986)。而在流向演算法之應用與河川網絡之萃取上，窪地則會造成集流面積產出之錯誤與水流方向之誤判，亦會造成局部坡度與坡向之改變 (Raaflaub and Collins, 2006)，故許多地形因子分析與水文研究著重於網格式數值地形模型表面窪地之處理或填平 (O'Callaghan and Mark, 1984; Martz and Jong; 1988; Fairfield and Leymarie, 1991)。

由上述可發現，窪地產生會影響局部地表坡度，也因此不同網格解析度下窪地產生之機率，亦間接影響地形指標運算之正確性。Tarboton (1991) 測試美國部分區域數值地形模型後，發現窪地產生機率介於 0.9%-4.7%之間。而本研究所使用之網格式數值地形模型爲依據 1/5,000 地形圖等高線數化而得，其不同網格解析度窪地產生機率如表 1 所示，約介於 0.0031%-0.0562% 間，其值相當低，且具有網格解析度越高，窪地產生機率越低之趨勢。換言之，於本研究中，窪地問題對地形指標運算正確性之影響有限。此結果遠小於 Tarboton (1991) 之測試數據，而與 Elbadaway (1995) 於夏威夷陡坡集水區，利用美國地質調查署 (USGS) 網格解析度 30 m 數值地形模型測試窪地產生機率之結果，同樣具有偏低現象，其指出可能是集水區整體坡度較陡所造成。

表 1　蓮華池集水區不同網格解析度之窪地發生率 (%)

Table 1. Incidence of pits at different grid resolution in the Lien-Hwa-Chi watersheds.

網格大小 (m)	10	20	30	40
窪地 (%)	0.0056	0.0031	0.0324	0.0562
最大深度 (m)	5.00	3.88	2.68	3.57

(二) 網格解析度對集水區高程與面積之影響

本研究之蓮華池四、五號集水區邊界範圍，乃是對照量水堰現地座標與流向圖層，於網格式數值地形模型中區劃而得，並據此分別計算不同網格解析度下之集水區面積、平均坡度及平均海拔高，其結果列於表 2。Bruneau *et al.* (1995) 曾使用不同網格解析度 (20 m-100 m) 萃取法國 Coet-Dan 集水區面積，結果顯示，網格解析度越低，萃取之集水區面積將越小，因此有造成集水區集流面積錯估之顧慮。而本研究則使用流向圖層判別方式決定邊界，雖然網格解析度降低會造成集水區外形逐漸改變，但對集水區面積則無明顯效應。蓮華池四、五號集水區面積，隨網格解析度而變動，並無固定規則可尋，其中蓮華池四號集水區面積介於 5.67 ha-5.84 ha 之間，蓮華池五號集水區面積則介於 8.44 ha-8.48 ha 之間，變動幅度有限。此外，網格解析度對蓮華池集水區平均海拔高影響不大，蓮華池四號集水區平均海拔高約 764 m，而蓮華池五號集水區平均海拔高則約爲 757 m，各組數據間差異極小。

表 2　蓮華池四、五號集水區不同網格解析度之集水區特性

Table 2. Attributes of the Lien-Hwa-Chi watersheds No.4 and No.5 at different grid resolution.

	蓮華池四號集水區				蓮華池五號集水區			
網格解析度 (m)	10	20	30	40	10	20	30	40
集水區面積 (ha)	5.76	5.84	5.67	5.76	8.44	8.44	8.46	8.48
平均海拔高度 (m)	764.5	764.9	764.5	764.8	757.5	757.6	757.6	757.4

(三) 地形指標分佈特性

本研究針對蓮華池四、五號集水區，使用 4 種不同網格解析度數值地形模型，並配合 3 種流向演算法計算地形指標。研究結果顯示 (表 3)，當網格解析度降低，各種流向演算法求出之平均地形指標值均會提高，標準差則無一定趨勢。而其地形指標機率分佈 (probability density function, PDF) 多呈單峰或多峰之右偏態 (skew to the right) 分佈 (圖 4)，地形指標累積機率分佈 (cumulative distribution function, CDF) 則大致呈斜 S 型 (圖 5、圖 6)，近似 Saulnier *et al.* (1997)、Rodhe and Seibert (1999) 所描述之完整集水區地形指標分析結果。且網格解析度升高時，兩個集水區地形指標累積機率分佈曲線與最小值均會向左移動，代表平均地形指標值隨網格解析度增加而降低 (圖 5、圖 6)；至於曲線斜率

表 3　不同網格解析度與流向演算法下之蓮華池集水區地形指標值

Table 3. Values of Topographic Index in the Lien-Hwa-Chi watersheds calculated by different grid resolution and flow direction algorithms.

		蓮華池四號集水區			蓮華池五號集水區		
		八流向法	無限流向法	多流向法	八流向法	無限流向法	多流向法
平均值 (MEAN)	10 m	4.57	4.64	4.99	4.63	4.67	5.02
	20 m	5.16	5.20	5.62	5.18	5.19	5.58
	30 m	5.43	5.44	6.01	5.79	5.79	6.17
	40 m	5.95	5.94	6.53	6.31	6.31	6.70
標準差 (SD)	10 m	1.77	1.73	1.43	1.90	1.88	1.72
	20 m	1.79	1.76	1.34	1.88	1.85	1.62
	30 m	1.62	1.62	1.27	2.04	2.02	1.48
	40 m	1.71	1.70	1.31	1.97	1.96	1.41
最大值 (MAX)	10 m	12.59	12.61	12.22	13.90	13.89	15.97
	20 m	11.58	11.59	9.61	11.02	10.91	11.88
	30 m	9.59	9.57	9.31	14.04	14.02	10.62
	40 m	10.22	10.20	10.41	11.11	11.69	10.16
最小值 (MIN)	10 m	2.35	2.34	2.96	2.35	2.35	3.07
	20 m	3.31	3.31	4.00	3.23	3.23	4.09
	30 m	3.85	3.83	4.86	3.93	3.91	4.70
	40 m	4.41	4.41	5.29	4.38	4.38	5.16

表 4　透過第二階序率優勢 (second-order stochastic dominance, SSD) 檢定由不同流向演算法與網格解析度求得之地形指標：(A) 蓮華池四號集水區檢定結果；(B) 蓮華池五號集水區檢定結果。

Table 4. Results of the second-order stochastic dominance tests (SSD) for topographic index values calculated by different flow direction algorithms and grid resolution. (A) Lien-Hwa-Chi watershed No.4. (B) Lien-Hwa-Chi watershed No.5.

(A)

蓮華池四號集水區地形指標累積機率分佈之第二階序率優勢檢定表												
SSD	10m			20m			30m			40m		
	MFD-D8	MFD-Dinf	Dinf-D8	MFD-D8	MFD-Dinf	Dinf-D8	MFD-D8	MFD-Dinf	Dinf-D8	MFD-D8	MFD-Dinf	Dinf-D8
0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2.5	-0.01	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3.0	-0.10	-0.06	-0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3.5	-0.34	-0.23	-0.10	-0.05	-0.04	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4.0	-0.63	-0.50	-0.13	-0.31	-0.28	-0.03	-0.05	-0.06	**0.02**	0.00	0.00	0.00
4.5	-0.86	-0.69	-0.18	-0.69	-0.63	-0.06	-0.44	-0.46	**0.02**	-0.11	-0.11	0.00
5.0	-0.92	-0.76	-0.16	-0.91	-0.86	-0.05	-0.92	-0.90	-0.02	-0.50	-0.50	0.00
5.5	-0.93	-0.77	-0.16	-0.96	-0.91	-0.05	-1.14	-1.11	-0.03	-0.94	-0.94	0.00
6.0	-0.93	-0.78	-0.16	-1.01	-0.95	-0.05	-1.24	-1.21	-0.03	-1.19	-1.19	0.00
6.5	-0.94	-0.78	-0.16	-1.03	-0.98	-0.05	-1.25	-1.22	-0.03	-1.22	-1.25	0.03
7.0	-0.94	-0.78	-0.16	-1.04	-1.00	-0.04	-1.24	-1.21	-0.03	-1.19	-1.22	0.03
7.5	-0.94	-0.78	-0.16	-1.06	-1.02	-0.04	-1.24	-1.21	-0.03	-1.17	-1.19	0.03
8.0	-0.93	-0.78	-0.16	-1.05	-1.01	-0.04	-1.24	-1.21	-0.03	-1.11	-1.14	0.03
8.5	-0.93	-0.77	-0.16	-1.03	-0.99	-0.04	-1.24	-1.21	-0.03	-1.14	-1.14	0.00
9.0	-0.92	-0.76	-0.16	-1.01	-0.97	-0.04	-1.22	-1.19	-0.03	-1.14	-1.14	0.00
9.5	-0.90	-0.74	-0.16	-0.97	-0.93	-0.04	-1.21	-1.16	-0.05	-1.14	-1.14	0.00
10.0	-0.89	-0.73	-0.16	-0.95	-0.91	-0.04	-1.21	-1.16	-0.05	-1.14	-1.14	0.00
10.5	-0.88	-0.72	-0.16	-0.93	-0.89	-0.04	-1.21	-1.16	-0.05	-1.14	-1.14	0.00
11.0	-0.88	-0.72	-0.16	-0.92	-0.88	-0.04	-1.21	-1.16	-0.05	-1.14	-1.14	0.00
11.5	-0.87	-0.71	-0.16	-0.91	-0.87	-0.04	-1.21	-1.16	-0.05	-1.14	-1.14	0.00
12.0	-0.87	-0.71	-0.16	-0.91	-0.87	-0.04	-1.21	-1.16	-0.05	-1.14	-1.14	0.00
註解: D8代表八流向演算法, Dinf代表無限流向演算法, MFD代表多流向演算法												

