

# DEM 解析度暨流向演算法 對於集流面積計算之影響

## The Effect of DEM Resolution and Flow Direction Algorithms on Contributing Area Calculation

楊奕岑\*

Yi-Chen Yang

徐美玲\*\*

Mei-Ling Hsu

賴進貴\*\*

Jinn-Guey Lay

### Abstract

Digital Elevation Model (DEM) plays a very important role in hydrological simulation. Hydrological parameters such as contributing area can be calculated from DEM automatically. Contributing area is a common parameter for delineating channel cells and for evaluating the potential of soil erosion. But calculation of contributing area is usually affected by DEM resolution and flow direction algorithms. This paper presents a case study that evaluates these effects in a sub-watershed of the Chenyulan Hsi. Three flow algorithms were used to calculate the contributing area at different DEM resolutions. The result shows that within the same DEM resolution, the hybrid model retains the advantage of both single-flow and multi-flow models and yields the most reasonable output. However, some spatial errors occur when coarser resampled DEMs were used. The only parameter in the hybrid model, the flow direction threshold, strongly affects the simulated result. The higher the DEM resolution is, the

---

\* 國立臺灣大學生物環境系統工程學系研究助理

Research Assistant, Department of Bioenvironmental Systems Engineering, National Taiwan University.

\*\* 國立臺灣大學地理環境資源學系副教授

Associate Professor, Department of Geography, National Taiwan University.

smaller the flow direction threshold should be. Adjustment of the flow direction threshold according to DEM resolution with a geometric ratio facilitates conversion in the calculation of the hybrid model and enables the distinction between “river unit” and “slope unit”.

**Keywords: contributing area, DEM resolution, flow direction algorithm.**

## 摘 要

數值高程模型 (Digital Elevation Model, DEM) 在水文學的領域中扮演了一個相當重要的角色。針對 DEM 進行地形的計測分析，可以用來自動化產生水文模式所需要的參數。集流面積 (contributing area) 在集水區水文學的研究中，是一個相當有用的參數，它可以幫助研究者決定河道的位置，判斷土壤沖蝕的潛勢。而集流面積的計算通常受到 DEM 解析度與流向演算法的影響。本文以陳有蘭溪內的一個次集水區進行 DEM 解析度與流向演算法之比較分析。藉由三種模式的模擬 (單流向、多流向、整合式)，分別計算不同解析度之下，集流面積的空間分佈情形。研究結果指出，在相同解析度之下，整合式模式的空間產出，可以同時保留單流向與多流向模式之優點，產生最合理的集流面積分佈。然而經過「再採樣」之後產生的粗解析度 DEM，其模擬結果卻會出現空間上的偏差。整合式模式唯一參數「流向臨界值」的變動，會強烈影響模擬結果。根據研究結果顯示，DEM 解析度越高所需要用以收斂水流的流向臨界值越小，因此依照 DEM 解析度「等比例」調整流向臨界值，將可有效提升整合式模式收斂水流之能力，進而凸顯「河道單元」與「邊坡單元」之差異。

**關鍵詞：集流面積、DEM 解析度、流向演算法**

## 前 言

地形計測分析是一門探討地表形貌的科學，相關研究嘗試利用不同的指標來做定量的描述、記錄與展示地表地形。80 年代電腦逐漸普及之後，學界開始利用「數值地形模型」(Digital Terrain Model, DTM) 進行地形計測的工作。DTM 主要有三種資料結構：規則網格 (Regular Grid)、數值等高線 (Digital Contour) 和不規則三角網 (Triangulated Irregular Network, TIN)，一般又以「DEM」(Digital Elevation Model) 這個名詞來代稱「規則網格」所代表的地形資料 (賴進貴, 1996)。三種資料形式各有其不同的生產方式，及不同的優缺點，但是「規則網格」的形式還是學術應用的主流，因為 DEM 的規則網格資料格式，可以很輕易的和其他網格式資料相結合 (例如：遙測衛星影像)，故本文將以規則網格 DEM 做為分析主體。

近年來，DEM 在水文學領域成為一個相當有用的工具，特別是利用水文模式進行模擬時，研究者可以透過套裝軟體，針對 DEM 進行地形計測的工作，用以自動產生水文模式所需之參數，例如坡度、坡向、集流面積 (contributing area) 等，若是將集流面積與「河川維護常數」(the constant of channel

maintenance) 相互配合，甚至可以自動化的將河道網格析出 (Jenson and Domingue, 1988；蔡宗勳，1994；賴進貴，1994)。然而諸如坡度或是集流面積等地形參數的計算，經常受到 DEM 網格解析度或是水文流向演算法之差異的影響，而產生不同的輸出結果，例如黃誌川與徐美玲 (2001) 便利用 4 種不同的分析方式，在橫窠溪流域進行坡度的計算，並與研究區之地形複雜度進行比較，分析 DEM 解析度對於坡度計算的影響。而集流面積則為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，因此本文乃針對不同 DEM 解析度與三種水文演算法在集流面積演算上的差異進行量化的分析評估。

## 文獻回顧

在網格式 DEM 的架構之下，有相當多種計算集流面積的水文演算法，比較著名的有 O'Callaghan 和 Mark (1984) 的單流向演算法，俗稱 D8 法。Quinn 等人 (1991) 的多流向演算法，Costa-Cabral 和 Burges (1994) 的 DEMON 演算法以及 Tarboton (1997) 的 D 法。方法儘管繁多，但多是從單流向演算法改良而成的，因此本文將針對原始的單流向演算法，Quinn 等人 (1991) 的多流向演算法，以及由前兩者結合的整合式演算法進行比較研究。

單流向演算法最為人詬病的方面，即在於每一個網格的水流僅允許朝周圍八個方向中，具有最陡坡降的網格流動，使得單流向演算法很容易形成所謂的「平行水流」。而 Quinn 等人 (1991) 的多流向演算法，根據筆者過去的經驗，固然可以改善單流向演算法僅限定單方向流動的缺點，而將水分流至周圍所有高程比本身低的網格，但是此一「允許水散流」的特性，在河道已相當明顯的地區，卻可能使得水流無法集中，反而造成集流面積演算上的錯誤。因此在過去即有研究者試圖將這兩種不同的演算法進行整合。Moore 等人 (1993) 曾在其研究中提到將單流向演算法與多流向演算法加以合併，在一個定義的河道出現之前使用多流向演算法，允許水流進行散流。而在河道形成之後，則採用單流向演算法進行計算。但是其研究並沒有很詳細的將模擬結果呈現出來，僅稍微提到了河道分界的閾值，將會影響集流面積的累積機率分佈。因此根據這篇文獻，後人將無法得知這種整合式的演算法，在水文演算上的模擬效果為何。

Quinn 等人 1995 年在針對地形指標  $\ln(a/\tan \theta)$  (其中  $a$  代表「集水面積」， $\theta$  代表「網格坡度」) 進行分析時，曾提到關於將單流向與多流向模式加以整合之概念。文中以「河道起始閾值」(channel initiation threshold, CIT) 作為「河道網格」與「坡地網格」之分界點。CIT 被視為是永久河道之起始點，當水流以多流向的方式將集流面積累積到 CIT 之後，其下游之網格便以最陡坡降的方式進行流動。但是該文卻沒有將此一模式之演算法交代清楚，因此本文根據 Moore 等人 (1993) 與 Quinn 等人 (1995) 的雜意，具體建構一「整合式模式」(the hybrid model)，並進一步分析此演算模式與過去既有模式之差異。

