

第三章 擷取河川網路模型之建立

3-1 數據

3-1-1 SRTM 數據簡介

本研究採用 2000 年太空梭雷達製圖任務(Shuttle Radar Topography Mission, SRTM)由美國 NASA-JPL 與德國太空中心(DLR)、義大利太空中心共同合作產製涵蓋全球 80%的數值高程模型。SRTM 系統掛載於 STS-99 太空梭上，完成 176 條軌道的飛行，其中 159 條軌道資料用於地形製圖，軌道傾角為 57 度，軌道高度 233 公里，在十一天之中觀測了 1000 個掃描帶寬，每個掃描帶寬長度從幾百公里到幾千公里不等，資料量達 12TB [Rabus et al., 2003]。目前公佈之 SRTM 地形資料分為一弧秒(SRTM-1)與三弧秒(SRTM-3)兩種，分別約略相當於 30 公尺與 90 公尺的空間解析度，SRTM-3 資料是由 SRTM-1 經 3x3 的平均遮罩產生，高程資料單位最小紀錄至公尺。SRTM 獲得的高程資料是以 WGS84 EGM96 geoid 為高程起算基準，所取得的描述面為 DSM。NASA 公佈的資料規範絕對高程精度為 10 公尺，絕對水平精度為 12.5 公尺。SRTM-3 資料以洲為單位釋出；SRTM 資料分為歐亞、北美、南美、非洲、澳洲、與其他島嶼等六個資料庫，共涵蓋北緯 60 度到南緯 57 度間全球所有陸地。而歐亞資料庫涵蓋範圍如圖 3-1 所示，包含了許多不同的地貌，西從不列顛群島、跨過阿爾卑斯山、西伯利亞、到中國大陸、西藏高原、印度、東至太平洋島弧，南至印尼群島，共包含 5940 個檔案，並涵了包含歐亞大陸與太平洋與印度洋上大部分的島嶼，最高處在喜馬拉雅山聖母峰 8848 公尺。而 SRTM-1 資料只釋出美國本土的資料，並需由 NIMA 同意後才能取得。

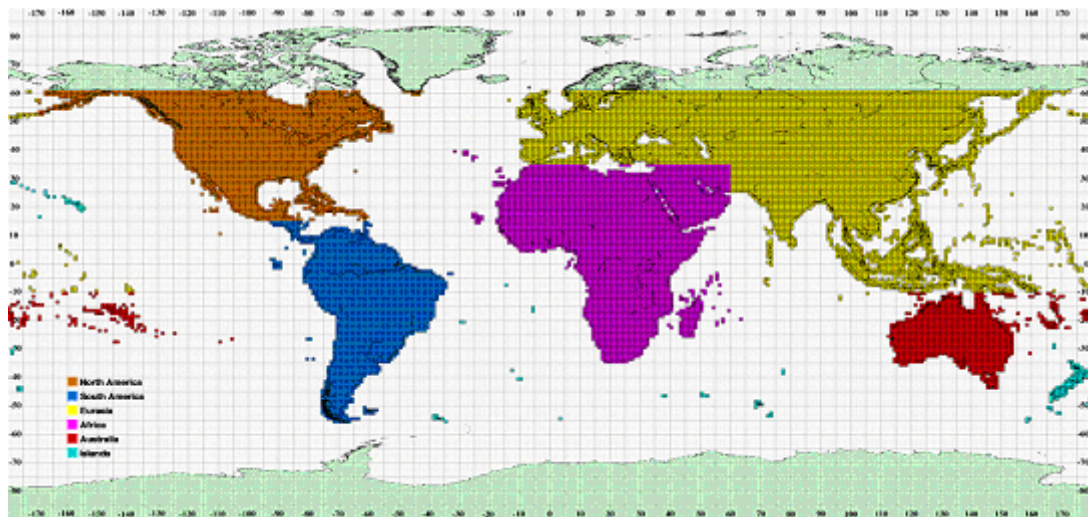


圖 3- 1：SRTM 資料庫涵蓋圖 [NASA-JPL, 2003]

SRTM 對掃描範圍內 99.96%陸地有一次取像，94.59%有兩次取像，50%的地區有三次以上取像，其目的是以兩種不同的角度進行觀測，以填補因遮蔽造成的資料空缺[NASA-JPL, 2003]。本研究的區域，是位於在大西洋火環的臺灣地區，從圖 3-2 可知，是經過二次資料獲取的地區。

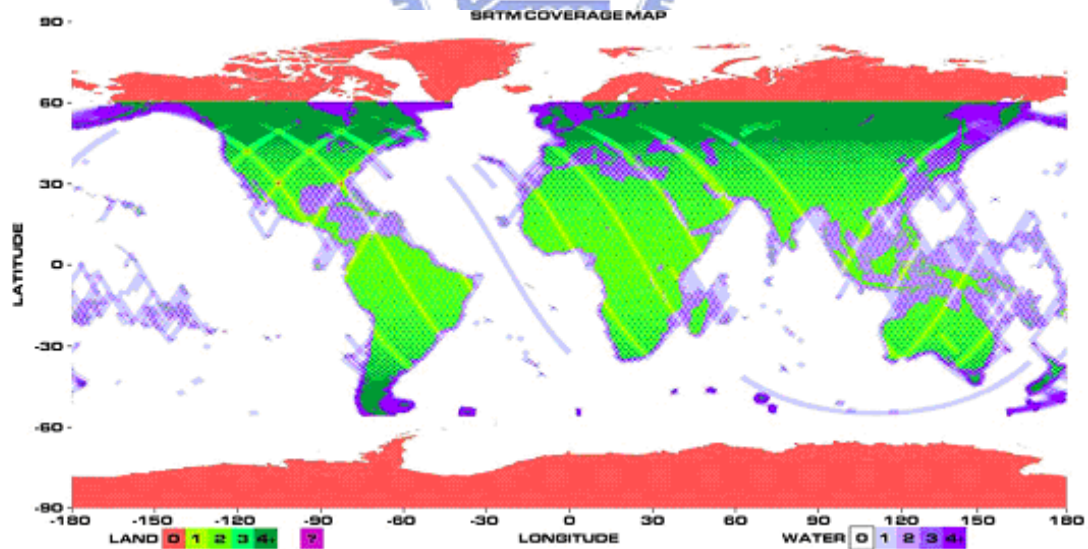


圖 3- 2：資料獲取次數圖[NASA-JPL, 2003]

3-1-2 實驗區域及其他預處理

SRTM 經轉檔、接合與裁切後，臺灣地區 SRTM DEM 網格數為 2384 x 4195，高程值分佈從-70 到 3917 公尺，陸上高程點數為 4,638,351 點，其中資料空缺點數為 165,231 點。臺灣本島的數據雖然是位於經過二次資料獲取的地區，但受到陰影效應影響產生許多資料空缺點，資料空缺率為 3.564%，其中資料空缺點的值標示為-32768[賴子銘，2004]。檢視 SRTM DEM 中資料空缺的情形時，中央山脈附近有較密集的資料空缺情形發生，而且東邊的山坡資料空缺的發生較為頻繁，是受地形影響造成的陰影效應，與載具觀測路線有關。河流、湖泊等水體也會因地物平滑度性質造成沒有回訊。臺灣本島的 SRTM DEM 數據由十個檔案組成，列於表 3-1。

表 3-1：臺灣地區 DEM 組成檔案

檔案名稱	高程最小值(m)	高程最大值(m)
N21E120.HGT	-34	341
N21E121.HGT	-19	226
N22E120.HGT	-68	3035
N22E121.HGT	-26	2912
N23E120.HGT	-49	3917
N23E121.HGT	-43	3812
N24E120.HGT	-56	2439
N24E121.HGT	-37	3860
N25E120.HGT	-16	21
N25E121.HGT	-70	1102

台灣地區 SRTM_DEM 為地形的特殊性使得遮蔽效應影響嚴重，同時亦因少部分的水體如：湖泊、水塘以及河流等，造成 DEM 資料的遺漏。本研究使用距離反比權重法(Inverse Distance Weighted; IDW)分別產生解析度 90(40MB)、

250(5MB)、500(1MB)及 1000(0.5MB)公尺解析度的網格資料，如圖 3-3。採用之加權系數為 2 次方。

Arge et al.(2001)實驗發現，由 TauDEM 以及 GRASS 軟體在 CPU 為 Intel P3 1GB、記憶體 1GB、硬碟 8GB10000RPM 下計算河川網路流向及集水區，資料量 50MB 約需要 30 天與 40 天以上的時間，台灣地區 DEM (SRTM-3)經內插處理後資料量大約 40MB，並考量後續進行計算時間上選擇前置作業較為省時便利，且 IDW 屬於較區域性的推估方法，每一個在給定範圍內的樣本點其特質皆會表現出來，可以獲得不錯的成果。