(B)

蓮華池五號集水區地形指標累積機率分佈之第二階序率優勢檢定表												
SSD	10m			20m			30m			40m		
	MFD-D8	MFD-Dinf	Dinf-D8	MFD-D8	MFD-Dinf	Dunf-D8	MFD-D8	MFD-Dinf	Dinf-D8	MFD-D8	MFD-Dinf	Dinf-D8
0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2.5	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3.0	-0.11	-0.08	-0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3.5	-0.36	-0.30	-0.06	-0.05	-0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4.0	-0.56	-0.48	-0.08	-0.36	-0.34	-0.03	-0.03	-0.03	0.00	0.00	0.00	0.00
4.5	-0.65	-0.58	-0.07	-0.66	-0.63	-0.03	-0.39	-0.38	**-0.01**	-0.06	-0.06	0.00
5.0	-0.70	-0.63	-0.07	-0.79	-0.75	-0.04	-0.73	-0.72	**-0.01**	-0.43	-0.43	0.00
5.5	-0.72	-0.64	-0.08	-0.83	-0.79	-0.05	-0.91	-0.90	**-0.01**	-0.77	-0.75	**-0.02**
6.0	-0.73	-0.65	-0.08	-0.82	-0.78	-0.04	-0.95	-0.95	0.00	-1.04	-1.04	0.00
6.5	-0.74	-0.66	-0.08	-0.83	-0.80	-0.04	-0.95	-0.96	0.01	-1.00	-1.02	0.02
7.0	-0.74	-0.66	-0.08	-0.83	-0.81	-0.02	-0.96	-0.99	0.03	-0.98	-0.98	0.00
7.5	-0.75	-0.67	-0.08	-0.83	-0.81	-0.02	-0.97	-1.00	0.03	-0.96	-0.96	0.00
8.0	-0.77	-0.68	-0.08	-0.82	-0.80	-0.02	-0.94	-0.97	0.03	-0.92	-0.94	0.02
8.5	-0.77	-0.69	-0.08	-0.80	-0.78	-0.02	-0.87	-0.90	0.03	-0.94	-0.96	0.02
9.0	-0.77	-0.68	-0.09	-0.78	-0.76	-0.02	-0.80	-0.83	0.03	-0.92	-0.94	0.02
9.5	-0.76	-0.68	-0.09	-0.77	-0.75	-0.02	-0.78	-0.81	0.03	-0.89	-0.91	0.02
10.0	-0.75	-0.67	-0.09	-0.80	-0.77	-0.02	-0.77	-0.80	0.03	-0.83	-0.87	0.04
10.5	-0.75	-0.66	-0.09	-0.80	-0.78	-0.02	-0.78	-0.81	0.03	-0.79	-0.83	0.04
11.0	-0.75	-0.67	-0.09	-0.81	-0.79	-0.02	-0.77	-0.80	0.03	-0.77	-0.81	0.04
11.5	-0.75	-0.67	-0.09	-0.81	-0.79	-0.02	-0.76	-0.79	0.03	-0.75	-0.79	0.04
12.0	-0.75	-0.66	-0.09	-0.81	-0.79	-0.02	-0.74	-0.78	0.03	-0.75	-0.79	0.04
註解: D8代表八流向演算法, Dinf代表無限流向演算法, MFD代表多流向演算法												

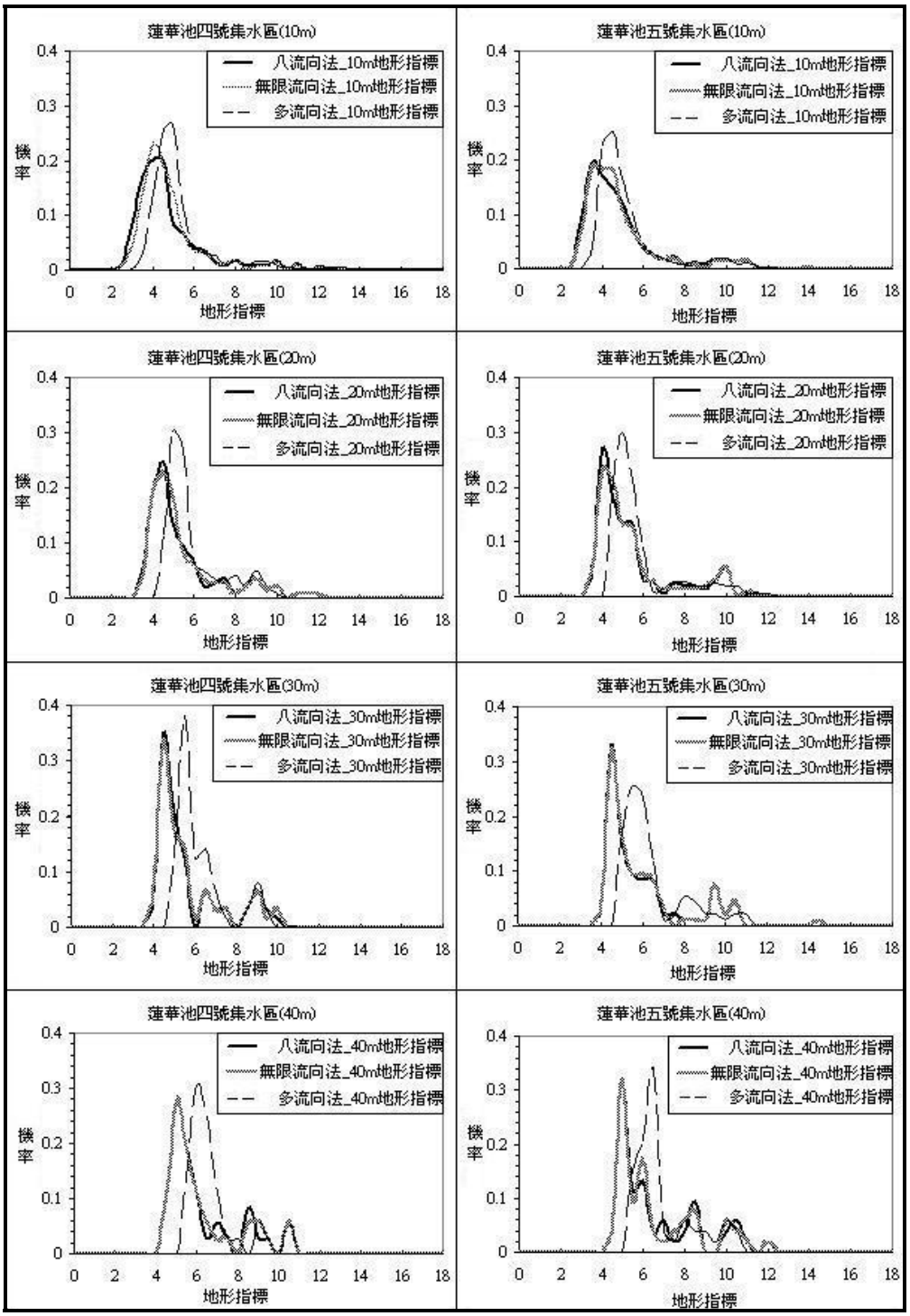


圖 4　不同流向演算法之蓮華池四、五號集水區地形指標機率分佈比較圖

Fig. 4. Probability density functions of the topographic index values calculated by different flow direction algorithms in the Lien-Hwa-Chi watersheds No.4 and No.5.