賴進貴 (1996) 曾針對不同地形區的實際數值地形模型，分析資料解析度對於地形計測結果之影響。Gao (1997) 則針對不同地形複雜度的小研究區，進行 DEM 解析度與地形複雜度的交叉比較工作。前人研究均指出 DEM 解析度對於輸出結果的影響與其分析的原始地形有很大的關係。也就是說，研究者應視其實際研究目的，選擇適當的 DEM 解析度進行分析。Wolock 和 Price (1994) 曾針對美東地

區 71 幅 DEM 圖層進行解析度與地圖比例尺的交叉比較工作。他們以地形指標「 $\ln(a/\tan \theta)$ 」為分析的依據,先利用相同比例尺的地圖產生不同解析度的 DEM,再分別針對  $\ln(a)$ 、 $\ln(1/\tan \theta)$  以及  $\ln(a/\tan \theta)$  做計算。研究結果顯示,  $\ln(1/\tan \theta)$  之變化主要受到地圖比例尺的影響,即由不同比例尺所產生之相同解析度的 DEM 將會造成  $\ln(1/\tan \theta)$  數值頻率分佈之改變。而相同比例尺不同解析度的 DEM,則主要影響  $\ln(a)$  數值的頻率分佈,對於  $\ln(1/\tan \theta)$  的影響則較少。

黃誌川等人 (2002) 曾針對「理想地表」進行 DEM 解析度與水文演算法兩者的交叉比較分析。所謂的「理想地表」即以球面方程式 ( $X^2+Y^2+Z^2 = R^2$ ) 建構光滑的球型及碗型表面,分別利用單流向演算法與多流向演算法於上述兩種「理想地表」進行集流面積的運算,再與數學公式所計算出之「真值」進行比較。研究結果顯示,於「理想地表」中單流向演算法在一些特殊方向上(八方位軸線)無法計算出正確的集流面積值,多流向演算法的誤差則較小。而當解析度提高時,兩種演算法的誤差似乎都有縮小的效應。但是由於「理想地表」缺乏明顯之稜線,因此多流向演算法在集水區的判定上,會超出實際範圍,亦有可能影響集流面積之計算。

綜合上述討論,本文希望以不同的水文演算法(單流向、多流向、整合式),針對由同一研究區、不同解析度之 DEM,進行空間各點的集流面積計算,並比較其間的差異,分析水文演算法與解析度效應如何交互影響集流面積計算值的空間分佈與累積機率分佈。

## 研究區域及研究方法

本文選定台灣濁水溪支流陳有蘭溪的一個次集水區:坪瀨溪集水區(如圖 1)為研究區。陳有蘭溪為濁水溪上游的主要支流之一,流域面積約 400 平方公里,形狀呈現狹長形。主流坡降 6.1%,而六成以上的支流坡降均在 20%以上(張瑞津,1997)。本文所選定的坪瀨溪集水區位於南投縣信義鄉愛國村、自強村、新鄉村境內,流域面積約 24 平方公里,河川主流坡降大約在 20%至 40%。河川主流長度大約為 10 公里。前文提到 DEM 解析度與分析研究區的原始地形有很大的關係,本研究區屬於標準的山地地形,地勢起伏較大,集水區出口到集水區邊界之高程約有 1,700 公尺的高差,因此解析度過粗的 DEM 可能無法準確的表現研究區的地勢,但太細的 DEM 則有可能造成演算時間上的浪費。

陳有蘭溪流域為台灣土石流災害發生最頻仍的地區之一,因此學術單位與政府單位在此地進行了相當多的現地調查,資料較為齊全,本文乃以行政院水土保持局 2002 年所生產之 5m × 5m 的 DEM 為初始資料,然後透過「固定距離選取一個網格點」的「再採樣」(resample)方式,分別產生 10 公尺、20 公尺、40 公尺解析度的 DEM 以進行分析,原始 5 公尺之 DEM 以及「再採樣」過後三張不同解析度之 DEM 的基本資料,如表 1 所示。

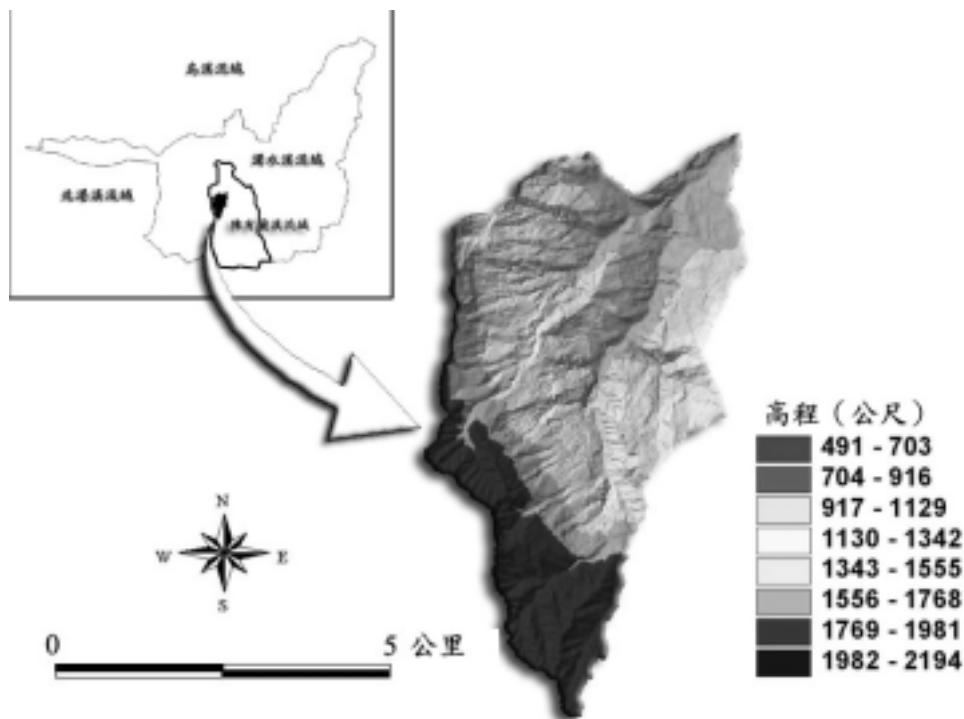


圖 1 模擬研究區：坪瀨溪集水區

表 1 研究區不同解析度 DEM 基本資料表

DEM 解析度	行數	列數	有效網格總數	流域面積	高程最小值	高程最大值
5 公尺	1,166	1,806	958,154	23.96 km <sup>2</sup>	491.859 m	2,195.853 m
10 公尺	583	903	239,628	23.96 km <sup>2</sup>	491.859 m	2,194.881 m
20 公尺	292	452	59,871	23.94 km <sup>2</sup>	492.174 m	2,193.148 m
40 公尺	146	226	14,912	23.85 km <sup>2</sup>	492.827 m	2,185.372 m

在水流演算模式的部分，單流向模式利用商業 GIS 軟體 ArcView3.2 版中，「spatial」與「hydro」模組所提供的功能來計算。多流向模式，則利用黃誌川等人 (2002) 所撰寫的模式來計算，而整合式模式則由修改黃誌川等人 (2002) 的模式，並參考前人文獻 (Garbrecht and Martz, 1997; Martz and Garbrecht, 1999) 在水流流至凹陷地 (sink area) 與平坦地 (flat area) 時，增加兩種特殊的演算法：第一種演算法用來破壞封閉凹陷地的出口，解決那些因為被高估的高程所造成的凹陷地，稱之為衝破線演算法 (the breaching algorithm)。而第二種演算法則藉由「水流流離集水區分水嶺」以及「水流流向集水區出口」的兩個概念，使得平坦地區可以產生較合理的集流面積值。

本文中所謂「整合式」(hybrid) 模式的基本概念整理自 Moore 等人 (1993) 與 Quinn 等人 (1995)