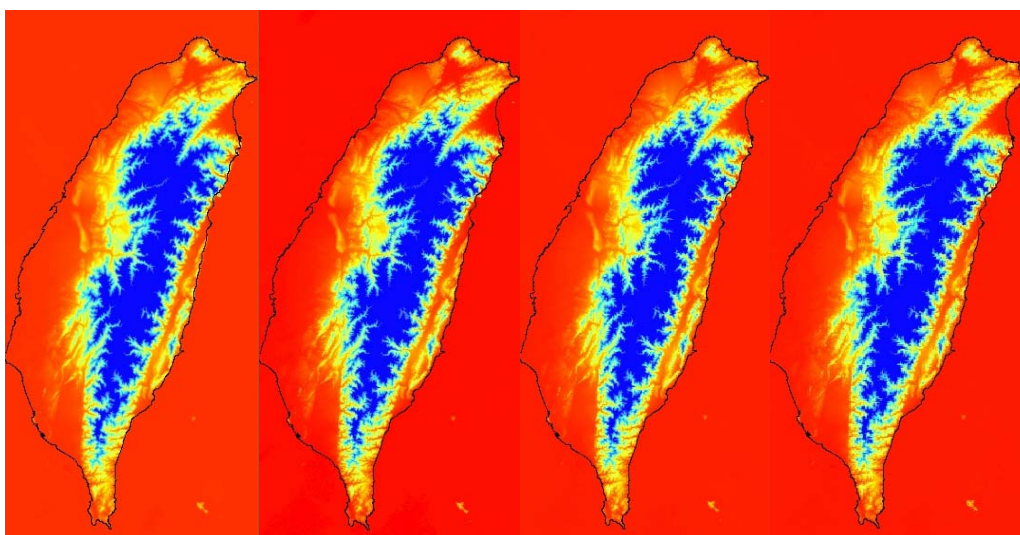


圖 3-3:台灣地區經 IDW 內插所得網格，由右至左為 90、250、500、1000 公尺解析度。

3-2 實驗步驟

本研究應用 SRTM 台灣地區 DEM 進行不同演算法的計算，推求台灣地區的河川水系網路。主要計算方式係將指定格點與周圍鄰近格點作相對屬性之判斷，例如流向之決定，依序將格點之高程資料與周圍相鄰格點之高程作一比較，計算出權重落差，權重落差值大的即為往下游流動之方向。當研究目標內的各點之流向決定後，即可定出目標區域內的任一位置點至集水區出口之唯一的一條逕流路徑，並可以進一步的劃分出集水區之分水嶺與河川網路結構等，而後可以逐一計

算出後續水文模擬所需要的資訊，如集水區面積、河川形狀、河川長度、河川級數等因子。圖 3-4、3-5 為 TauDEM 與 r.watershed 的計算流程，其中 GRASS 相關指令於附錄 A 中說明。

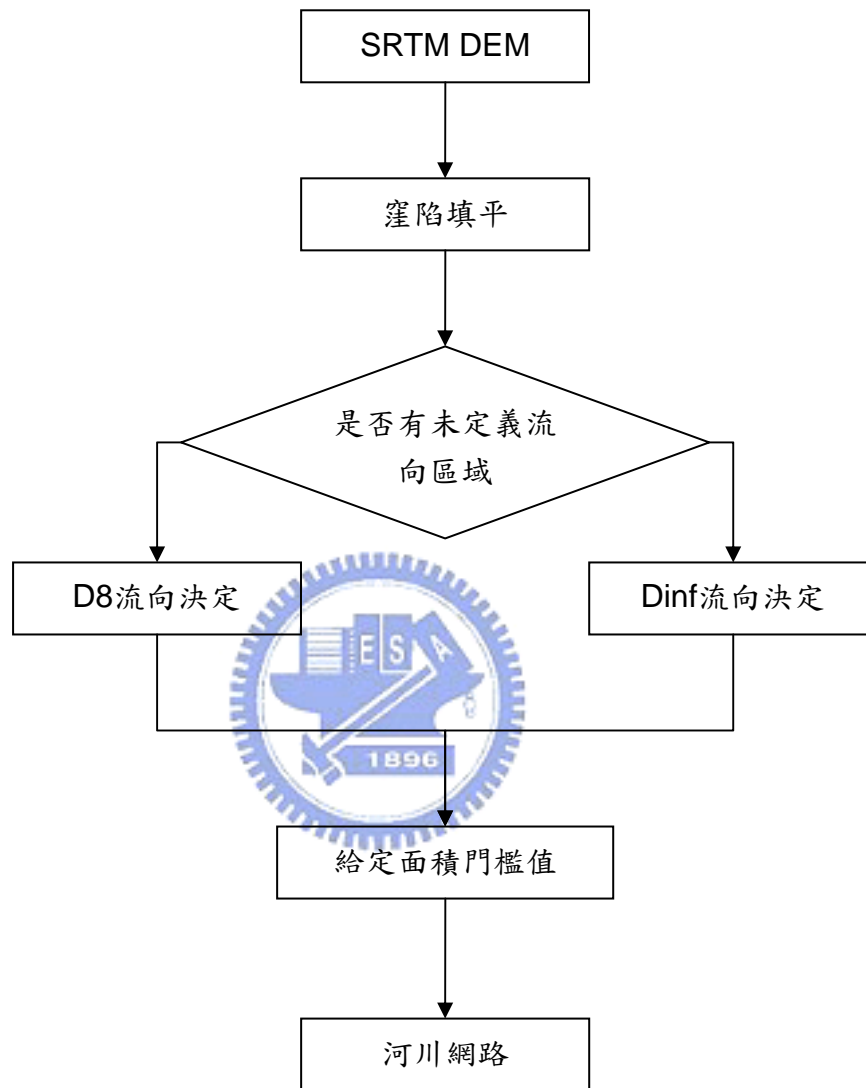


圖 3-4：TauDEM 計算河川網路之流程圖

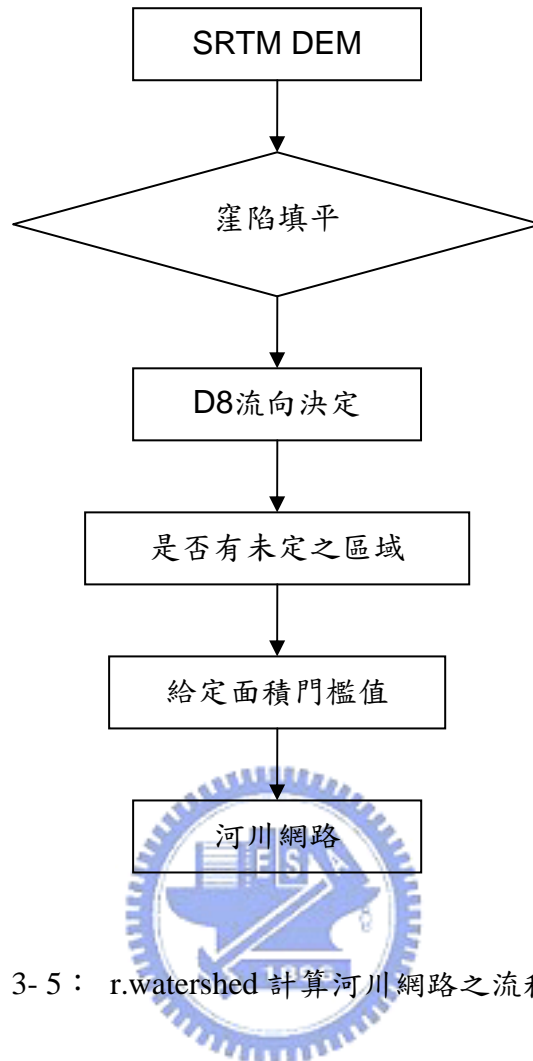


圖 3-5： r.watershed 計算河川網路之流程圖

3-2-1 窪陷填平

以數值高程資料求取流域之地文因子，首先要克服所謂的窪陷(depression)問題[水規所，2003]。窪陷是指在任意的 3×3 的網格視窗中，中心格點之高程均較周圍八個格點高程為低，因此流入此中心格點網格內的水流，無法藉由格點間的高程比較決定其流向，水流以此無法流向下游網格而形成窪陷的情形。由上述的定義可知，除了單一格點的窪陷外，面積較大的平坦區域也可視為窪陷。一般而言，數值高程資料當中有將近 10% 的部分屬於窪陷或平坦地區[Martz and Garbrecht, 1993]。在未經過處理的窪陷格點會使得流向指回原來的格點，讓計算機程式執行的時候發生錯誤。在 DEM 上所描述的水平區域，在實際地形上並不一定是真正有一大塊平坦地形，常常是受限於測量時之解析度或是由於資料本身的錯誤或缺失而形成，因而在數值高程資料中這些連續相鄰的格點有相同的高程

值，進而在計算流向的過程中無法決定該相關像元的流向。在實際的地形上水流遭遇窪陷區域會產生窪蓄現象，待此窪陷地形被水填滿後才繼續的向下游流動，如圖 3-6。所以在決定每一格點的流向時，必須先處理數值高程資料中的窪陷部分[水規所，2003]。研究學者曾以指定像元之高程與周圍像元之高程取加權平均，以平滑數值高程資料的方法欲將窪陷部分消除，但對於面積較大且無法決定流向之區域，此類演算法即無法完成作業[O'Callaghan and Mark, 1984]。

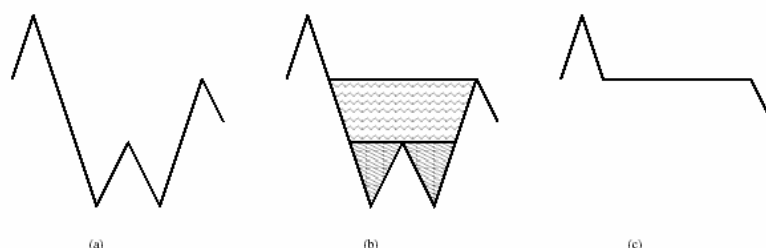


圖 3-6：於窪陷地形產生窪蓄現象進而決定流向[Arge et al., 2001]。

3-2-1-1 GRASS_r.fill.dir 擷取河川網路模型之窪陷填平部分

在 GRASS 之操作部分採用 r.fill.dir 做為擷取河川網路之第一步驟，其中 r.fill.dir 採用 Jenson and Domingue (1988)所提出之演算法進行窪陷填平，其步驟如下：