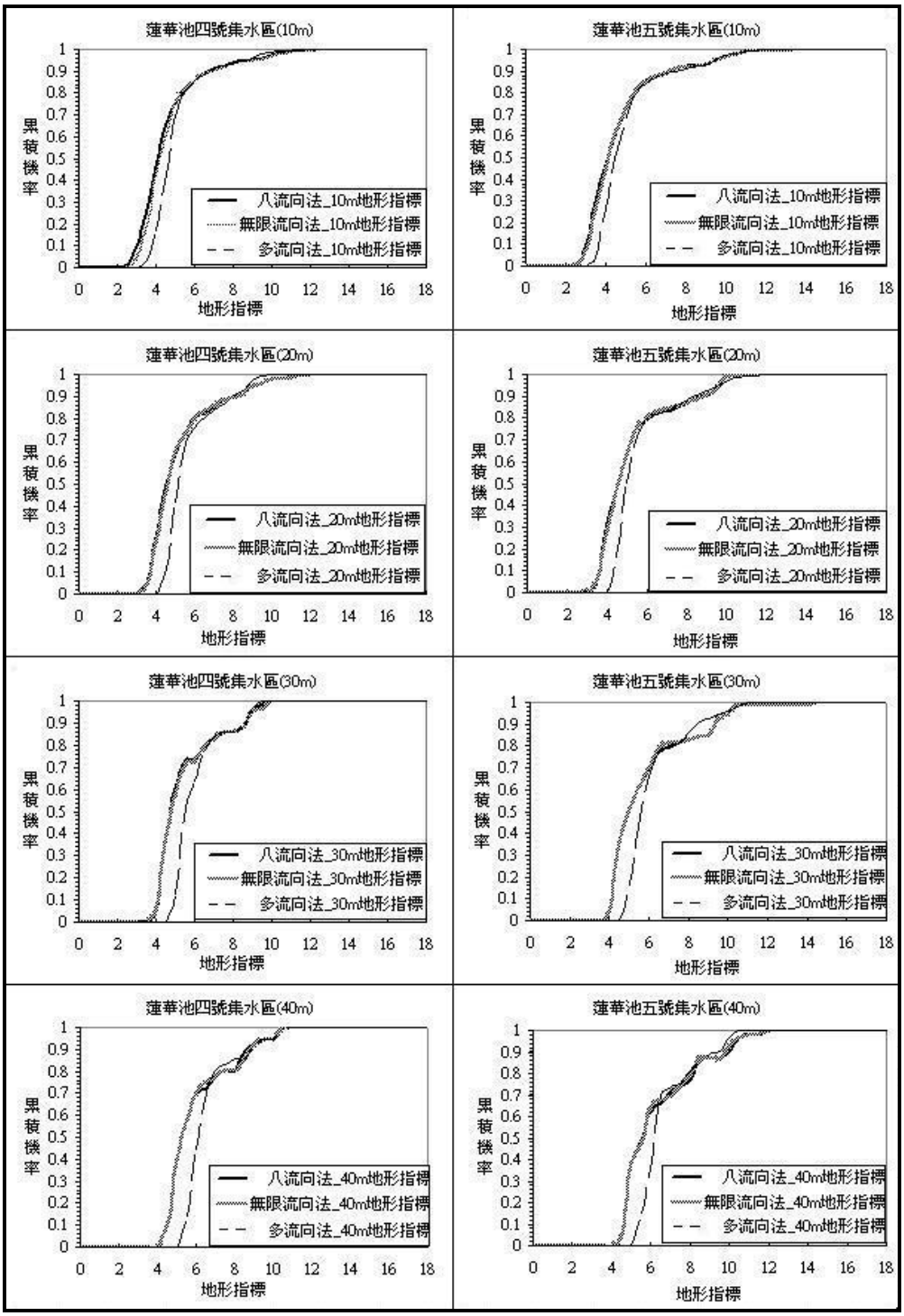


圖 5　不同流向演算法之蓮華池四、五號集水區地形指標累積機率比較圖

Fig. 5. Cumulative distribution functions of the topographic index values calculated by different flow direction algorithms in the Lien-Hwa-Chi watersheds No.4 and No.5.

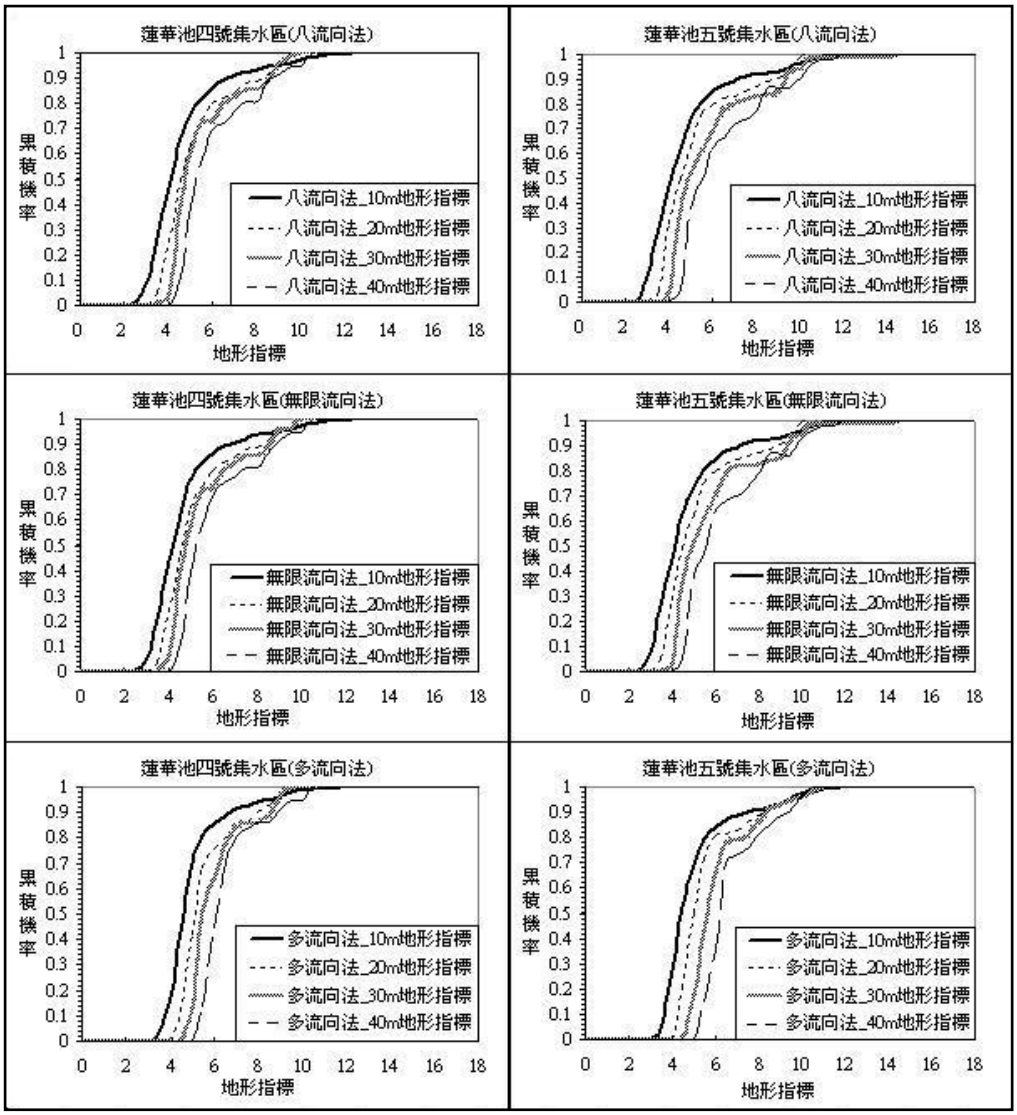


圖 6　不同網格解析度下蓮華池四、五號集水區地形指標累積機率比較

Fig. 6. The comparison of cumulative distribution functions of the topographic index with different grid resolution between the Lien-Hwa-Chi watersheds No.4 and No.5.