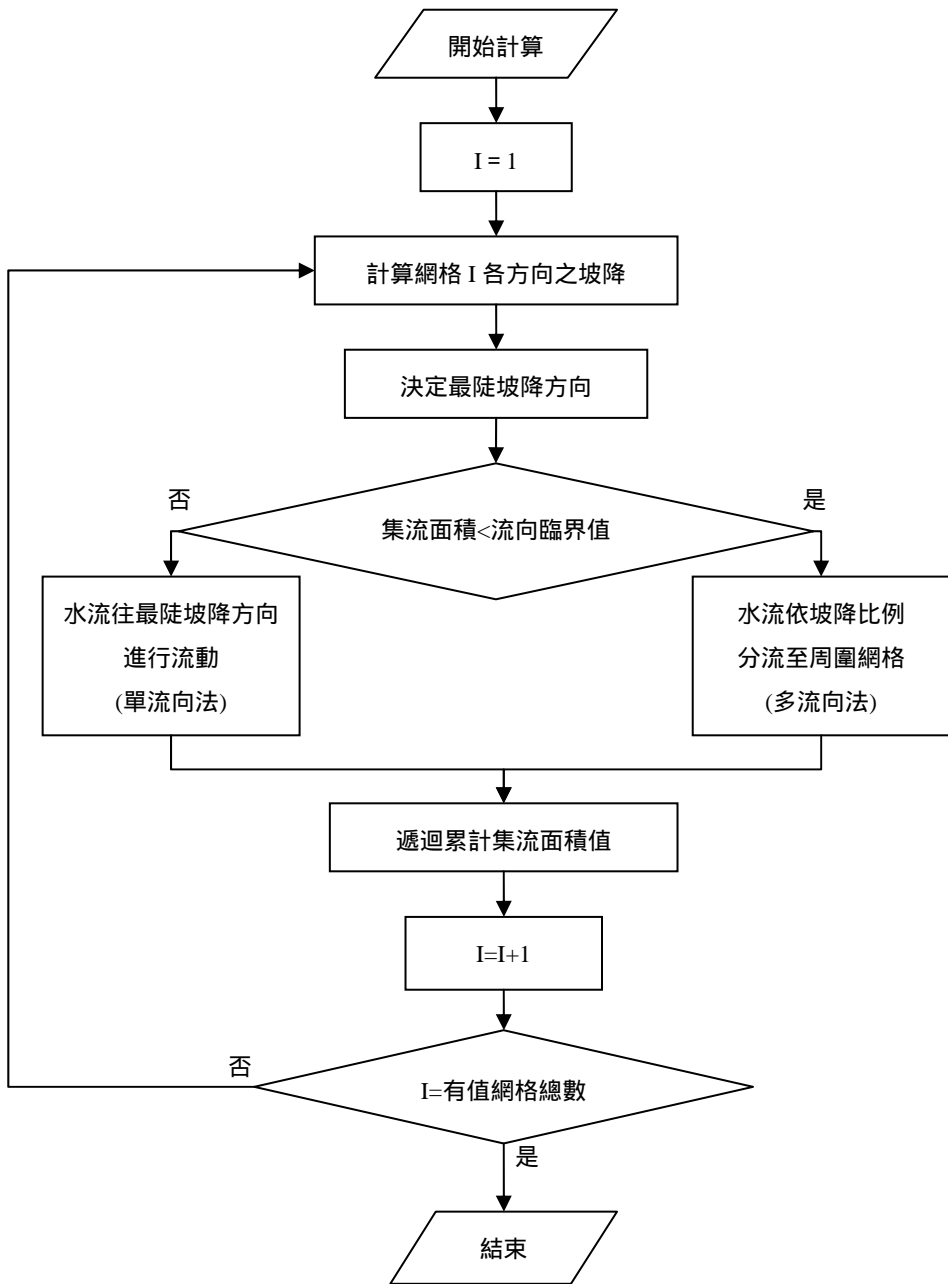


圖 2 整合式模式模擬流程圖

之研究,係以「流向臨界值」(flow direction threshold) 結合傳統單流向演算法與 Quinn 等人 (1991) 之多流向演算法。在水文演算的過程之中集流面積值會不斷地往下游累加,當某一網格之集流面積小於「流向臨界值」時,代表累積的水量尚不足形成朝單一方向流動河道,因此以多流向演算法進行計算。若是該網格累積的集流面積已超過了「流向臨界值」,代表此網格上游地區已累積一定之水量,因此轉以單流向演算法往下進行集流面積的累加,如此可同時保有「邊坡單元」以多流向演算法允許水流散流的特性,以及在「河道單元」以單流向演算法使水流往特定方向流動的特性。

本文進一步針對三種不同的模式(單流向、多流向、整合式)之集流面積演算結果,進行空間特徵分佈以及累積機率值的比較分析。在 Moore 等人 (1993) 之研究 (DEM 解析度 20 公尺) 中,將整合式模式的流向臨界值設定在集水區面積的萬分之一到千分之一之間,對於模擬的空間產出結果並不會有太大的影響,因此本文將整合式模式之流向臨界值設定為集水區面積的萬分之一,約 2,400 平方公尺,以進行模擬。此整合式流向模擬模式之完整流程如圖 2 所示。模擬一開始,先確定 DEM 中「有值網格」的總數,從「有值網格」的第一格 ( $I=1$ ) 開始計算,先計算各方向之坡降,並找出最陡坡降的方向,之後判斷原網格之集流面積是否小於「流向臨界值」,如是,則以多流向的方式進行水流計算,如否,則以單流向的方式進行水流計算。依次遞迴計算直到集水區出口為止。完成之後將  $I+1$ ,繼續進行「有值網格」第二格 ( $I=2$ ) 的計算,如此不斷的重複,直到整張 DEM 的「有值網格」都計算過,然後將各網格所有分配到的水量累加,完成整合式模式的模擬工作。

## 模擬結果與分析

40 公尺解析度之下,三種模式所得到的集流面積空間分佈圖,如圖 3 所示。



圖 3 40 公尺解析度集流面積分佈圖

由於 40 公尺解析度的 DEM 對於本研究區而言,屬於較粗的解析度,因此圖形的結果呈現出在三種模式之間,「大集流面積網格」(即在圖形當中顏色較深的部分,也是最有機會被判定是「主河道」

的部分)的數量以單流向模式最多，其次為整合式，而以多流向最少。另外，多流向模式因為水流有散流的情形出現，因此「大集流面積網格」，有較不連續的現象產生，單流向模式與整合式模式之模擬結果則較為接近。20 公尺解析度與 10 公尺解析度的模擬結果如圖 4、圖 5 所示。

20公尺



圖 4 20 公尺解析度集流面積分佈圖

10公尺



圖 5 10 公尺解析度集流面積分佈圖

由圖 4、圖 5 可以很明顯的看出，隨著解析度的增加，在單流向模式的部分，模擬得到的「大集流面積網格」的數量越來越多，而在多流向模式的部分，因為總網格數的增加，水流散流的機會跟著增多，使得深顏色的「大集流面積網格」越來越少而不明顯，不連續的情形也越趨嚴重。整合式模式則突顯出位於主要實際河道附近的「大集流面積網格」，並保持該等網格的連續不斷。



5公尺



圖 6 5 公尺解析度集流面積分佈圖(全圖)