- 1 搜尋高程資料模型中任一像元與周圍格點之高程比較，若任意一格點有窪陷情形則將其高程以周圍最低格點之高程取代。此步驟可簡化其後的程序。
- 2 利用 O'Callaghan and Mark (1984)所提 D8 單流向法決定流向。
- 3 於空間像連續相連的像元，若無法定義出各網格之流向，則認定該無法決定流向之區域為問題區域。於此再次進行步驟一的窪陷填平，使得問題區域完全消失。
- 4 數值高程資料在經過窪陷填平的程式後，才可以進行後續的計算。

上述的步驟同時解決了在計算河川流向網路時所遭遇到窪陷的問題以及平坦地區無法決定流向的問題，以圖 3-7，以簡單的流程圖表示。

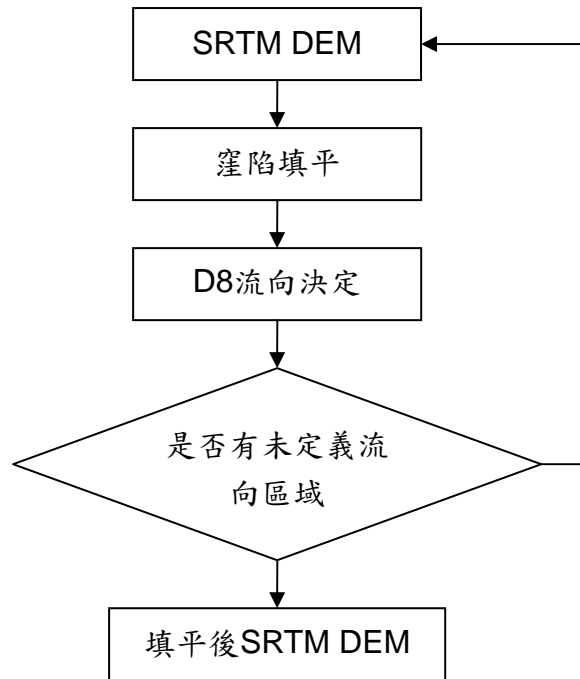


圖 3-7：r.fill.dir 演算流程。

3-2-1-2 ArcGIS_TauDEM 擷取河川網路模型之窪陷填平部分

DEM 窪陷區域的問題於 Tarboton(2002)與在 Jenson and Domingue (1988)演算法中部分一致，均可視為無法用 8 個有效的代表流向表示一個網格或相互連結的一系列網格。DEM 窪陷區域的消除可以採用”水淹法”，宛如向窪陷區注水待水位達某一高度時，水流就會以窪陷區邊界最低點外洩而出，這樣便可以將窪陷區域填平。對於窪陷區填平所產生的平坦區域或者 DEM 資料中原先存在的平坦地區，採用高程增量迭加法來決定流向，即平坦網格單元的數字高程微量的調高讓整個研究區域內各網格的流向合理，這種處理方法避免了任意設置排水路徑的弊端。

高程增量迭加法將經過窪陷區域填平處理後的 DEM 數陣稱做數陣 A，數陣 B 則為數陣 A 的拷貝。首先搜尋數陣 A 中的每一個單元，檢查是否存在四周高、中心低的窪陷點，如果存在，則重複上述窪陷填平步驟；如果不存在，則說明窪陷點已被填平，且該單元為平坦區域的一部分，在對應數陣 B 中的對應單元迭加 0.001M。如果存在則重複窪陷填平步驟。一但數陣 A 中搜索到平坦區域，數

陣 B 中對應單元高程就增加 0.001，將對應數陣 B 中的數據取代數陣 A 中的數據，並繼續重複搜索數陣 A，直到平坦區域不存在為止 [Martz and Garbrecht,1998]。每完成一次搜索都在找到的平坦區域內迭加一個高程增量，如按照最陡坡度的方法能夠確定平坦區域內任一網格的流向，則完成了完整的窪陷填平步驟。圖 3-8 以簡單的流程圖表示。

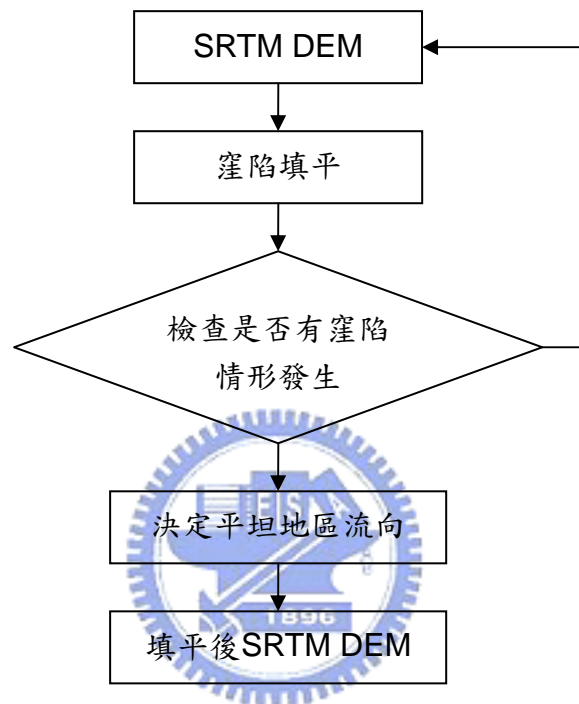


圖 3-8：TauDEM 窪陷填平(Fill Pits)演算流程。

3-2-2 流向決定與集水區之劃分

3-2-2-1 GRASS_r.watershed 擷取河川網路模型之流向決定

數值高程模型(DEM)其中內部任意一格點的流向為水體離開該格點的方向，為了便利於電腦資料的儲存 Jensen and Domingue(1988)將周圍八個方向以數字為代碼表示如 1、2、4...128，流向以 2 的冪級數表示；於 r.watershed 系統中八個方向代碼表示如 1、2、3...8，如圖 3-9。式為比較中間格點 X 與周圍八個格點之高程，高程最低的格點所在位置即為 X 格點的流向。例如水流由像元 X 位置流向東北方，則以 1 為表示 X 的流向。

64	128	1
32	X	2
16	8	4

4	3	2
5	X	1
6	7	8

圖 3-9：左圖為 D8 流向編碼，右圖則為 r.watershed 與 TauDEM 內流向編碼。

在 Jenson and Domingue(1998)決定流向時有下列數種可能情況發生：

- 1 當中間格點之高程較周圍像元高程為低的時候，此時格點之流向為負值，為一個未定義之流向，表示該像元為窪陷。
- 2 中間格點之高程值減去周圍格點之高程，除以中間網格與周圍網格之間的距離，所得到的值稱為權重落差(distance weighted drops);此指定格點之流向即為權重落差值最大的方向。例如若此中間格點的流向指向東南西北四個方向之任一方向，則高程差必須除以 1；若此中間格點的流向指向四個角落中任一方向，則高程差必需除以 $\sqrt{2}$ 。
- 3 當有兩個或兩個以上的周圍格點有相同的最大權重落差，則先任意選擇其一為中間網格之流向，並判斷該流向是否會在流回此中間格點。若會使水流回到此中間格點，則排除此格點，反之則保留此周圍格點；如果保留的周圍格點數目大於 1，則取流往其中任一格點之方向為其流向；若是保留的周圍網格數等於 1，則選取流往此格點之方向為其流向。

在經過窪陷填平步驟之數值高程資料中進行流向的決定時，其中每一個格點內的水流均有流至數值高程資料邊界的唯一路徑，也就是每一個格點均可以定義出各自的流向。

3-2-2-2 TauDEM 擷取河川網路模型之流向決定

Tarboton(1997)認為在計算集流面積時，因盡量避免流域面積的發散現象，提出 Dinf 無限流向法，整合單流向與多流向的優點。如圖 3-10，在 3*3 網格中，中心網格與其他周圍八個網格形成八個平面三角形，依序計算各個三角形的坡度

並以最大三角形坡度作為該中心網格的坡度，且三角形坡向即為網格流向，該坡度坡向為主要依據，依照比例決定下游網格所分配得到累積面積值。

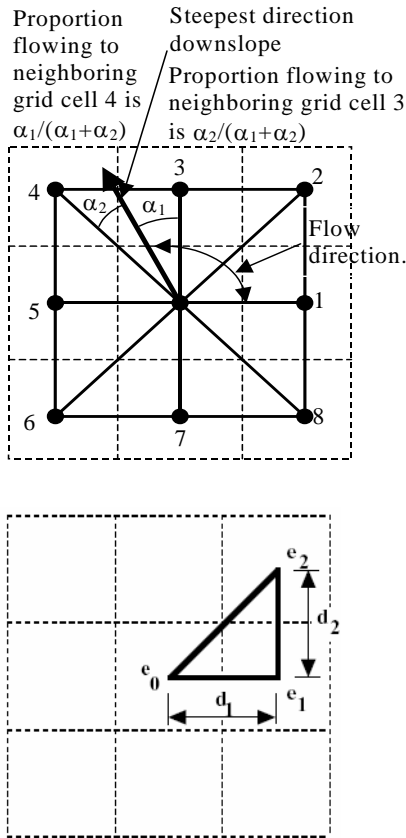


圖 3- 10：Dinf 決定流向方法[Tarboton, 1997]。

$$s_1 = (e_0 - e_1) / d_1 \dots\dots\dots(2-1)$$

$$s_2 = (e_1 - e_2) / d_2 \dots\dots\dots(2-2)$$

$$r = \tan^{-1}(s_2 / s_1) \dots\dots\dots(2-3)$$

$$s = \sqrt{s_1^2 + s_2^2} \dots\dots\dots(2-4)$$

$$\text{if } r < 0, \quad r = 0 \quad s = s_1 \dots\dots\dots(2-5)$$

$$\text{if } r > \tan^{-1}(d_2 / d_1), r = \tan^{-1}(d_2 / d_1), s = (e_0 - e_2) / \sqrt{d_1^2 + d_2^2} \dots\dots\dots(2-6)$$