則有平緩圓滑之趨勢，顯示網格解析度越精細，集水區水文特性分佈會越具連續性，此分佈特性與 Quinn *et al.* (1991) 及 Franchini *et al.* (1996) 之研究結果相符。進一步分析促使地形指標變動之原因，主要是由於地形指標內之比集流面積 (α) 與坡度 (tanβ) 會隨網格解析度調整而產生變動。黃誌川與徐美玲 (2001) 曾指出，網格解析度降低在山谷地區會造成坡度值減緩，於地形複雜度小於 0.05 之緩坡條件下則可能增加；過去研究亦提出，網格解析度降低會造成部分集水區坡度值 (tanβ) 產生下降之趨勢，相對使地形指標值升高 (Zhang and Montgomery, 1994; Brasington and Richards, 1998)。

此外，流向演算法選用亦會造成結果之不同。相同集水區與網格解析度下，多流向演算法求得之平均地形指標值，均較八流向演算法與無限流向演算法計算結果爲高，而其標準差則相對較小 (表 3)。Quinn *et al.* (1991) 解釋此現象主要是由於不同流向演算法具有相異水流分配方式與坡度計算原理，故兩者交互作用下會造成地形指標空間分佈之差異。將不同流向演算法求得之地形指標進行機率分佈曲線 (圖 4) 與累積機率分佈曲線 (圖 5) 比較，可發現八流向演算法與無限流向演算法地形指標演算結果十分相近，且均位於多流向演算法之左側。多流向演算法地形指標平均值大於另外 2 種流向演算法，且於地形指標平均值附近累積速率較快，此代表多流向演算法之地形指標值分佈較集中，標準差較小，也因此於空間圖層分佈上各網格之間差異較低。

由於僅根據圖 5 與表 3 之基本統計量，並無法清楚判別八流向演算法與無限流向演算法之累積機率分佈差異，故本研究進一步採用第一階序率優勢指標 (first-order stochastic dominance, FSD) (該指標比較兩累積機率分佈函數 $A(X_i)$ 與 $B(X_i)$ 之大小，假設所有可能情況下均呈 $A(X_i) \leq B(X_i)$，則可判定 A＜B)，以及第二階序率優勢指標 (Second-Order Stochastic Dominance, SSD)(其假設對任意地形指標值 X 而言，若兩累積機率分佈函數 $A(X_i)$ 與 $B(X_i)$ 具有 $\int_0^{X_i} A(X)dx \leq \int_0^{X_i} B(X)dx$ 之特性，則可判定 A＜B) 兩種指標，以成對方式進行分組檢定。結果顯示，第一階序率優勢指標並無法有效判別兩者之差異，但第二階序率優勢指標於蓮華池四號與五號集水區之 10 m 與 20 m 部分，則可以些微差距判別出由左至右爲：八流向演算法→無限流向演算法→多流向演算法之累積機率曲線分佈趨勢，至於 30 m 與 40 m 部分檢定結果則不明顯 (表 4)。

圖層空間分佈方面，圖 7 爲 3 種流向演算法所求出之地形指標空間分佈，值越高之區域顏色越偏深黑，代表該處具有較高之地表逕流生成能力。觀察圖 7 並由圖中三個圖層兩兩相減進行對應，亦可發現由於流向演算法不同，其地形指標會產生部分空間分佈上之差異。八流向演算法所計算出之地形指標分佈，多呈現相對高值集中之現象，且其相對高值易沿著 45 度倍數方向延伸；而由多流向演算法求得之地形指標分佈則較連續、均質且平滑，符合 Quinn *et al.* (1991) 及 Wolock and McCabe (1995) 之研究結果；無限流向演算法之地形指標空間分佈特性則與八流向演算法相近，但其一級河水頭部位 (黑圈處) 均質性較八流向演算法稍佳，且較不易產生平行水流之問題。整體而言，集水區地形指標空間分佈與集流面積分佈均能呈現水流匯集能力，故集流面積演算方式之選用與正確性，亦可做爲地形指標運算之參考。Quinn *et al.* (1991) 與 Moore *et al.* (1993) 曾探討八流向演算法及多流向演算法對集水區集流面積分佈形式之影響，其結果指出，在坡地地區，多流向演算法所模擬之集流面積分佈形式較爲真實；但於谷地或河川匯集處，由於多流向演算法會造成已匯聚之水量再度發散，故以八流向演算法爲佳。雖然根據前人研究所言，多流向演算法較適合使用於坡地類型集水區，但本研究試區在實際應用上應選用何種流向演算法，仍須配合試區現地量水堰流量調查才能評斷之。

(四) 水文相似性之探討

Zhang and Montgomery (1994)、Quinn *et al.* (1995) 均指出，網格解析度太低時，由於抽樣點數不足，許多地形及河川網路會產生失真或錯估之情況，因而不利於水文模擬。而提升網格解析度能有效

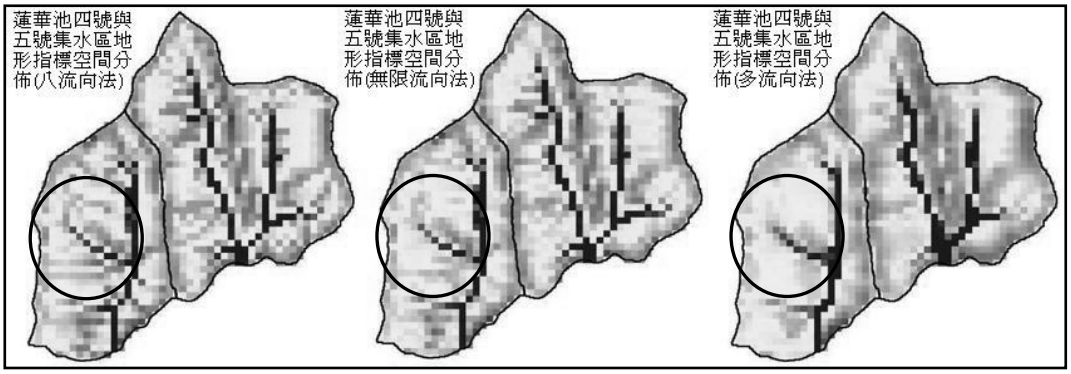


圖 7　蓮華池四號與五號集水區使用 3 種流向演算法產出之地形指標空間分佈

Fig. 7. The topographic index maps in the Lien-Hwa-Chi watersheds No.4 and No.5 calculated by the three different flow direction algorithms.

還原原始地形，並增加進階應用分析可信度。本研究採用 4 種不同網格解析度資料，但爲求能適切模擬蓮華池四、五號集水區地形特性，以供集水區相似性之比較，故僅採用 10 m 網格解析度求得之地形指標進行分析。由圖 5 與圖 6 可知，蓮華池四、五號集水區，其地形指標累積機率分佈形式相近，但爲求科學量化，本文以 5%顯著水準的 KS 檢定，測試蓮華池四、五號集水區地形指標累積機率分佈之相似性，結果如表 5 所示。數據顯示，不論何種流向演算法求得之地形指標，其最大累積機率分佈差，均小於 KS 檢定臨界值，因此就地形指標觀點而言，蓮華池四、五號集水區具相似之水文特性。

而本研究所採用之蓮華池四號與五號集水區，分屬於皆伐跡地杉木人工林與天然喬木林 2 種不同森林經營模式 (Hsia *et al.*, 1982)，但爲何以地形指標評估角度而言具有相同之水文特性？廖學誠等 (1998) 指出，其原因除了兩集水區具有相近之立地條件 (地質、地形、氣候與土壤等) 外，蓮華池四號集水區進行皆伐集材作業時甚少破壞林地、皆伐後植生復原快速、集水區面積小、坡度陡及逕流易集中等亦爲部分原因。雖本研究結果符合前人研究，但僅就地形指標觀點指出兩集水區之水文相似性，未來若欲以全面性角度評估兩集水區林木經營模式所造成之空間變異性與影響程度，則須配合其他類型指標以進行綜合衡量。

表 5　蓮華池四、五號集水區地形指標相似性之 KS 檢定

Table 5. The comparison of the hydrological similarity between the Lien-Hwa-Chi watersheds No.4 and No.5 based on the Kolmogorov-Smirnov Test.

流向演算法	CDF 最大差	臨界值 (critical value)
八流向演算法	0.081	0.224
多流向演算法	0.081	0.224
無限流向演算法	0.189	0.224

討　論

過去有關地形指標之研究多將該指標各參數分離，個別針對坡度 (tanβ) 與比集流面積 (α) 等進行影響程度分析 (Quinn *et al.*, 1991; Zhang and Montgomery, 1994; Brasington and Richards, 1998)，並獲致良好比較結果。故本研究亦採用此模式，分 3 個部份依序進行說明：(1) 網格解析度與流向演算法對坡度之影響；(2) 網格解析度與流向演算法對集流面積之影響；(3) 網格解析度與流向演算法對地形指標之綜合效應。茲分述如下：

(一) 網格解析度與流向演算法對坡度之影響

坡度 (tanβ) 爲一重要地形因子，對地形指標空間分佈有極大影響。而目前網格式數值地形模型之坡度計算法已累計達 10 餘種，但求算原理均採用地表函式一次微分切平面與 X-Y 平面之夾角定義之 (黃誌川與徐美玲，2001)，其夾角對邊與 X-Y 平面上直線距離之比值即爲 tanβ。一般而言，坡度計算均以 3×3 網格移動視窗作爲基礎運算單元；運算方式則大致分爲使用網格高程差值運算，與使用趨勢面方向向量和 X-Y 平面夾角運算兩大類 (Tarboton, 1997)。本研究中所採用之八流向演算法、多流向演算法與無限流向演算法，均屬 3×3 網格移動視窗運算單元類型；其中八流向演算法之坡度爲利用各網格間高程差值運算求得；多流向演算法之中央網格坡度值，爲各下坡方向坡度之加權平均；無限流向演算法則透過最陡趨勢面坡向對應求算中央網格坡度值。