原始 DEM 5 公尺解析度的模擬結果，如圖 6 所示。由於解析度較高、網格較小，使得全研究區水流模擬結果在此一地圖比例尺之下不甚明顯，故本文取研究區的一部份加以說明。圖 7、圖 8、圖 9，分別為三模式在 5 公尺解析度之下的部分區域模擬結果。在圖 7 中可以很明顯的看到單流向模式所得到的集流面積，在此一 DEM 解析度之下與過去研究的模擬結果相似，有很多「平行水流」的狀況出現（圓圈內），同時兩條水流匯流的夾角，亦有許多不自然的情形。圖 8 的多流向模式則與先前 10 公尺、20 公尺解析度的模擬結果相似，在圓圈之內「大集流面積網格」間有明顯中斷的情形出現。而在圖 9 整合式模式模擬結果中，此等不連續的現象已經改善，同時亦沒有出現單流向模式所得的「平行水流」，主、支流交會的夾角也自然很多。



圖 7 5 公尺解析度單流向模擬結果



圖 8 5 公尺解析度多流向模擬結果



圖 9 5 公尺解析度整合式模擬結果

整體來說，在粗解析度的狀況下，單流向模式與整合式模式所計算的集流面積值空間分佈似乎比較接近，唯單流向模式所模擬的「大集流面積網格」網格數要比整合式模式來得多。而隨著解析度的增加，整合式模式的集流面積值空間分佈越來越能夠突顯出主要河道的位置。另外隨著解析度的增加，單流向模式所計算的「大集流面積網格」數越來越多，出現許多形狀怪異的細小線狀構造；而多流向

模式因為網格數變細變多，水流散流的機會也增加，使之不易聚合成為明顯連續的「大集流面積網格」。因此整合式模式不但可以改善單流向模式「平行水流」的缺點，同時亦可以保持主要河道位置「大集流面積網格」分佈的連續性，所得空間結構的合理性居三種模式之冠。

表 2 為三種不同的模式，在 4 種不同解析度之下計算所得的集流面積值統計資料。就單一模式不同解析度而言，單流向模式之集流面積最大值、集流面積平均值與標準差，均隨解析度增加而上升，顯示網格數越細時，此模式演算傾向快速集中水流，擴大「小集流面積網格」(可視為「邊坡單元」)與「大集流面積網格」(可視為「河道單元」)之間集流面積的差異。多流向模式則由於水流散流，因此集流面積平均值與標準差則是隨著解析度增加而呈現遞減的趨勢。亦即當網格越細時，多流向模式水流發散的特性，使得其模擬結果越無法區分出所謂的「邊坡」與「河道」單元(標準差越來越小)。就整合式模式而言，在 40 公尺解析度時，由於流向臨界值過小(2,400 平方公尺=1.5 格)，因此其模擬結果之統計值與單流向模式相當接近。隨著解析度的增加，因為分流的關係，集流面積平均值遞減，與多流向類似，即有些集流面積無法快速往下累積，而標準差遞增則代表「邊坡」與「河道」單元之間的差異增加。顯示整合式模式同時具有多流向與單流向之特點。

若是針對相同 DEM 解析度進行比較，可以發現單流向模式所計算出來的集流面積最大值，平均值與標準差，都位居三者之冠，整合式模式次之，多流向模式再次之。隨著解析度的增加，三者之間在最大值與平均值的差距越來越明顯。而各模式所得的標準差，除了 40 公尺解析度之外，其餘解析度均以整合式模式最高，顯示整合式模式利以辨識「邊坡單元」與「河道單元」。

表 2 集流面積統計資料表(單位：網格數)

集流面積	單流向模式			多流向模式			整合式模式		
	最大值	平均值	標準差	最大值	平均值	標準差	最大值	平均值	標準差
5 公尺	958,154	1,042.7	21,530.8	1,296.6	9.47	22.5	58,284.74	77.61	44,091.3
10 公尺	239,628	506.7	7,528.5	698.2	10.2	23.8	69,267.53	171.15	16,297.3
20 公尺	59,871	238.1	2,560.0	632.0	12.2	34.6	47,303.82	196.30	4,437
40 公尺	14,912	115.9	908.8	808.2	16.2	55.5	14,863.5	115.76	512.2

分別繪製不同解析度下模擬所得之集流面積值的累積機率分佈，如圖 10 所示。在整合式模式之中，流向臨界值是唯一的參數。但是隨著解析度的改變，同一流向臨界值卻會對集水區集流面積值的累積機率分佈發展產生不同的影響。

圖 10 中流向臨界值 ( $T_h$ ) 設定為  $2,400\text{m}^2$ ，只要集流面積尚未累積到  $2,400\text{m}^2$  之前，整合式模式所演算的水流都是以多流向的方式進行流動，其累積機率分佈曲線，應與多流向模式相似；相反的在集流面積  $2,400\text{m}^2$  之後，模式開始以單流向進行模擬，所以其累積機率分佈曲線，應該要漸漸的逼近單流向模式。此一現象，在圖 10 (b) 20 公尺解析度與圖 10 (c) 10 公尺解析度時較為明顯。而在 40 公尺解析度時，由於  $T_h=2,400\text{m}^2$  換算成為網格大小僅 1.5 格，而在模擬開始時，筆者設定每一網格的起始集流面積為 1，因此在 40 公尺解析度之下，整合式模式尚未來得及以多流向模式散流，累計集流面積已經超過流向臨界值 (1.5 格)，因此才會使整合式模式之累積機率分佈曲線從一開始便與單流向模

式相似 (圖 10 (a))。

圖 10 (d) 5 公尺解析度在流向臨界值  $2,400 \text{ m}^2$  之前，整合式模式之累積機率分佈曲線確實與多流向模式相似，但是之後的累積機率分佈曲線與多流向模式之差異，並不像 20 公尺或 10 公尺解析度這樣明顯。主要是因為在 5 公尺解析度時， $\text{Th}=2,400\text{m}^2$  相當於 96 個網格，因此水流有相當多的時間是以多流向的方式流動，要累積到超過流向臨界值並不容易，直到累計集流面積逼近 100% 時才超過流向臨界值，換句話說在該解析度下只有非常少的網格達到以單流向演算的閾值，使整合式模式與多流向模式有非常相似的模擬結果。

此種流向臨界值對網格解析度的敏感度，顯示在利用不同解析度的 DEM 進行演算時，不宜以單一流向臨界值進行整合式模式之運算；而應該採用不同的流向臨界值才能夠獲得較為合理的模擬結果。