找出中心網格與周圍網格所形成的三角形中坡度最大的一個，利用上述 2-1 至 2-6 式求出流出方向，在依比例決定流入下游網格之比例。

3-2-2-3 r.watershed 與 TauDEM 集水區之劃分

集水區則是指降水落於此區域內任一個位置，均可以循一定的路徑流至集水區出口處。所以在任何一組的數值高程資料中指定某一個像元為欲劃分集水區之出口點，利用之前所建立的流向資料，即可搜尋數值高程資料中，有些格點會依循流徑經過此出口位置，藉此便可劃分出以該出口為主的集水區範圍。

3-2-3 流徑累積值決定

SRTM 台灣地區數值高程資料分別經過 r.fill.dir 與 TauDEM 定出每一個格點的流向後，則每一個格點皆有唯一流徑由其所在位置至集水區的出口處。O'Callaghan and Mark(1984)定義流徑累積值(flow accumulation value; FAV)為任一個指定格點之格點流入個數，於實際地形集水區之邊界或為地表之稜線該處的流徑累積值為 0 表示沒有任何像元流過；指定像元之流徑累積值為非整數值，此像元為利用 TauDEM 之 Dinf 計算流向所得之結果，FAV 為 0.5 表示有 0.5 個格點流入；指定格點之流徑累積值為 1 表示有一個像元流入此格點，流徑累積值為整數則有可能是使用 TauDEM 或者 r.fill.dir 計算得之結果。由此定義可知，任一指定像元之流徑累積值乘以單一像元面積等於該指定像元集水區之面積，該指定格點為集水區之出口。因此指定格點之流徑累積值與單一像元面積之乘積可以解釋為此指定像元之集流面積[鄭璟生，2001]。

本研究使用 SRTM 台灣地區 DEM 為擷取河川網路之數據，擷取之初須先對研究區域進行上述的窪陷填平、流向決定、流徑累積值計算等步驟，並依據面積門檻值 300 個像元點對應 1/25,000 之數化河川網路以及面積門檻值 500 對應 1/50,000 之數化河川網路之經驗[水規所，2003]。

3-3 對照組數據

本研究區以台灣本島內各大河川為目標，為了與由本實驗所得之結果作參考比對，而選擇了銳悌科技利用內政部臺灣地區經建版地形圖所生產的1/25000電子地圖，其中將原圖分為縣市界、鄉鎮界、道路、鐵路、水系、建築區、重要地

標與註記等幾個圖，圖層分類於附錄B說明。圖3-11為銳梯所生產的1/25000電子地圖淡水河與頭前溪流域之主流，淡水河與頭前溪流域之主流長於表3-2。集水區部份則與經濟部水利署公佈之台灣重要河川之水系表作參考資料，如表3-3淡水河水系表。



圖 3- 11：實驗區淡水河以及頭前溪

表 3-2：內政部 1/25000 地形圖之研究區域主流長。

研究區域	主流長(m)
淡水河	157463.83
頭前溪	67922.729

表 3-3：淡水河水系表[經濟部水利署公佈之河川水系表]

發源地	品田山(標高3,529，位於新竹縣及台中縣交界)
主要支流	大漢溪、新店溪、基隆河、三峽河、景美溪、北勢溪、 疏洪道
	流域面積2,726平方公里 幹線長度158.7 計畫洪水量23000秒立方公尺
平均坡度	1：122

3-4 實驗成果

研究區主要為淡水河流域以及頭前溪流域，實驗所得之研究區的空間圖形資料中含有網格式和向量式兩種，在進行後續水系之成果評估以及分析均以向量式資料結構為主。網格式資料包含原始DEM資料，以及將DEM資料經r.watershed計算處理後所得的河川網路以及集水區數據。圖3-12至3-15為TauDEM所計算出Slope、Dinf流向、D8流向以及面積累積圖，90公尺解析度於淡水河及頭前溪流域最大坡度為74.52度；250公尺解析度於全台灣之坡度最大為74.99度；500公尺解析度於全台灣之坡度最大為65.01度。圖3-16、3-17為r.watershed計算出之流域面積累積圖(th=100)及D8流向圖。

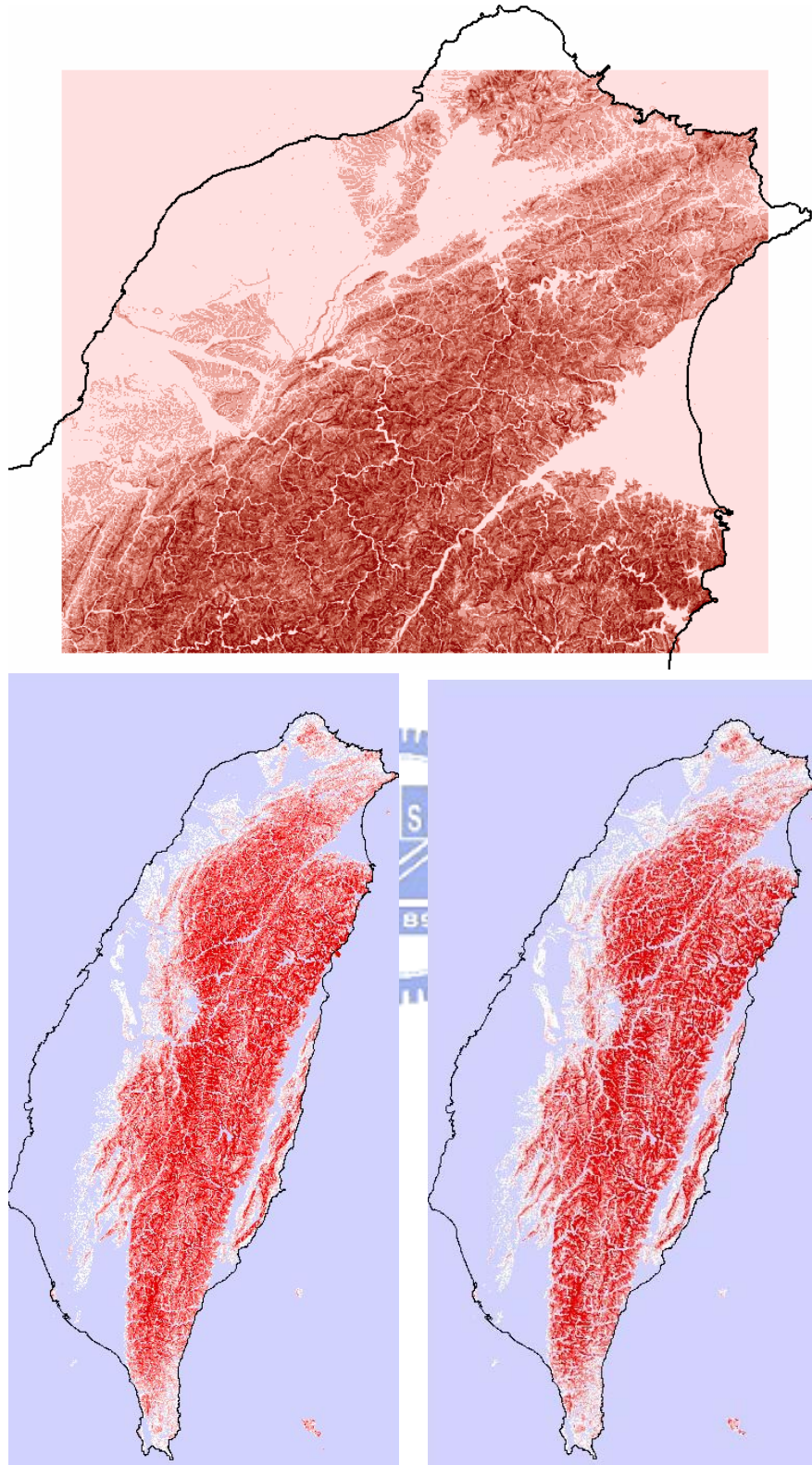


圖 3- 12： TauDEM 所產製 Slope 圖，上圖：空間解析度為 90 公尺，淡水河及頭前溪流流域之坡度圖。下圖左：空間解析度為 250 公尺，全台灣流域之坡度圖；下圖右：空間解析度為 500 公尺，全台灣流域之坡度圖。