透過 4 種網格解析度與 3 種流向演算法進行組合運算後，產出之各圖層坡度 (tanβ) 特徵值如表 6。由表中可看出：無論採用何種流向演算法，隨著網格解析度降低，蓮華池四號與五號集水區坡度之全距範圍均逐漸縮減。以八流向演算法爲例，蓮華池四號集水區之坡度全距範圍由 1.01 (網格解析度 10 m) 降至 0.49 (網格解析度 40 m)，蓮華池五號集水區之全距範圍則由 0.95 (網格解析度 10 m) 降至 0.50 (網格解析度 40 m)，顯示蓮華池集水區之坡度會隨網格解析度調整而改變，主要變化爲最大值持續降低，此亦代表地形相對高點將隨網格解析度降低而逐漸被平緩化。此部分數據與 Brasington and Richards (1998) 使用網格解析度 20 m 至 500 m 數值地形模型所得出之坡度全距變動趨勢相近，但最大值相對於網格解析度變動之比率則較高，此差異可能爲試區間不同地表類型與地形複雜度所造成。Band and Moore (1995) 曾指出自然地表面之資訊或特徵高程，會隨網格取樣與平滑化運算次數增加而加速流失，而在圖層上產生局部均勻化現象，故標準差會隨網格解析度降低而減少。本研究結果符合此趨勢，亦凸顯網格解析度會對空間計算造成極大變異之問題。

而流向演算法對坡度統計數據所造成之影響，由表 6 可觀察到蓮華池四號與五號集水區之坡度平均值與標準差，均呈現無限流向演算法≒八流向演算法＞多流向演算法之趨勢。八流向演算法與多流向演算法之運算結果差異部分，Quinn *et al.* (1991) 解釋主要是由於坡度計算方式不同所造成，因爲八流向演算法之坡度，乃是取下坡相鄰網格中坡度最陡者，多流向演算法之坡度則是取各下坡方向網格間之加權平均值。而從表 6 數據亦可看出，造成集水區坡度特徵值差異之原因，並非網格高程差值運算方式或趨勢面向量運算方式之選用，而是在於是否採用最陡坡度定義 tanβ。也因此，八流向演算法與無限流向演算法間，雖採用不同運算方式決定最陡坡向，但因兩者坡向夾角多小於 45 度，故求得之坡度差異有限。此現象說明 3 種流向演算法間，僅多流向演算法會造成較明顯之坡度分佈變異。

表 6　不同網格解析度與流向演算法下之蓮華池集水區坡度 (tanβ) 特徵值

Table 6. Slope values (tanβ) in the Lien-Hwa-Chi watersheds calculated by different grid resolution and flow direction algorithms.

		蓮華池四號集水區			蓮華池五號集水區		
		八流向法	無限流向法	多流向法	八流向法	無限流向法	多流向法
平均值 (MEAN)	10 m	0.40	0.41	0.34	0.38	0.38	0.33
	20 m	0.36	0.36	0.28	0.34	0.34	0.27
	30 m	0.35	0.35	0.24	0.27	0.27	0.21
	40 m	0.27	0.27	0.17	0.22	0.22	0.15
標準差 (SD)	10 m	0.18	0.19	0.13	0.17	0.17	0.12
	20 m	0.17	0.17	0.11	0.16	0.16	0.10
	30 m	0.14	0.15	0.09	0.15	0.15	0.09
	40 m	0.13	0.13	0.07	0.14	0.14	0.07
最大值 (MAX)	10 m	1.01	1.01	0.71	0.95	0.95	0.67
	20 m	0.73	0.74	0.55	0.7 9	0.79	0.49
	30 m	0.70	0.70	0.49	0.59	0.60	0.40
	40 m	0.49	0.49	0.34	0.50	0.50	0.31
最小值 (MIN)	10 m	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00
	20 m	0.01	0.01	0.03	0.01	0.01	0.01
	30 m	0.01	0.01	0.03	0.00	0.00	0.01
	40 m	0.02	0.02	0.03	0.01	0.01	0.02

圖 8 則爲使用不同流向演算法時，蓮華池四號集水區於各網格解析度下之坡度機率分佈與累積機率分佈。當網格解析度 10 m 時，3 種流向演算法之坡度機率分佈曲線相似度較高，其中八流向演算法與無限流向演算法曲線幾近重疊。但隨著網格解析度逐次降低，各曲線間差異越亦升高，其中多流向演算法會於坡度平均值附近累積較多之網格數目，且整體坡度會朝某些特定值域集中，而使機率分佈曲線呈現明顯之多峰態。同樣的情形亦會發生於八流向演算法與無限流向演算法，但起伏程度不若多流向演算法，顯示此 2 種流向演算法能保有較多之坡度特徵值。而 3 種流向演算法中之坡度累積機率分佈中，多流向演算法坡度累積速度最快，八流向演算法與無限流向演算法則較緩慢，但兩者間無明顯差異。

至於網格解析度所造成之影響方面，則可發現網格解析度越高時，曲線越平滑，且相對累積速度越緩慢，反之則呈現斜率較陡之累積機率曲線，且機率分佈曲線起伏程度越大 (圖 8、圖 9)。根據 Raaflaub and Collins (2006) 之研究結果，降低網格解析度時，由於地形高程取樣數目減少，整體坡度分佈之連續性降低，因而產生坡度往某些值域集中之現象，其機率分佈曲線亦因此產生較大波動，故在坡度分佈圖層上會產生如 Band and Moore (1995) 所指出之局部均勻化現象，此亦與 Quinn *et al.* (1991) 以及 Franchini *et al.* (1996) 之研究結果相符。

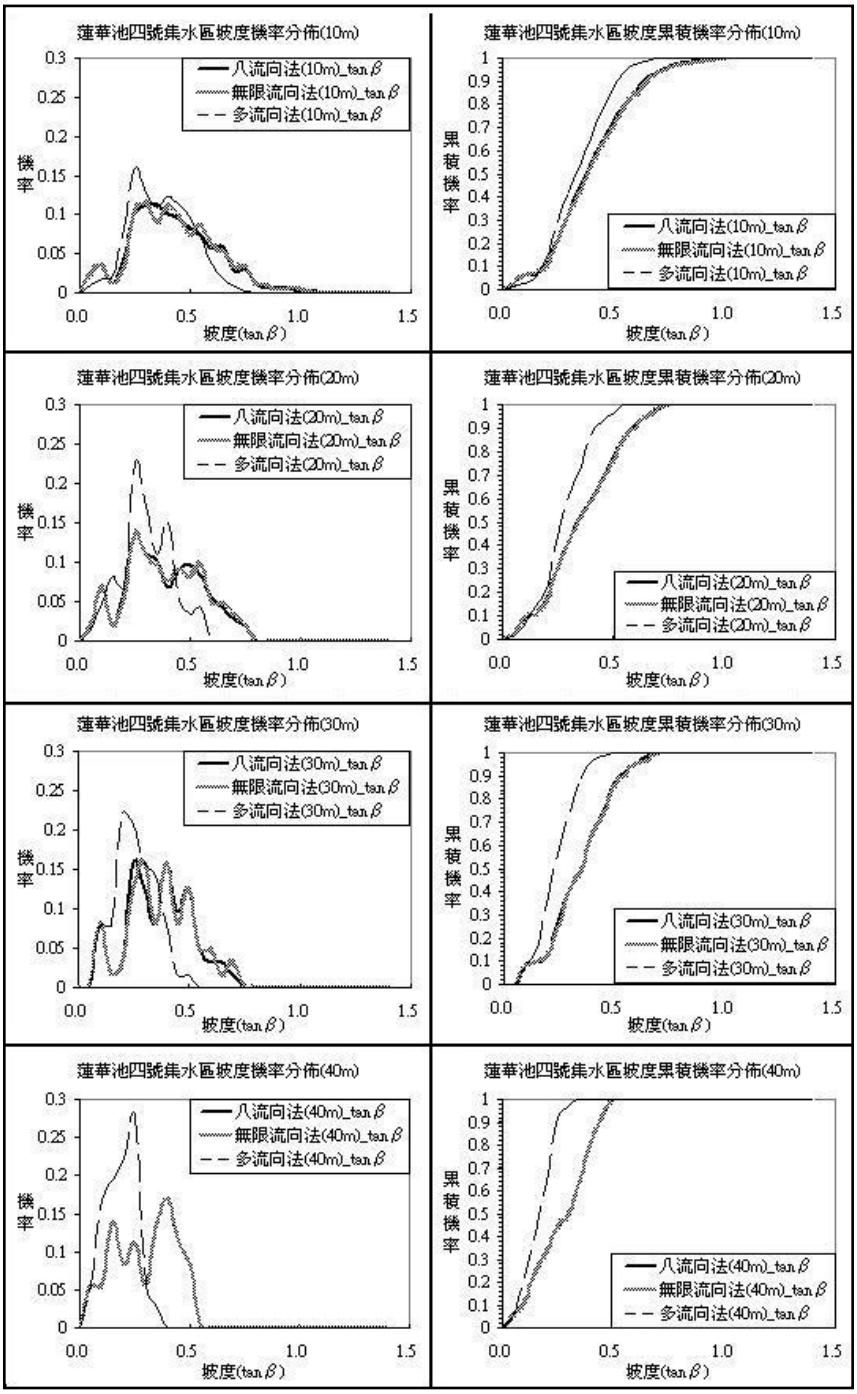


圖 8　不同流向演算法下蓮華池四號集水區坡度機率分佈與累積機率比較圖

Fig. 8. The probability density functions and cumulative distribution functions of the slope values calculated by different flow direction algorithms in the Lien-Hwa-Chi watershed No.4.