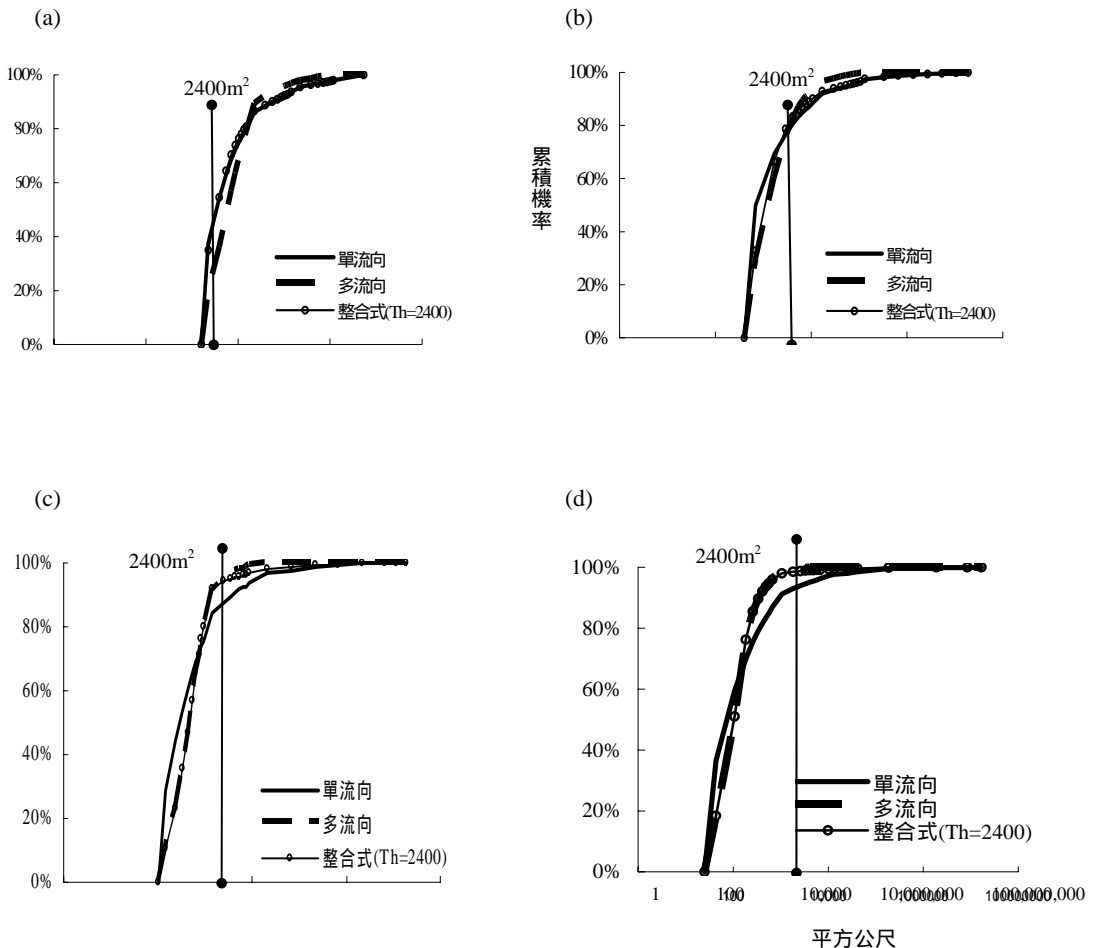


圖 10 集流面積累積機率分佈圖：(a) 40m、(b) 20m、(c) 10m、(d) 5m

## 討 論

在前一節「模擬結果與分析」中，筆者主要展示了單一流向臨界值在不同 DEM 解析度與流向演算法之模擬結果的差異。模擬所得的空間分佈型態與統計分析似乎顯示，除了在 40 公尺解析度時，整合式與單流向模式獲得相似結果外，在相同的解析度之下，整合式模式所得到的結果是最為合理的。以下的分析將聚焦於幾個重點：第一，整合式模式與單、多流向模式累積機率曲線之關係、第二，單流向組與多流向組累積機率曲線交點之問題、第三，解析度效應對於流向臨界值的影響、第四，解析度效應對於演算結果空間分佈的影響。

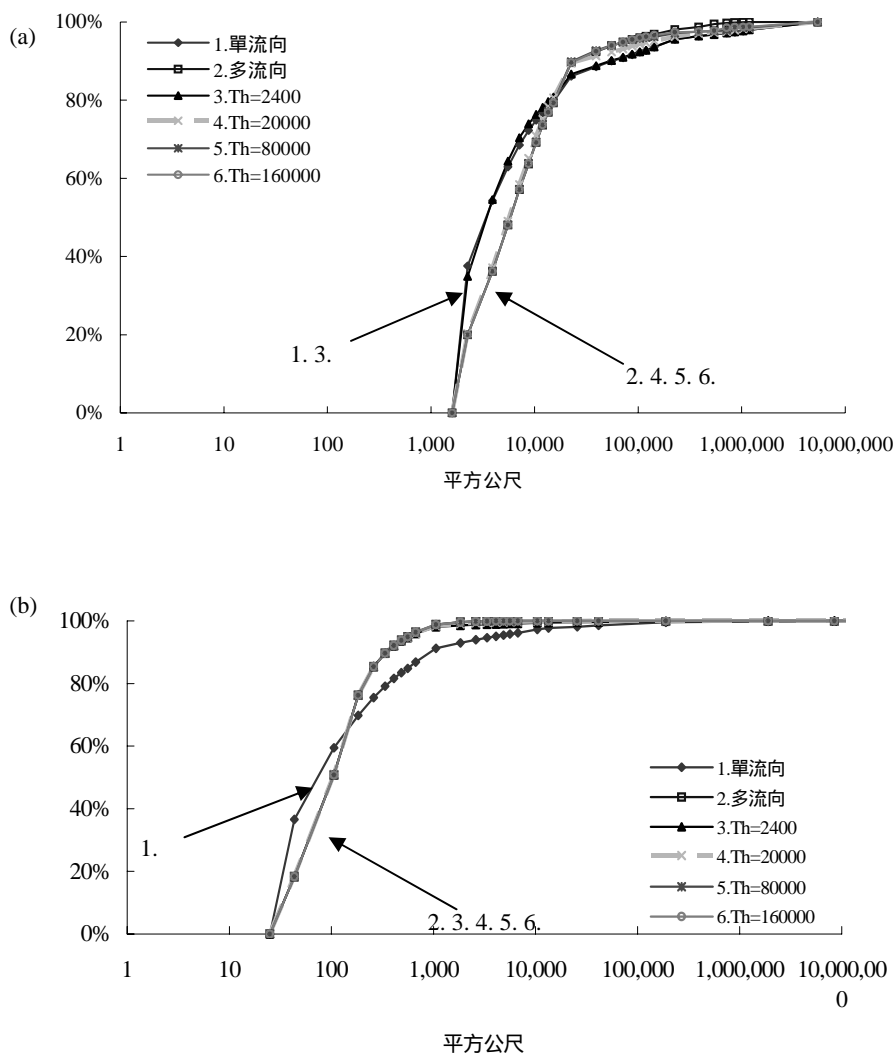


圖 11 不同流向臨界值之集流面積累積機率分佈圖 (a) 40m、(b) 5m

在整合式模式之中，唯一也是最重要的參數即為流向臨界值。本文藉由調動流向臨界值，分析在不同的 DEM 解析度之下的結果，如圖 11 所示。

### (一) 整合式模式與單流向、多流向模式之關係

整合式模式中的流向臨界值，是為了收斂水流發散的特性而設置的，而水流發散的程度，在同一個集水區之中與 DEM 的解析度呈現高度正相關性。也就是說在相同集水區面積之下，解析度越細的 DEM 其擁有的網格總數越多，代表當一滴水流由上游往集水區出口流動時，水流發散的機率也就越大。在「模擬結果與分析」中曾經提到，不同的 DEM 解析度似乎應該以不同的流向臨界值進行模擬。由圖 11 (a) 40 公尺 DEM 解析度中，可以看出原本設定的流向臨界值  $2,400\text{m}^2$  之累積機率曲線一直與單流向模式之累積機率曲線相近，代表  $2,400\text{m}^2$  的流向臨界值對於 40 公尺解析度來說稍微偏小。當流向臨界值設定太小時，不管解析度如何，模擬水流將幾乎均以單流向的方式流動，產出之模擬結果也與單流向模式幾乎相同。反之，該值設定若太大，則水流將完全以多流向的方式流動。而多流向過於散流的特性將導致水流很難累積達到該給定的流向臨界值，結果完全無法發揮其收斂水流的效益，使得「整合式模式」所得的集流面積值空間分佈與累積機率曲線，將與多流向模式完全一致。在 5 公尺解析度下，設定流向臨界值為  $80,000\text{m}^2$  與  $160,000\text{m}^2$  時，由於水流累積速率慢且容易分散，根本無法累積到此閾值，因此其累積機率分佈曲線與多流向模式完全吻合（圖 11 (b)）。此一特性值得後續研究者在設定流向臨界值時特別加以留意。