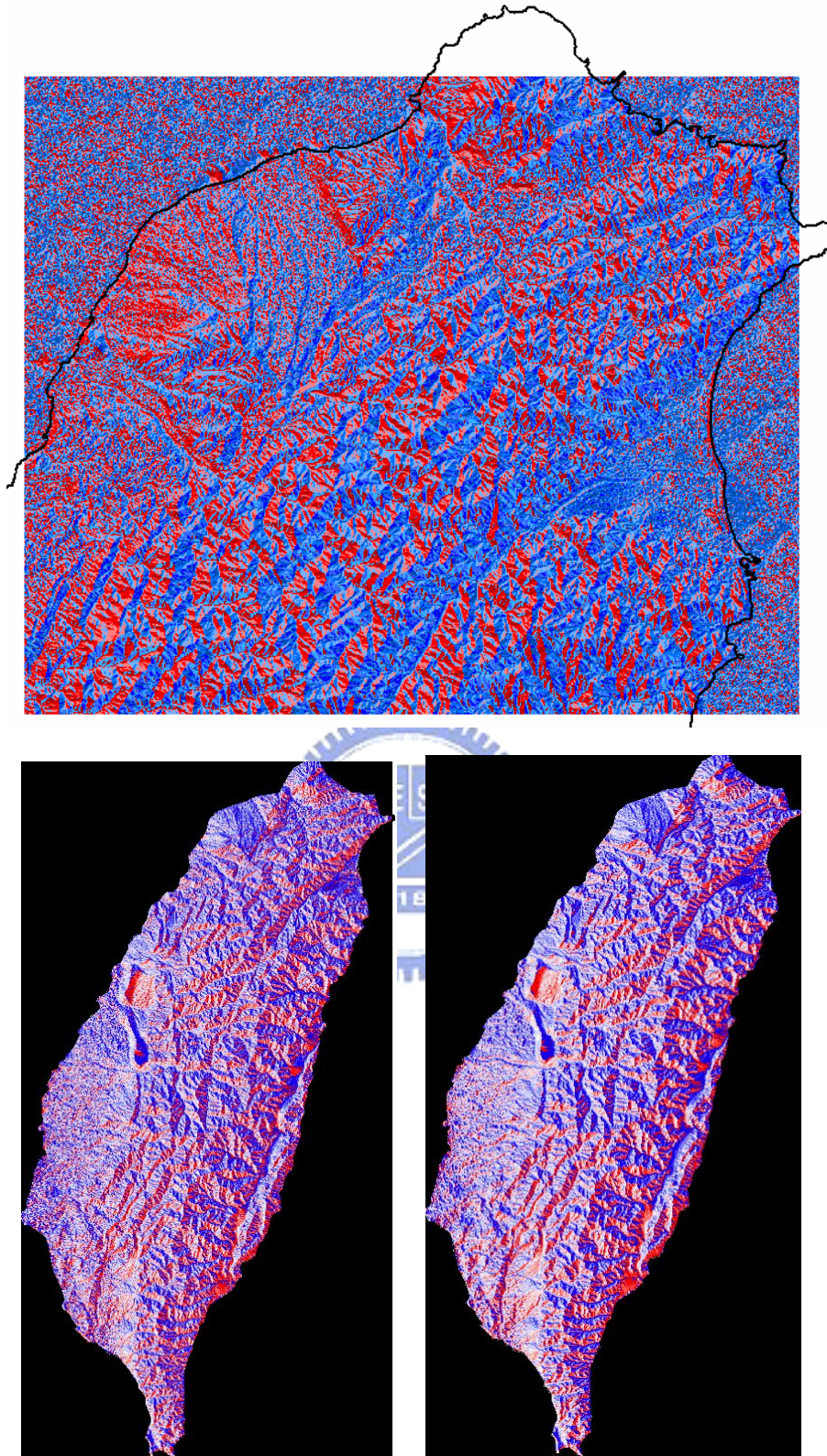


圖 3- 13：TauDEM 所產製 Dinf 流向圖，上圖：空間解析度為 90 公尺，淡水河及頭前溪流流域之 Dinf 流向圖。下圖左：空間解析度為 250 公尺，全台灣流域之 Dinf 流向圖；下圖右：空間解析度為 500 公尺，全台灣流域之 Dinf 流向圖。

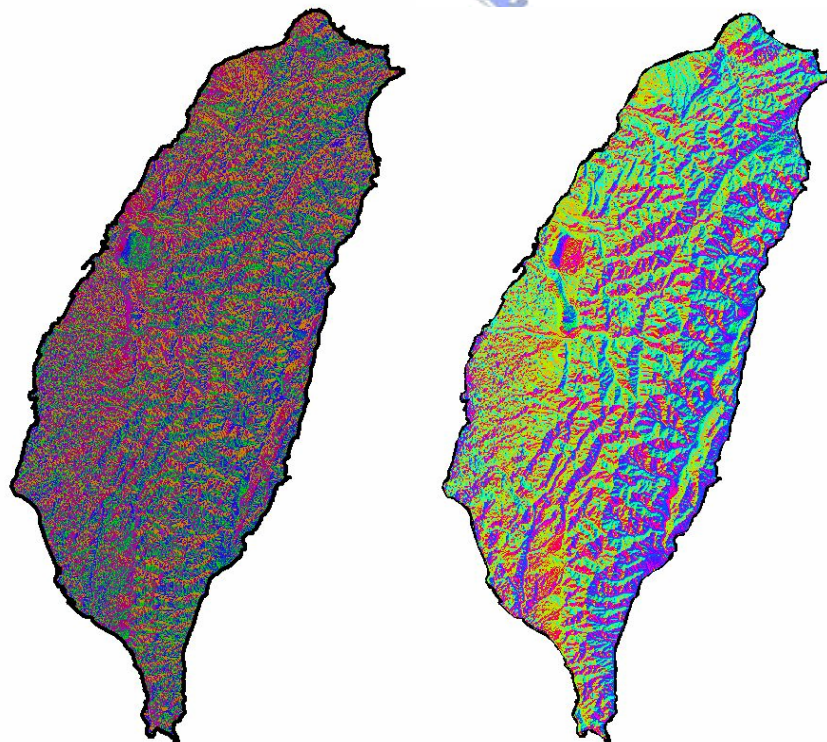
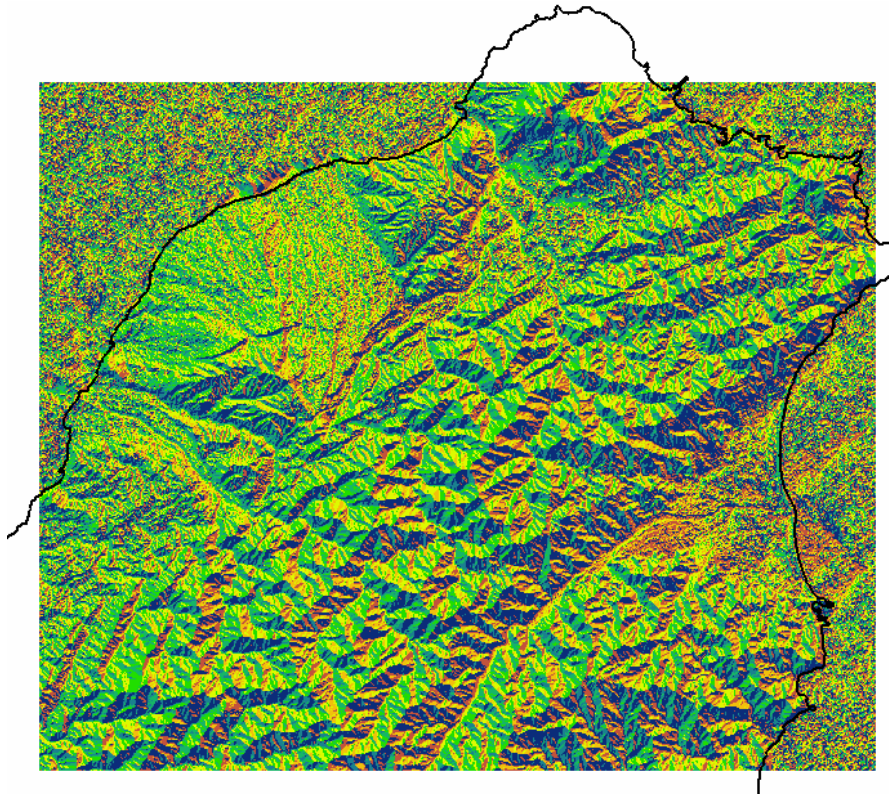


圖 3- 14：TauDEM 所產製 D8 流向圖，上圖：空間解析度為 90 公尺，淡水河及頭前溪流流域之 D8 流向圖。下圖左：空間解析度為 250 公尺，全台灣流域之 D8 流向圖；下圖右：空間解析度為 500 公尺，全台灣流域之 D8 流向圖。