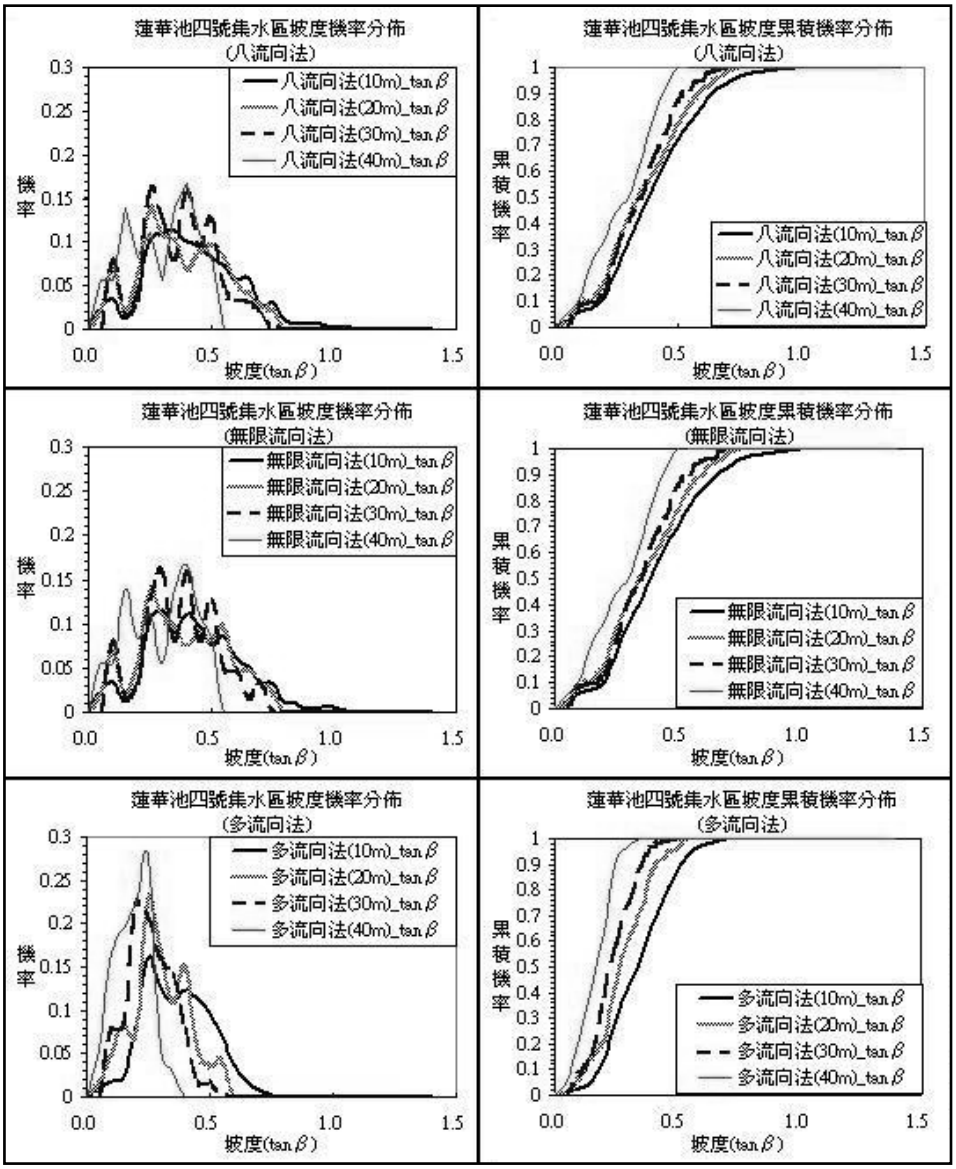


圖 9　不同網格解析度下蓮華池四號集水區坡度機率分佈與累積機率比較圖

Fig. 9. Probability density functions and cumulative distribution functions of the slope values calculated by different grid resolution in the Lien-Hwa-Chi watershed No.4.

(二) 網格解析度與流向演算法對集流面積之影響

集流面積在應用網格式數值地形模型進行演算之水文模式中，被定義爲某網格之上游網格總面積，且能代表該網格所能匯聚之上游地表逕流總量 (詹仕堅與孫志鴻，2000)，其亦爲後續水文相關模擬如河道析取、土壤沖蝕潛勢計算之重要因子 (楊奕岑等，2005)。而地形指標 ln (α/tanβ) 式中，爲了

消除網格解析度造成之面積乘數效應，則使用單位等高線之上游集流面積，亦即比集流面積 (specific catchment area, α) 作爲運算式分子，由此可見集流面積與地形指標關係之密切性，但集流面積分佈亦受網格解析度與流向演算法影響而產生不同輸出結果。

本研究採用 4 種網格解析度與 3 種流向演算法進行組合運算，表 7 則爲各組合所產出之比集流面積特徵值列表。由表 7 中可看出，在平均值部分，兩集水區比集流面積於各網格解析度與流向演算法下差異並不明顯，尤其網格解析度僅造成少量影響，變化亦無規則可循，顯示比集流面積能部分消除網格之面積乘數效應；流向演算法間之比較，則以多流向演算法所求出之比集流面積明顯較高，八流向演算法與無限流向演算法間之各項特徵值分佈則十分相近。標準差部分則具較大之變異性，隨著網格解析度提高，兩集水區於 3 種流向演算法下均呈現持續升高之趨勢，且多流向演算法之比集流面積標準差均小於另 2 種流向演算法。綜合所有數據可發現，網格解析度降低主要造成集流面積分佈往相對低值集中，故提升網格解析度有助於增顯集流面積高低值對比程度；而流向演算法中僅多流向演算法差異較明顯。

而在圖層分佈分面，當網格解析度向下調整時，除了集水區邊界會逐漸改變外，其分佈亦產生漸次之模糊化現象，「大集流面積網格」分佈也趨於不連續明顯，與楊奕岑等 (2005) 之研究結果相符；

表 7　不同網格解析度與流向演算法下之蓮華池集水區比集流面積特徵值

Table 7. Specific catchment areas calculated by different grid resolution and flow direction algorithms in the Lien-Hwa-Chi watersheds.

		蓮華池四號集水區 (m)			蓮華池五號集水區 (m)		
		八流向法	無限流向法	多流向法	八流向法	無限流向法	多流向法
比集流面積平均值 (MEAN)	10 m	200.0	199.4	210.5	196.78	198.5	211.3
	20 m	206.2	207.8	214.7	191.9	190.2	203.2
	30 m	212.9	213.3	218.6	213.2	209.3	221.2
	40 m	203.3	203.9	210.3	212.8	211.4	214.3
比集流面積標準差 (SD)	10 m	735.5	731.7	703.1	648.5	648.9	611.4
	20 m	516.2	517.5	474.1	479.3	475.2	485.9
	30 m	415.9	417.1	404.0	478.4	471.3	419.1
	40 m	339.6	341.3	328.7	392.3	391.6	344.7
比集流面積最大值 (MAX)	10 m	5690.0	5681.1	5676.5	8370.0	8370.4	8262.6
	20 m	2840.0	2870.3	2727.7	4060.0	4040.0	4142.1
	30 m	1860.0	1876.3	1903.6	2670.0	2638.5	2794.0
	40 m	1320.0	1324.0	1291.8	1960.0	1974.4	1925.0
比集流面積最小值 (MIN)	10 m	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0
	20 m	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
	30 m	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0
	40 m	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0

而 3 種流向演算法所產出之集流面積分佈圖，於特性上則近似前述地形指標分佈。整體而言，八流向演算法求得之集流面積圖層在分佈上具顯著之 45 度倍數方向性，且鄰近網格間之集流面積差值較大，故容易形成所謂「平行水流」(Quinn *et al.*, 1991)，且由於採中央網格水量全數遞移之運算方式，故其「大集流面積網格」十分集中；多流向演算法求出之集流面積圖層則極爲平滑連續，相鄰網格間匯聚之水量差異較小，其分佈則不若另 2 種流向演算法般具特性方向性。