### (二) 單流向組與多流向組之交點問題

圖 11 中顯示，單流向模式之累積機率分佈曲線與多流向模式之累積機率分佈曲線在其累積的過程之中，有一個交點出現。此一交點所對應的面積隨著解析度的變細而減少。當解析度由 40 公尺、降到 20、10 公尺（未在圖中展示）、5 公尺時，交點所對應的集流面積分別為： $18,000\text{m}^2$ 、 $3,000\text{m}^2$ 、 $800\text{m}^2$ 、 $150\text{m}^2$ 。同時，其所對應的累積機率分佈值亦有下降的趨勢，分別由 80% 降到 78% 再降到 72% 以及 65%。不論在何種解析度之下，交點之前，單流向的曲線均在多流向之上，交點之後，單流向的曲線均在多流向之下。此一特徵說明，在交點之前，小於同一集流面積之網格數，單流向模式多於多流向模式。但是多流向模式模擬所得中等集流面積值的網格數較多，使得累積機率快速增加，當兩條曲線（單流向與多流向）相交時，兩者所累積的網格數是相等的。在交點之後，具有小於該相對應集流面積之網格數，則以單流向模式少於多流向模式，代表單流向模式有較多的「大集流面積網格」。而此一現象，在解析度變細時變得較不明顯。舉例來說，同樣以集流面積小於  $10,000\text{m}^2$  之累積機率來比較各解析度模擬結果，在 40 公尺解析度時（圖 11(a)）， $10,000\text{m}^2$  所對應的累積機率小於各演算法所得累積曲線之交點所對應的累積機率，因此單流向模式之累積網格數為 75%，多流向模式則為 70%，前者多於後者；但在 20 公尺解析度（未在圖中展示）， $10,000\text{m}^2$  所對應的累積機率已大於各演算法所得累積曲線之交點所對應的累積機率，因此單流向模式之小於該值的累積網格數為 86%，代表集流面積大於  $10,000\text{m}^2$  的網格佔總網格的 14%，而多流向模式則已達 93%，代表集流面積大於  $10,000\text{m}^2$  的網格僅佔總網格的 7%，兩者相差 7%。5 公尺解析度的模擬結果顯示（圖 11(b)），單流向模式所得集流面積小於  $10,000\text{m}^2$  之累積網格數達到 97%，而多流向模式則已達 99.99%，大集流面積的網格數兩者已相差不到 3%。整

合式模式之功用即在確保交點過後有合理數目的「大集流面積網格」以凸顯主河道的位置。

### (三) 解析度效應對流向臨界值之影響

綜上所述，本文可歸納出一系統性的結論：「當分析集水區所使用的 DEM 解析度越粗的時候，則流向臨界值必須越大，才能有效的使整合式模式發揮其效應，反之亦然」。又根據「模擬結果與分析」的內容中，可以推論先前設定之流向臨界值：2,400m<sup>2</sup>較適合 20 公尺解析度之 DEM。對於其他 DEM 解析度，本文提出根據 DEM 解析度，以等比例的方式，放大或縮小流向臨界值，設定為該解析度之「較適流向臨界值」，並檢視其是否能夠得到較佳的模擬結果。據此，40 公尺的 DEM 其流向臨界值設定為 4,800m<sup>2</sup> (集水區面積五千分之一)、10 公尺的 DEM 設定為 1,200m<sup>2</sup> (集水區面積二萬分之一)、5 公尺的 DEM 設定為 600m<sup>2</sup> (集水區面積四萬分之一)。模擬結果如圖 12 所示。

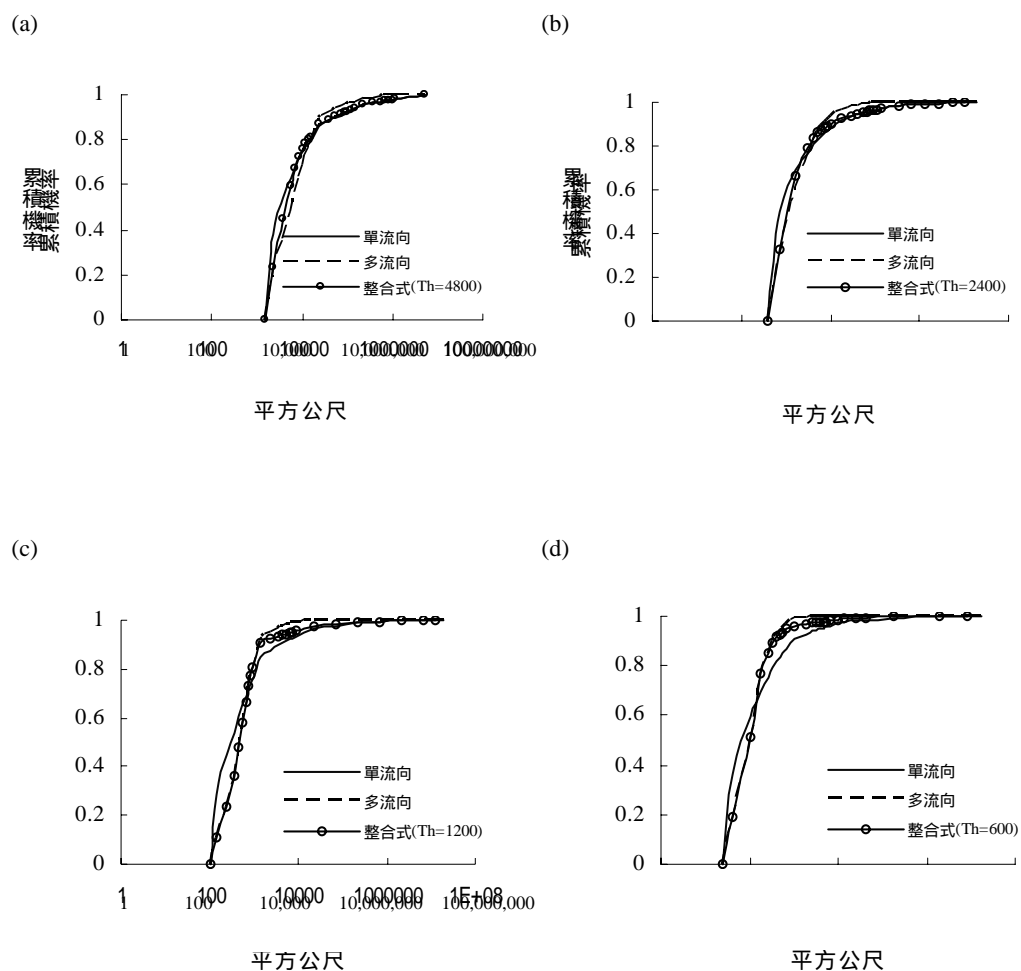


圖 12 整合式模式較佳流向臨界值模擬結果 (a) 40m (Th=4800m<sup>2</sup>)、(b) 20m (Th=2400m<sup>2</sup>)、(c) 10m (Th=1200m<sup>2</sup>)、(d) 5m (Th=600m<sup>2</sup>)

由圖 12 中可以看出，在 4 種不同的 DEM 解析度之下，利用等比例的方式調整流向臨界值，整合式模式在不同解析度之下都可以得到較佳的結果。在各組中均可以由圖形中觀察得知，當集流面積小於流向臨界值時，整合式模式之累積曲線與多流向模式接近，當集流面積大於流量臨界值時，整合式模式之累積曲線便慢慢向單流向模式靠攏，顯示集流面積值之分佈，已漸漸的將「河道單元」與「邊坡單元」分開。因此「依照 DEM 解析度等比例調整流向臨界值，進而產生「較適流向臨界值」」的概念，在此一集水區中是可行的，其中 40 公尺解析度之「較適流向臨界值」為  $4,800\text{m}^2$ 、20 公尺解析度之「較適流向臨界值」為  $2,400\text{m}^2$ 、10 公尺解析度之「較適流向臨界值」為  $1,200\text{m}^2$ 、而 5 公尺解析度之「較適流向臨界值」則為  $600\text{m}^2$ 。