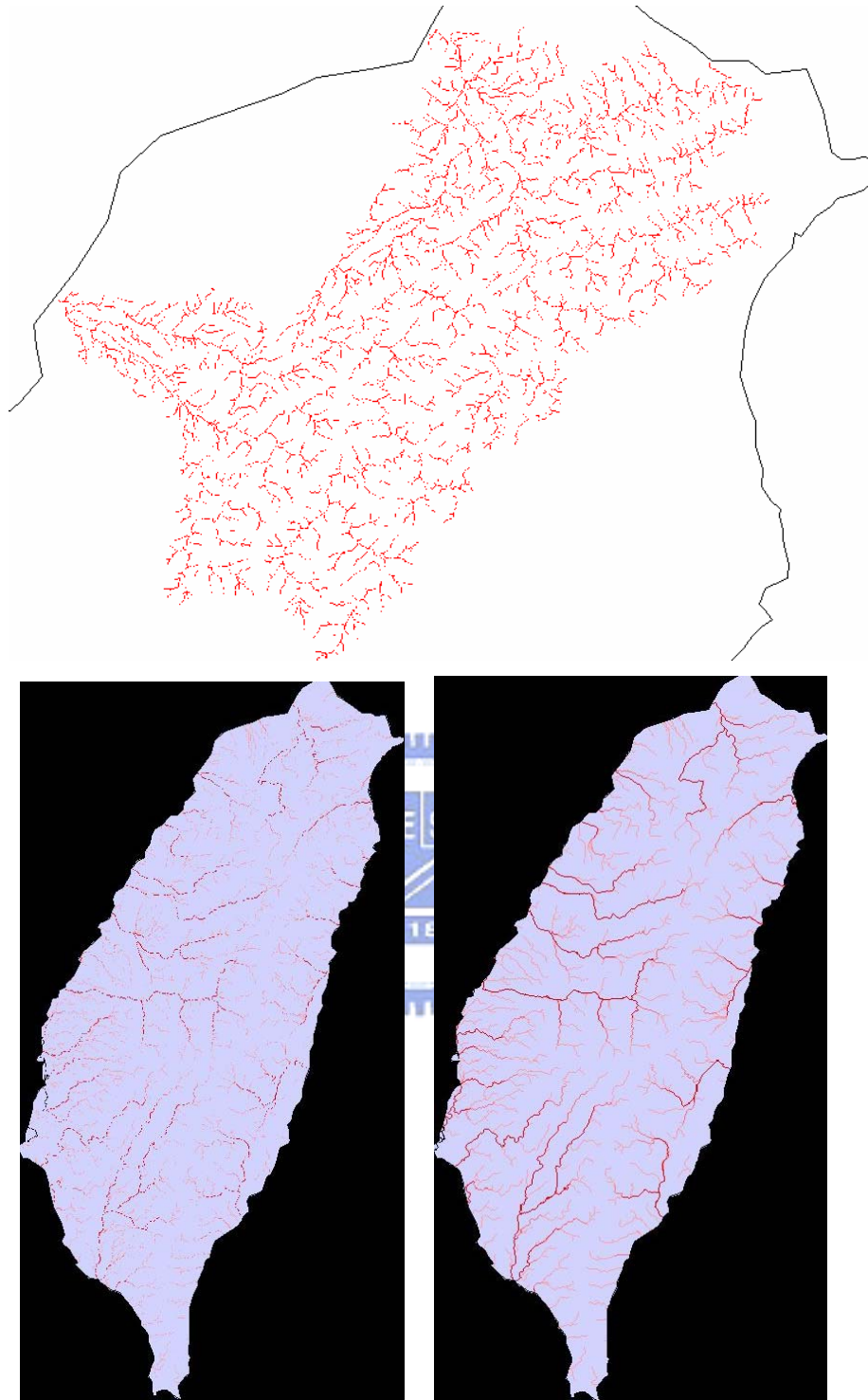


圖 3- 15：TauDEM 所產製流域面積累積圖，上圖：空間解析度為 90 公尺，淡水河及頭前溪流域之流域面積累積圖。下圖左：空間解析度為 250 公尺，全台灣流域之流域面積累積圖；下圖右：空間解析度為 500 公尺，全台灣流域之流域面積累積圖。

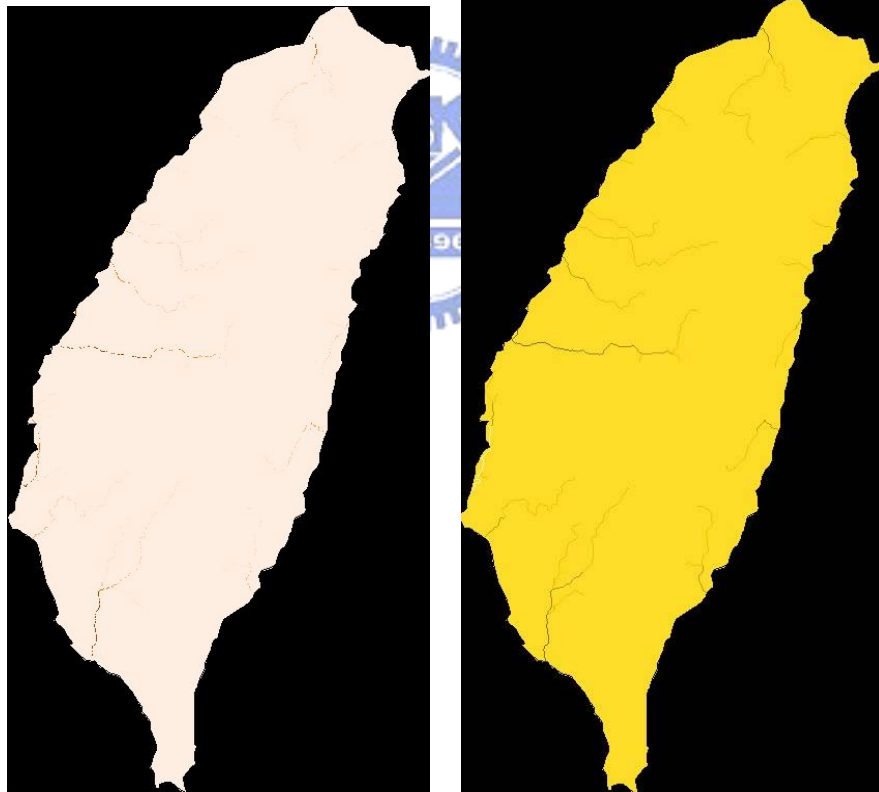
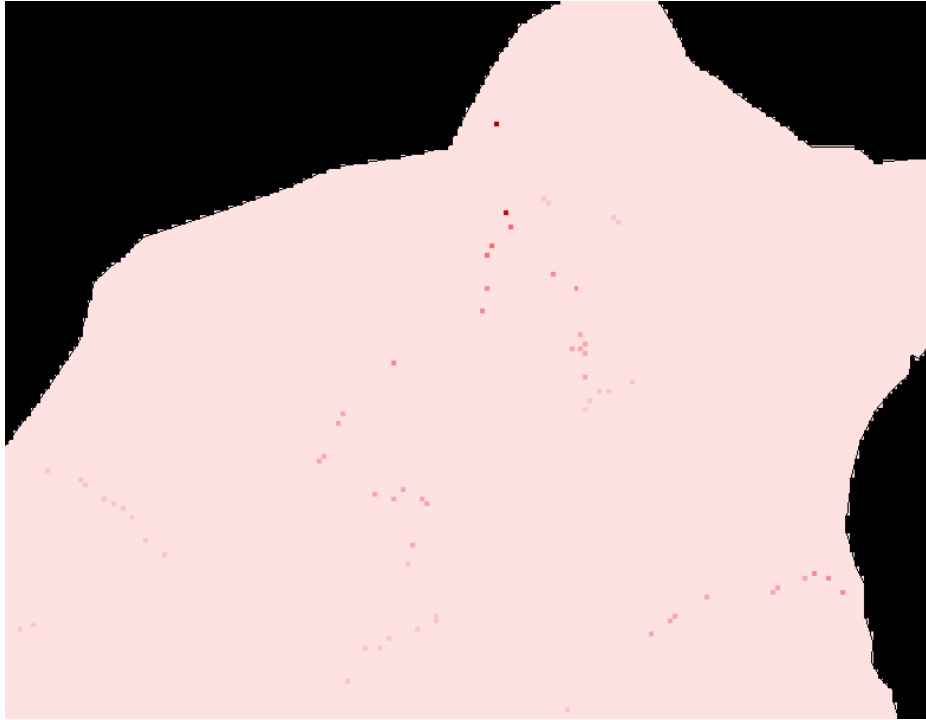


圖 3- 16：r.watershed 所產製流域面積累積圖，上圖：空間解析度為 90 公尺，淡水河及頭前溪流流域之流域面積累積圖。下圖左：空間解析度為 250 公尺，全台灣流域之流域面積累積圖；下圖右：空間解析度為 500 公尺，全台灣流域之流域面積累積圖。

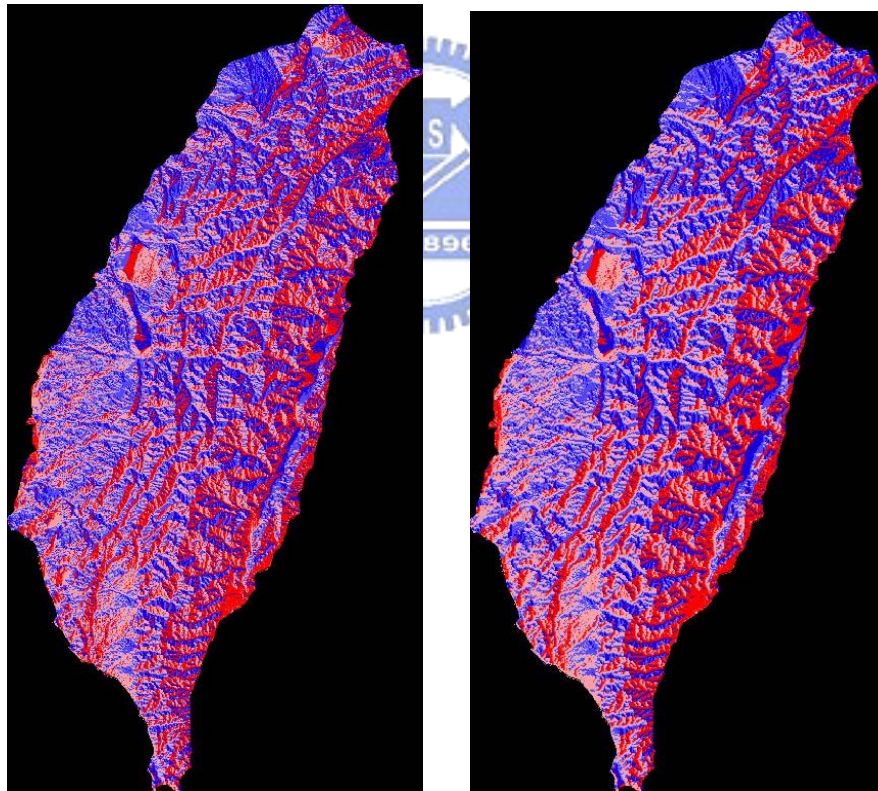
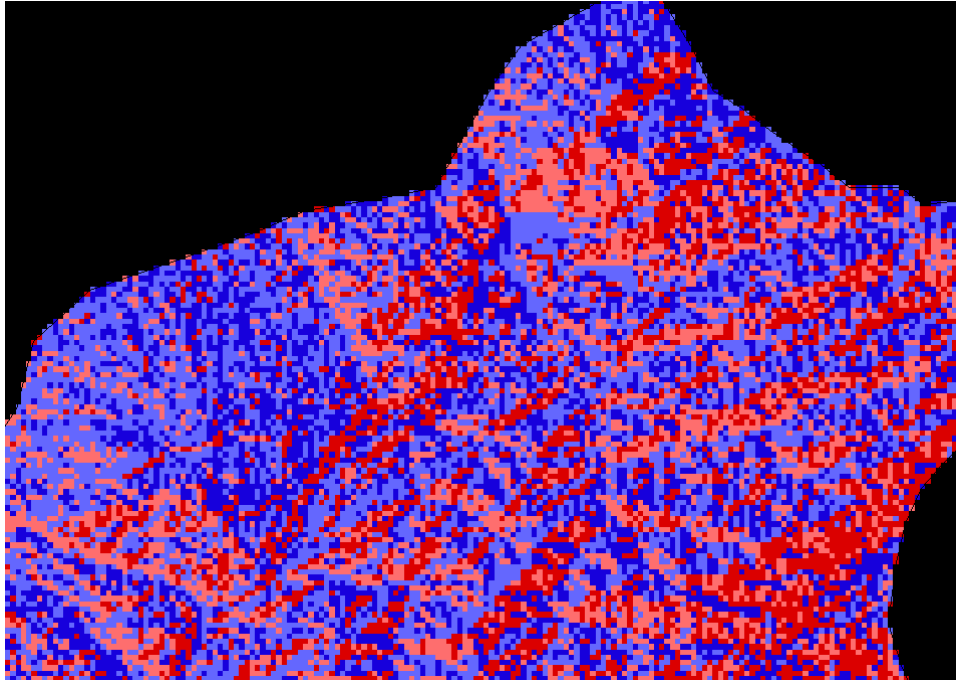