整體而言，導致上述分佈差異之原因主要可歸類爲：(1) 網格解析度調整所造成之地形取樣變異；(2) 流向演算法選用所產生之分流差異。但由同一集水區中圖層與資料分佈型態之相似性，不難發現集流面積與地形指標間之密切關連性。未來在地形指標之研究上，則可進一步依據上述異動趨勢進行集流面積估算，並配合現地量水堰流量數據進行模式最佳化，以求能精確預測集水區水文特性。

(三) 網格解析度與流向演算法對地形指標之綜合效應

在個別分析網格解析度與流向演算法對坡度與集流面積之影響後，必須進而衡量兩者搭配所產生之綜合效應。圖 10 顯示蓮華池四號與五號集水區於各流向演算法下，依據網格解析度排序之地形指標平均值分佈，以及各地形指標平均值所對應之 ln (α) 平均值與 ln (1/tanβ) 平均值，由此分佈可分析地形指標平均值分別受 ln (α) 平均值與 ln (1/tanβ) 平均值之影響程度。由圖中可發現，無論使用何種網格解析度與流向演算法，兩集水區之 ln (α) 平均值均介於 5.2-5.5 之間，顯示兩個集水區平均地表逕流生成潛能相近；且因本研究採用已消除網格解析度面積乘數效應之比集流面積 (α) 之緣故，故 ln (α) 平均值無甚改變。而蓮華池四號與五號集水區之 ln (1/tanβ) 平均值於各網格解析度下亦十分相近，且會隨網格解析度降低呈現近似線性之增高，表示兩集水區之平均坡度隨網格解析度調整而產生規則之變動，且兩者具有相近之地形分佈。

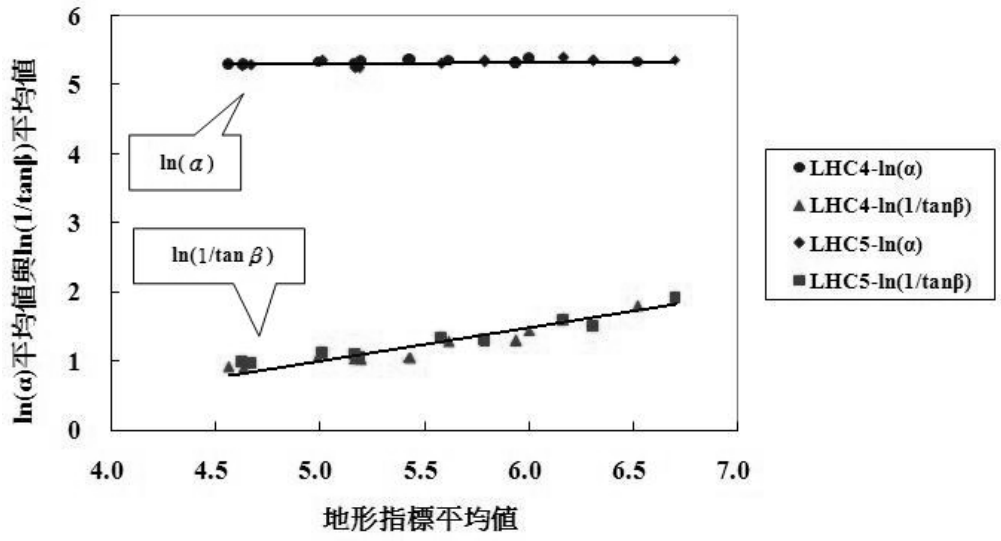


圖 10　地形指標平均值與 ln (α) 及 ln (1/tanβ) 關聯程度圖

Fig. 10. Relationship between mean values of topographic index and ln (α) and ln (1/tanβ).

另一方面，地形指標平均值主要隨 ln (1/tanβ) 上升而變動；而 ln (α) 則因其值幾無變化，故影響程度極小，此代表本研究中地形指標變異性主要來自於坡度之變動。換言之，以地形指標平均值角度觀之，網格解析度的調整爲影響其值域分佈之主因。此結果與 Beven and Kirkby (1979) 測試地形指標變動影響因子之結論相符，但和 Brasington and Richards (1998) 使用 20 m-500 m 網格解析度數值地形模型檢核尼泊爾 Bore Khola 集水區 (4.5 km^2) 之結果相反。其可能原因除研究試區面積不同外，地形複雜度之差異及網格解析度調整之倍率，亦有可能造成兩者產生截然不同的測試結果。由於資料尺度選用對指標評估之正確性與可信度有極大之影響，故後續研究可持續對不同位置與類型之區域進行影響程度檢測，相信對尋找其變動規律性與影響程度有很大的幫助。

結　論

本文旨在探討不同網格解析度及流向演算法，對蓮華池四、五號集水區地形指標之影響，並以 KS 檢定，比較集水區間之水文相似性，其結論如下：

(一) 由不同網格解析度數值地形模型萃取出之蓮華池四、五號集水區面積，隨著網格解析度變動，但無固定規則，至於平均坡度則隨著網格解析度降低而減小，平均海拔高則變動不大。

(二) 地形指標相對高值多位於集水區內地形低緩之谷地與河川匯集區域，此乃由於該處累積上游水量能力較強，且坡度又較緩所致。網格解析度越低時，由於坡度將會變小，因此其平均地形指標值將會越高。

(三) 由於多流向演算法之平均坡度，比八流向演算法與無限流向演算法之平均坡度爲緩，因此相同網格解析度下，多流向演算法所計算出之平均地形指標值，均比八流向演算法與無限流向演算法爲高。而經分別測試地形指標之組成因子後，發現坡度爲影響平均地形指標變動之主因。

(四) 不論何種流向演算法所求得之地形指標，其最大累積機率分佈差，均小於 5%顯著水準的 KS 檢定臨界值，因此就地形指標觀點而言，蓮華池四、五號集水區具相似之水文特性分佈。

引用文獻

林業試驗所 (1997) **林業試驗所蓮華池分所氣象資料** (1961-1996)，林業叢刊第 76 號。

陳信雄、廖學誠、詹進發 (1997) 網格大小及水流方向對福山集水區地形指標之影響，**國立臺灣大學農學院實驗林研究報告**，11 (2): 1-14。

陳清目 (1996) **向量與網格式數值地形模型在集水區面積演算之比較研究**，國立臺灣大學地理學研究所碩士論文。

黃誌川、徐美玲 (2001) 以不同網格數值地形 (DTM) 解析度和計算方法析取坡度之比較，**中華水土保持學報**，32 (3): 199-205。

黃誌川、徐美玲、楊奕岑 (2002) 多流向與單流向法集流面積估算結果之空間分佈特性，**中華水土保持學報**，33 (1): 57-72。

葛錦昭、楊炳炎、林淵霖、楊楚淇、漆陞忠 (1978) 臺灣森林集水區經營試驗初步報告，**林業試驗所**

試驗報告第 304 **號**，50 頁。

詹仕堅、孫志鴻 (2000) 網格式數值高程模型擷取河系集流閾值之探討，**地理學報**，28: 27-45。

解河海、黃國如 (2006) 地形指數若干計算方法探討，**河海大學學報 (自然科學版)**，34 (1): 46-50。

楊奕岑、徐美玲、賴進貴 (2005) DEM 解析度暨流向演算法對於集流面積計算之影響，**地理學報**，39: 71-90。

廖學誠、盛志澄、黃正良 (1998) 蓮華池森林皆伐跡地於諾瑞斯颱風暴雨時水文反應之研究，**臺灣林業科學**，13 (3): 237-241。

廖學誠、黃瓊漪、黃正良、林照松 (2000) 應用地文及水文特性評估集水區相似性之研究，**中華林學季刊**，33 (3): 341-353。

賴進貴 (1996) **自動化地形計測之研究**，行政院國科會專題研究計畫。

Agnew, L. J., Lyon, S., Gerard-Marchant, P., Collins, V. B., Lembo, A. J., Steenhuis, T. S. and Walter, M. T. (2006) Identifying hydrologically sensitive areas: bridging the gap between science and application,. *Journal of Environmental Management*, 78: 63-76.

Band, L. E. (1986) Topographic partition of watersheds with digital elevation models, *Water Resources Research*, 22 (1): 15-24.

Band, L. E. and Moore, I. D. (1995) Scale: landscape attributes and geographical information systems, *Hydrological Processes*, 9: 401-422.

Beven, K. J. and Kirkby, M. J. (1979) A physically based, variable contributing area model of basin hydrology, *Hydrological Sciences Bulletin*, 24: 43-69.