#### (四) 解析度效應對於演算結果空間分佈之影響

解析度效應對於模擬結果空間分佈的影響可以由圖 13 來說明，圖 13 (a) 為經建二版之 1/25,000 地形圖，圖中黑色的線條為數化之後的河道位置，雖然本研究尚未進行「河道抽取」的步驟，但是如同先前所述，模擬結果所得之「大集流面積網格」最具有被劃歸為河道的潛力，因此透過查閱大集流面積網格的空間分佈，同樣也可以分析解析度效應所造成的影響。前述討論得知整合式模式產出三種模式中最為合理的結果，因此接下來的討論乃以整合式模式為代表，分析不同解析度之 DEM 根據討論 (三) 中所提出之「較適流向臨界值」所模擬的結果。圖 13 (b) 為 40 公尺解析度 DEM 的模擬結果，白色部分為模擬得到之「大集流面積網格」，與真實地圖比較之後可以發現，在 A 點與 B 點的部分，大集流面積網格之空間分佈偏離真實河道甚多。A 點的大集流面積網格出現明顯的「河道偏移」現象、而 B 點更出現了「河道轉向」的現象，原本應該往北方流動的河道，在 40 公尺解析度之下的模擬結果竟然呈現往東方流動的趨勢 (橢圓內)。顯示利用 5 公尺解析度之 DEM 經過「再採樣」產生 40 公尺解析度的 DEM 的過程中，遺漏了部分資訊，而導致模擬結果與真實地表之間的明顯誤差 (此一現象亦發生在單流向與多流向模式當中)。圖 13 (c) 則為 20 公尺解析度的模擬結果，可以看出 B 點「河道轉向」的現象已經有所改善，但是 A 點「河道偏移」的現象依然存在。圖 13 (d) 則為 10 公尺解析度之模擬結果，明顯看出 A、B 兩點的偏差均已改善，顯示在本研究區的地形特徵下，由 5 公尺解析度到 10 公尺解析度中間資料轉換所造成的遺漏尚在可忍受的範圍之內。原始 5 公尺解析度的模擬結果，由於網格過細，因此無法明顯的呈現於圖中，但其模擬結果之空間分佈則與 10 公尺解析度類似。

很顯然地，經過「再採樣」獲得的 40 公尺解析度之 DEM，似乎並不適合用來模擬本研究區集流面積的空間分佈。本文另外利用目前台灣地區最常用的農委會委託農航所製作之 40 公尺解析度的 DEM (TWDTM) 進行同樣的模擬，其結果如圖 13 (e) 所示。圖中呈現「大集流面積網格」之空間分佈與真實河道相當接近，並沒有「河道偏移」或是「河道轉向」等空間誤差的情形出現，而圖 14 則比較上述兩種不同來源但同為 40 公尺解析度的 DEM 之集流面積累積機率曲線分佈趨勢，結果顯示三種模式在兩種不同來源之 DEM 下，均呈現相當類似的集流面積累積機率分佈，同時整合式模式在兩種來源的 DEM 中均可以有效的將集流面積累積機率曲線由多流向「拉往」單流向，因此代表「再採樣」過後的 DEM 對於集流面積累積機率的分布，並不會造成太大的誤差，但是卻會在空間產出的結果上造成相當明顯的誤差。



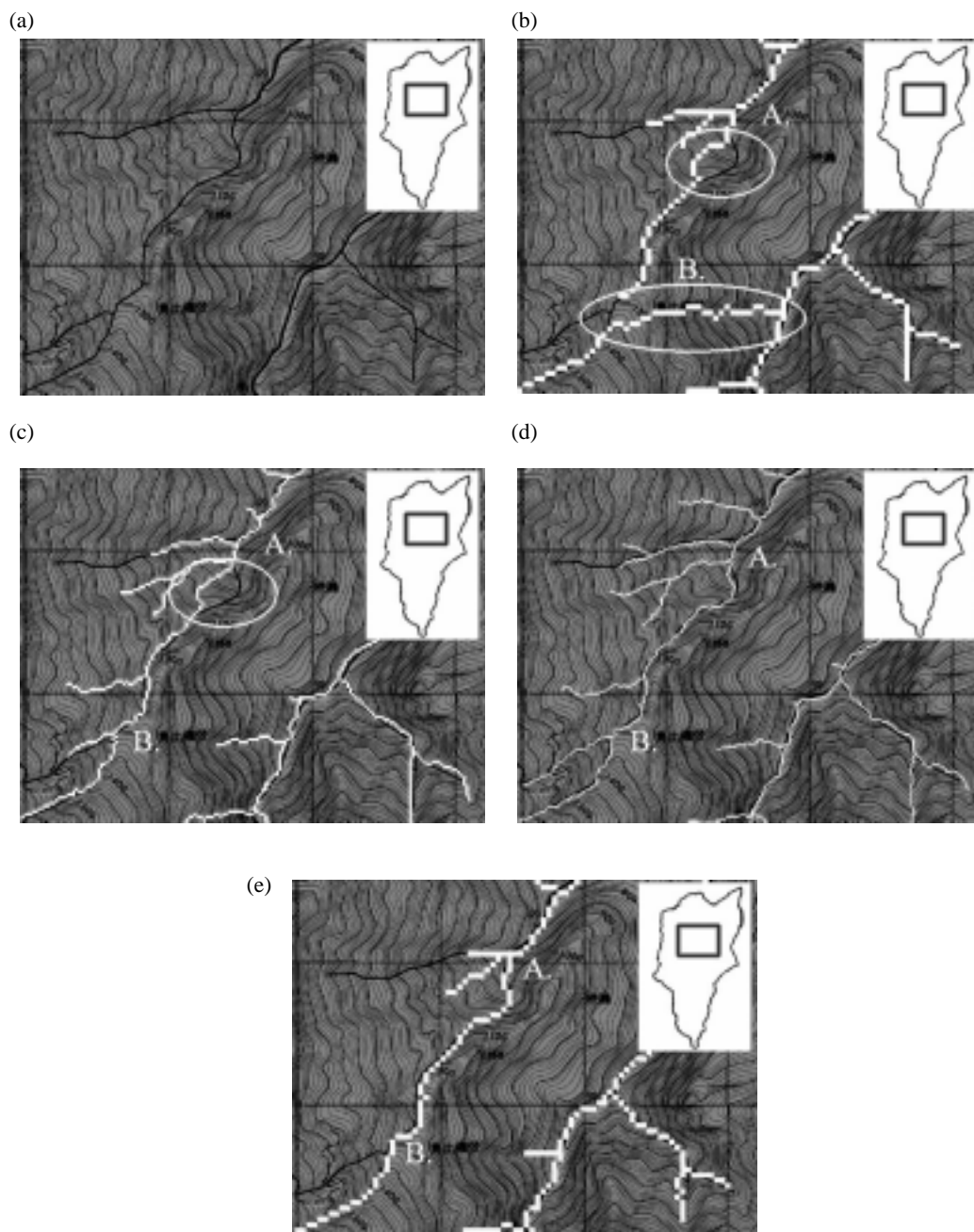


圖 13 不同解析度整合式模式之模擬結果與真實地表之比較 (a) 1/25,000 數化河道、(b) 40m DEM 模擬結果、(c) 20m DEM 模擬結果、(d) 10m DEM 模擬結果、(e) 農委會 40m DEM 模擬結果