圖 3- 17：r.watershed 所產製 D8 流向圖，上圖：空間解析度為 90 公尺，淡水河及頭前溪流流域之 D8 流向圖。下圖左：空間解析度為 250 公尺，全台灣流域之 D8 流向圖；下圖右：空間解析度為 500 公尺，全台灣流域之 D8 流向圖。

圖3-18至3-20為由TauDEM計算出之淡水河與頭前溪流域之水系及集水區圖。圖3-21至3-23為由r.watershed計算出之淡水河與頭前溪流域水系及集水區圖。由於面積門檻值300個格點對應1/25,000之數化河川網路以及面積門檻值500對應1/50,000之數化河川網路之經驗[水規所，2003]。上述經驗值作為本實驗調整門檻值之標準，並嘗試不同門檻值所得之各種水文因子與對照資料進行進一步的比對分析。



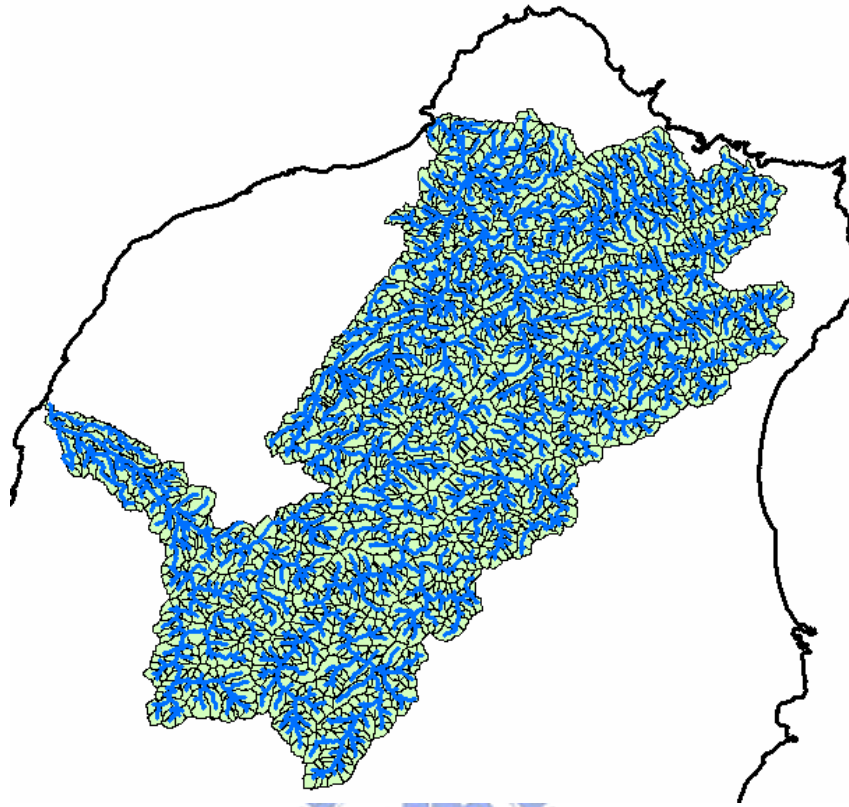


圖 3- 18：TauDEM 淡水河與頭前溪流域， $th=100$ ， $90*90$ 公尺。

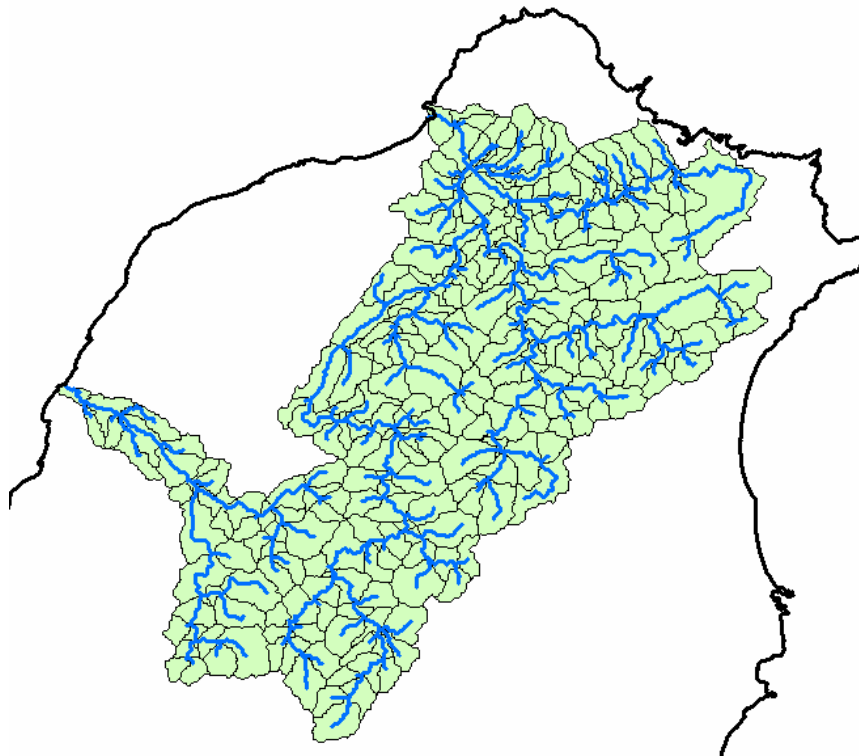


圖 3- 19：TauDEM 淡水河與頭前溪流域， $th=100$ ， $250*250$ 公尺。

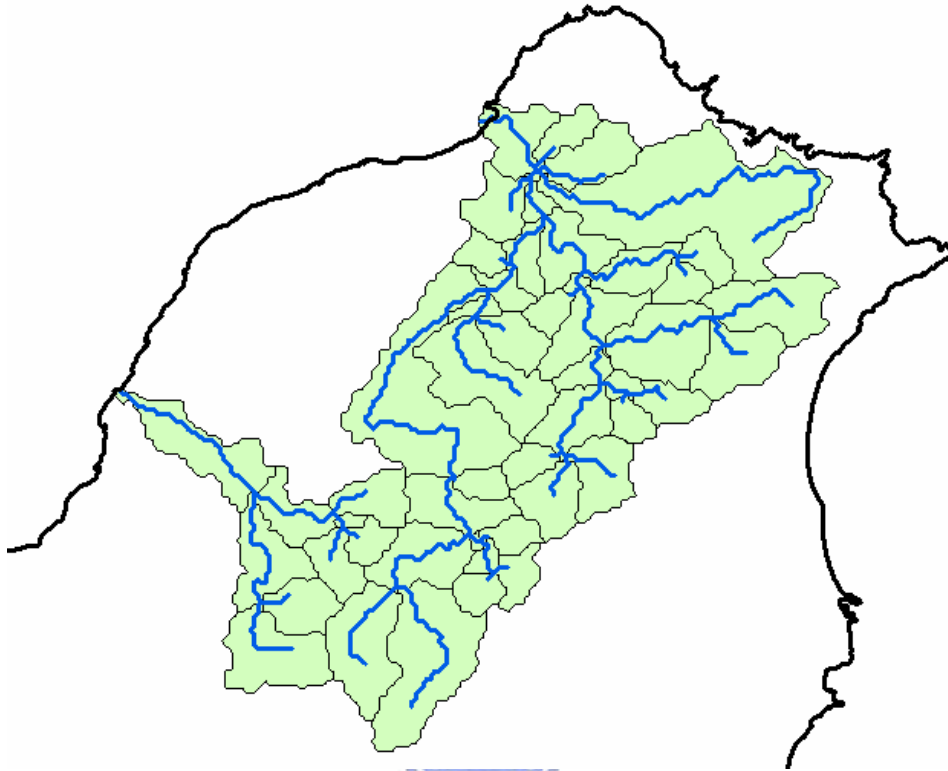


圖 3-20：TauDEM 淡水河與頭前溪流域， $th=100$ ， $500*500$ 公尺。

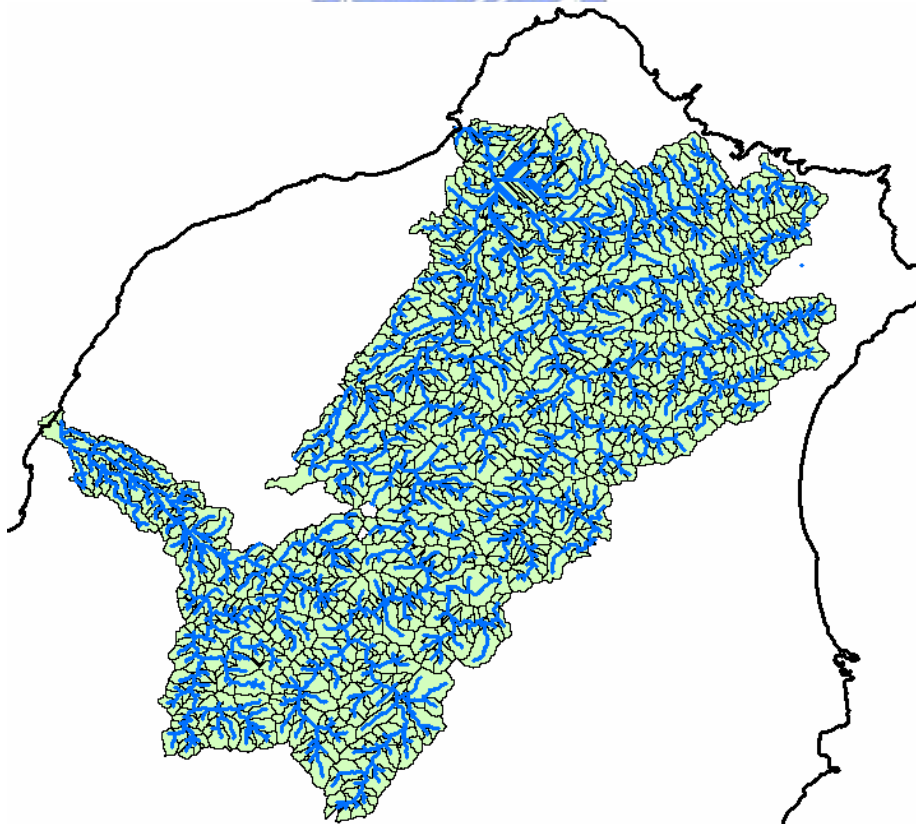


圖 3-21：r.watershed 淡水河與頭前溪流域， $th=100$ ， $90*90$ 公尺。

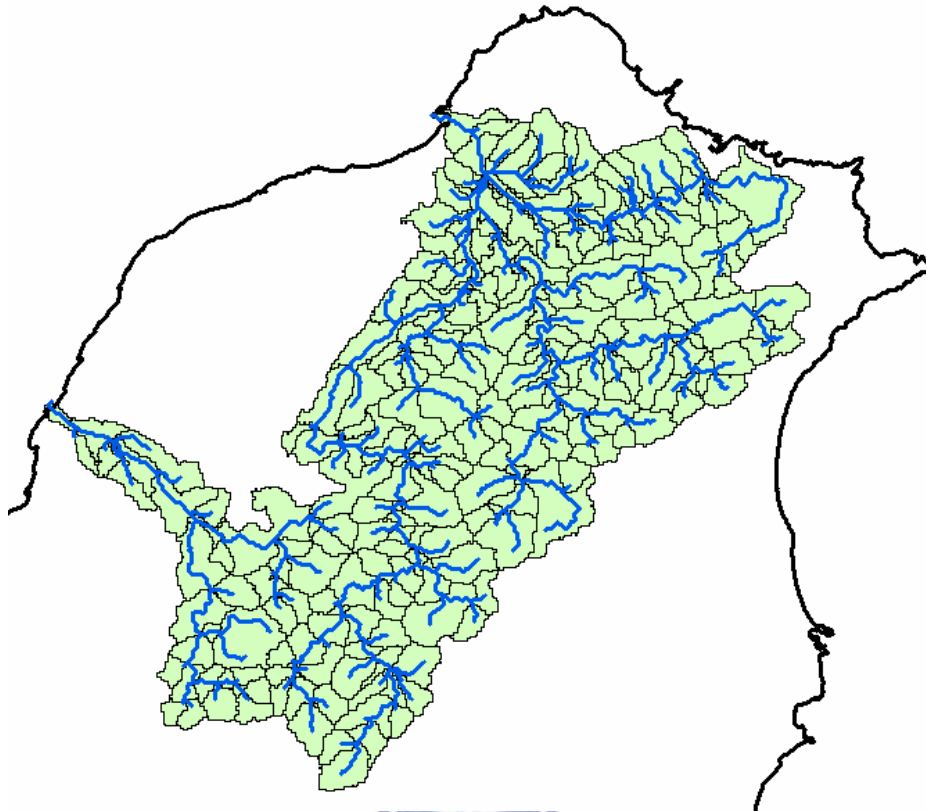


圖 3- 22：r.watershed 淡水河與頭前溪流域，th=100，250*250 公尺。

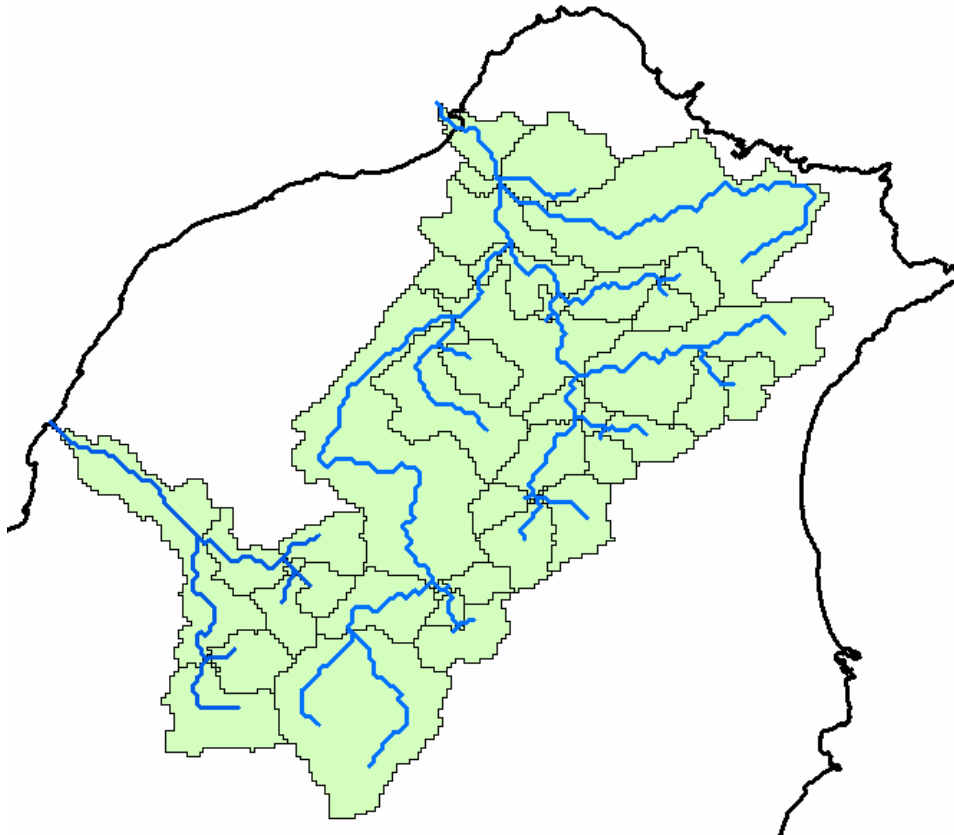