Beven, K., Lamb, R., Quinn, P., Romanowicz, R. and Freer, J. (1995) TOPMODEL. In: Singh, V. P. (ed.) *Computer Models of Watershed Hydrology*, Colorado, USA: Water Resources Publications, 627-668.

Bloschl, G. and Sivapalan, M. (1995) Scale issues in hydrological modelling: a review, *Hydrological Processes*, 9: 251-290.

Brasington, J. and Richards, K. S. (1998) Interactions between model predictions, parameters and DTM scales for TOPMODEL, *Computers and Geosciences*, 24: 299-314.

Bruneau, P., Gascuel-Odoux, C., Robin, P., Merot, P. and Beven, K. (1995) Sensitivity to space and time resolution of a hydrological model using digital elevation data, *Hydrological Processes*, 9: 69-81.

Candela, A., Noto, L. and Aronica, G. (2005) Influence of roughness surface in hydrological response of semiarid catchments, *Journal of Hydrology*, 313: 119-131.

Cai, X. and Wang, D. (2006) Spatial autocorrelation of topographic index in catchments, *Journal of Hydrology*, 328: 581-591.

Chaplot V., Walter, C., Curmi, P., Lagacherie, P. and King, D. (2004) Using the topography of the saprolite upper boundary to improve the spatial prediction of the soil hydromorphic index, *Geoderma*, 123: 343-354.

Chappell, N. A., Vongtanaboon, S., Jiang, Y. and Tangtham, N. (2006) Return-flow prediction and buffer designation in two rainforest headwaters, *Forest Ecology and Management*, 224: 131-146.

Daba, S., Rieger, W. and Strauss, P. (2003) Assessment of gully erosion in eastern Ethiopia using photogrammetric techniques, *CATENA*, 50: 273-291.

Desbarats, A. J., Logan, C. E., Hinton, M. J. and Sharpe, D. R. (2002) On the Kriging of water table elevations using collateral information from a digital elevation model, *Journal of Hydrology*, 255: 25-38.

Elbadaway, O. (1995) Use of GIS to assess hydrologic similarity, *Colorado State University*, Thesis.

Fairfield, J. and Leymarie, P. (1991) Drainage networks from grid digital elevation models, *Water Resources Research*, 27 (5): 709-717.

Feldpausch, T. R., McDonald, A. J., Passos, C. A. M., Lehmann, J. and Riha, S. J. (2006) Biomass, harvestable area, and forest structure estimated from commercial timber inventories and remotely sensed imagery in southern Amazonia, *Forest*, *Ecology and Management*, 233 (1): 121-132.

Franchini, M., Wendling, J., Obled, C. and Todini, E. (1996) Physical interpretation and sensitivity analysis of the TOPMODEL, *Journal of Hydrology*, 175: 293-338.

Holmgren, P. (1994) Multiple flow direction algorithms for runoff modelling in grid based elevation models: an empirical evaluation, *Hydrological Processes*, 8: 327-334.

Hsia, Y. J., Yang, B. Y., King, H. B. and Chi, S. C. (1982) Water yield resulting from clearcutting treatment on Lien-Hua-Chi experimental watershed in central Taiwan, *Taiwan Forestry Research Institute Bulletin*, 381: 17.

Ibbitt, R. and Woods, R. (2004) Re-scaling the topographic index to improve the representation of physical processes in catchment models, *Journal of Hydrology*, 293: 205-218.

Jenson, S. K. and Domingue, J. O. (1988) Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis, *Photogrammetric Enginnering and Remote Sensing*, 54 (11): 1593-1650.

Kuo, W. L., Steenhuis, T. S., McCulloch, C. E., Mohler, C. L., Weinstein, D. A., DeGloria, S. D. and Swaney, D. P. (1999) Effect of grid size on runoff and soil moisture for a variable-source-area hydrology model, *Water Resources Research*, 35 (11): 3419-3428.

Kumar, P., Verdin, K. L. and Greenlee, S. K. (2000) Basin level statistical properties of topographic index. for North America, *Advances in Water Resources*, 23: 571-578.

Lin, H. S., Kogelmann, W., Walker, C. and Burns, M. A. (2006) Soil moisture patterns in a forested catchment: a hydropedological perspective, *Geoderma*, 131: 345-368.

Lyon, S. W., Walter, M. T., Gérard-Marchant, P. and Steenhuis, T. S. (2004) Using a topographic. index to distribute variable source area runoff predicted with the SCS-curve number equation, *Hydrological Processes*, 18 (15): 2757-2771.

Martz, L. W. and Jong, D. (1988) CATCH: a Fortran program for measuring catchment area from digital elevation models, *Computers and Geosciences*, 14 (5): 627-640.

Martz, L. W. and Garbrecht, J. (1995) Automated recognition of valley lines and drainage networks from Grid

digital elevation models: a review and a new method, *Journal of Hydrology*, 167 (1): 393-396.

Merot, P., Squividant, H., Aurousseau, P., Hefting, M., Burt, T., Maitre, V., Kruk, M., Butturini, A., Thenail, C. and Viaud, V. (2003) Testing a climato-topographic index for predicting wetlands distribution along an European climate gradient, *Ecological Modelling*, 163: 51-71.

Moore, I. D., Lewis, A. and Gallant, J. C. (1993) Terrain attributes: estimation methods and scale effects. In: Jakeman, A. J., Beck, M. B. and McAleer, M. J. (eds.) *Modelling Change in Environmental Systems*, Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 189-214.

O`Callaghan, J. F. and Mark, D. M. (1984) The extraction of drainage networks from digital elevation data, *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 28: 323-344.

Pellenq, J., Kalma, J. and Boulet, G. (2003) A disaggregation scheme for soil moisture based on topography and soil depth, *Journal of Hydrology*, 276: 112-127.

Peters, N. E., Freer, J. and Beven, K. J. (2001) Modeling hydrologic responses in a small forested watershed by a new dynamic TOPMODEL (Panola Mountain, Georgia, USA). In: Uhlenbrook, S., Leibundgut, C. and McDonnell, J. J. (eds.) *Runoff Generation and Implications for River Basin Modeling*, Germany: Institute of Hydrology, University of Freiburg, 318-325.

Pilesjo¨, P., Persson, A. and Harrie, L. (2006) Digital elevation data for estimation of potentialwetness in ridged fields-comparison of two different methods, *Agricultural Water Management*, 79: 225-247.

Pradhan, N. R., Tachikawa, Y. and Takara, K. (2006) A downscaling method of topographic index distribution for matching the scales of model application and parameter identification, *Hydrological Processes*, 20: 1385-1405.

Quinn, P., Beven, K., Chevallier, P. and Planchon, O. (1991) The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modelling using digital terrain models, *Hydrological Processes*, 5: 59-79.

Quinn, P. F., Beven, K. J. and Lamb, R. (1995) The ln(a/tanB) index: how to calculate it and how to use it within the TOPMODEL framework, *Hydrological Processes*, 9: 161-182.

Raaflaub, L. D. and Collins, M. J. (2006) The effect of error in gridded digital elevation models on the estimation of topographic parameters, *Environmental Modelling and Software*, 21 (5): 710-732.

Rodhe, A. and Seibert, J. (1999) Wetland occurrence in relation to topography - a test of topographic indices as moisture indicators, *Agricultural and Forest Meteorology*, 98-99: 325-340.

Saulnier, G. M., Obled, C. and Beven, K. (1997) Including spatially variable effective soil depths in TOPMODEL, *Journal of Hydrology*, 202: 158-172.

Scanlon, T. M., Kiely, G. and Quishi, X. (2004) A nested catchment approach for defining the hydrological controls on phosphorus transport, *Journal of Hydrology*, 291 (3-4): 218-231.

Tarboton, D. G. (1991) On the extraction of channel networks from digital elevation data, *Hydrological Processes*, 5: 81-100.

Tarboton, D. G. (1997) A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models, *Water Resources Research*, 33 (2): 309-319.

Vanacker, V., Govers, G., Poesen, J., Deckers, J., Dercon, G. and Loaiza, G. (2003) The impact of environmental change on the intensity and spatial pattern of water erosion in a semi-arid mountainous environment, *CATENA*, 51: 329-347.

Wang J, Endreny, T. and Hassett, J. (2005) A flexible modeling package for. topographically based watershed hydrology, *Journal of Hydrology*, 314: 78-91.

Wolock, D. M., and McCabe Jr., G. J. (1995) Comparison of single and multiple flow direction algorithms for computing topographic parameters in TOPMODEL, *Water Resources Research*, 31 (5): 1315-1324.

Zhang, W. and Montgomery, D. R. (1994) Digital elevation model grid size, landscape representation, and hydrologic simulations, *Water Resources Research*, 30 (4): 1019-1028.

2007 年 6 月 12 日　收稿
2007 年 10 月 2 日　修正
2007 年 10 月 30 日　接受