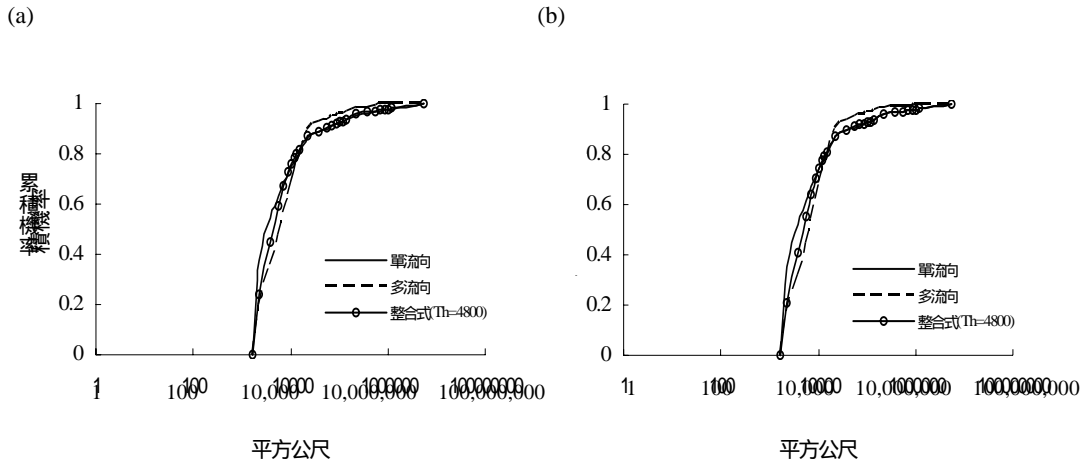


圖 14 不同來源之 40 公尺 DEM 集流面積模擬結果比較分析 (a) 再採樣之 DEM、(b) 農委會之 DEM

## 結 論

本研究利用三種不同的水流演算模式：單流向、多流向、整合式模式，在一面積約 24 平方公里的集水區：坪瀨溪集水區進行不同 DEM 解析度之集流面積演算分析。分析結果顯示，除了在 40 公尺解析度下，整合式模式與單流向模式所獲結果相似之外，其他在相同的解析度之下，整合式模式均可以有效的去除單流向模式之「平行水流」的不自然分佈型態，亦可以有效控制多流向模式的水流發散，得到較合理集流面積值的空間分佈。但是隨著解析度的增加，單一固定的流向臨界值會使得整合式模式收斂水流的功用越趨薄弱，此時必須藉由降低流向臨界值達來到收斂水流的目的。根據本文的研究，透過與 DEM 解析度等比例的方式來調整流向臨界值，可使整合式模式得到較佳的模擬結果。在研究區的模擬結果顯示 40 公尺、20 公尺、10 公尺和 5 公尺解析度 DEM 之「較適流量臨界值」分別為：4,800m<sup>2</sup> (集水區面積五千分之一)、2,400m<sup>2</sup> (集水區面積一萬分之一)、1,200m<sup>2</sup> (集水區面積二萬分之一) 和 600m<sup>2</sup> (集水區面積四萬分之一)。

將整合式模式之模擬結果與真實地表河道比較後發現，以 5 公尺解析度之原始 DEM 進行「再採樣」之後所生產的較粗解析度 DEM 會因為資料損失而造成模擬結果的空間誤差。若是將模擬結果中「大集流面積網格」視為「河道單元」，則在 40 與 20 公尺解析度的模擬結果會產生「河道偏移」與「河道轉向」的現象。與目前台灣最常用之 40 公尺 DEM (TWDTM) 的模擬結果相比，發現經過「再採樣」所產生的 DEM，並不會對集流面積累積機率分佈造成誤差，但是卻會在空間產出的結果中形成上述兩種空間誤差。

本文由於資料取得之限制，目前僅在單一集水區進行試驗，所得模擬結果尚無法推展至台灣其他地區，因此本文所得初步結論包括：整合式模式可產出三種流向模式中最合理之結果、「再採樣」過後解析度效應對於模擬結果的空間分佈具有影響力、流向臨界值可隨 DEM 解析度等比例調整以產生「較適流向臨界值」等，均尚待未來有更多地區之較細解析度 DEM 資料產生後，得以繼續進行驗證。

## 謝 辭

感謝行政院水土保持局提供本文 5 公尺解析度之 DEM 資料進行模擬分析，並感謝審查委員對於本文初稿之指證與建議。同時對於學報編輯人員在稿件往返上的協助一併在此致謝。

## 引用文獻

- 黃誌川、徐美玲 (2001) 網格數值地形 (DTM) 的解析度以不同坡度計算方法之比較, *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。
- 張瑞津 (1997) 陳有蘭溪流域的地形環境與自然災害之關係, *中國地理學會會刊*, 25: 43-64。
- 蔡宗勳 (1994) 數值高度模型之地形量度研究, 國立台灣大學地理學研究所碩士論文。
- 賴進貴 (1994) 稜線及谷系自動析取的可行性分析和評估, 行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告, 計畫編號: NSC 82-0202-M-003-156T。
- 賴進貴 (1996) 數值高度模型與地形計測研究: 資料解析度問題, *國立臺灣大學地理系地理學報*, 20: 61-73。
- Costa-Cabral, M. C. and Burges, S. (1994) Digital elevation model networks (DEMON) : a model of flow over hill slopes for computation of contributed and dispersal areas, *Water Resources Research*, 30 (6) : 1681-1692.
- Gao, J. (1997) Resolution and accuracy of terrain representation by grid DEMs at a micro-scale, *International Journal of Geographical Information Science*, 11 (2) : 199-212.
- Garbrecht, J. and Martz, L. W. (1997) The assignment of drainage direction over flat surfaces in raster digital elevation models, *Journal of Hydrology*, 193: 204-213.
- Jenson, S. K. and Domingue, J. O. (1988) Extracting topographic structure from digital elevation model data for geographic information system analysis, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 54: 1593-1600.
- Martz, L. W. and Garbrecht, J. (1999) An outlet breaching algorithm for the treatment of closed depressions in a raster DEM, *Computer and Geosciences*, 25: 835-844.
- Moore, I. D., Lewis, A. and Gallant, J. C. (1993) Terrain attributes: Estimation methods and scale effect. In: Jakeman, A. J., Beck, M. B. and McAleer, M. J. C. (eds.) *Modelling Change in Environmental Systems*, New York : Wiley, 189-214.
- O'Callaghan, J. F. and Mark, D. M. (1984) The extraction of drainage networks from digital elevation data. *Computer Vision, Graphic and Image Processing*, 28: 323-344.
- Quinn, P. F., Beven, K. J., Chevallier, P., and Planchon, O. (1991) The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modeling using digital terrain models, *Hydrological Processes*, 5: 59-79.

- Quinn, P. F., Beven, K. J. and Lamb, R. (1995) The  $\ln(a/\tan \alpha)$  index- how to calculate it and how to use it within the TOPMODEL framework, *Hydrological Processes*, 9 (2) : 161-182.
- Tarboton, D. G. (1997) A new method for the determination of flow direction and upslope areas in grid digital elevation models, *Water Resource Research*, 33 (2) : 309-319.
- Wolock, D. V. and Price, C. V. (1994) Effect of digital elevation model map scale and data resolution on a topography-based watershed model, *Water Resources Research*, 30 (11) : 3041-3052.

93年 6月29日 收稿

93年 12月13日 修正

94年 3月25日 接受