圖 3- 23：r.watershed 淡水河與頭前溪流域，th=100，500*500 公尺。

描述一條河川時最常使用的指標為流域面積、主流長度、河川級序、流域之形狀特性等，於表 3-4 與 3-7 為實驗所得之水系以及集水區之相關資料基本水文資料，若需進一步獲取更多水文資料皆可由實驗數據中得知。主流長為流域內主流之河口至最上游端點之總長[徐義人，1995]。

表 3- 4：TauDEM 計算所得淡水河流域基本水文資料

ArcGIS_TauDEM 面積門檻值(100)網格數	主流長(公尺)	流域面積(平方公尺)
90*90	144287.7	2697907500.00
250*250	142317.6	2677218284.41
500*500	130246.1	2606384255.37

表 3- 5：TauDEM 計算所得頭前溪流域基本水文資料

ArcGIS_TauDEM 面積門檻值(100) 網格數	主流長(公尺)	流域面積(平方公尺)
90*90	66302.6	558789715.35
250*250	60423.3	536271752.67
500*500	54577.2	494250695.11

表 3- 6：r.watershed 計算所得淡水河流域基本水文資料

GRASS_r.watershed 面積門檻值(100) 網格數	主流長(公尺)	流域面積(平方公尺)
90*90	142785.1	2703078587
250*250	138817.3	2733937500
500*500	129903.1	2717249968

表 3- 7：r.watershed 計算所得頭前河流域基本水文資料

GRASS_r.watershed 面積門檻值(100) 網格數	主流長(公尺)	流域面積(平方公尺)
90*90	65482.5	568575000
250*250	60635.7	600125000
500*500	54112.7	539000000

