

利用 FDM 模式分析河床揚塵-以大甲溪為例

林德貴⁽¹⁾ 劉昱麟⁽²⁾ 黃隆明⁽³⁾ 劉文宗⁽⁴⁾

摘要

本研究將以大甲溪出海口至后豐大橋間之河段作為揚塵數值分析範圍，並採用揚塵模式 (Fugitive Dust Model，以下簡稱 FDM) 來進行河床裸露地微粒土砂之擴散行為數值模擬。FDM 屬計算型空氣品質模式，採用高斯擴散模式來模擬逸散性污染物之擴散行為。首先，本研究彙整選定之研究區域現地地文參數與氣象資料，隨之，以室內風洞實驗數據，建立河床裸露地揚塵量與風速之關係後，一併輸入 FDM 中以模擬河川揚塵因風特性影響而擴散之趨勢，並與空氣品質測站之觀測值進行比對，驗證模式及輸入參數之適宜性。此外，本研究亦使用 ArcGIS 地理資訊系統平台作為揚塵 PM₁₀ 濃度(簡稱揚塵濃度或 PM₁₀ 濃度)模擬值之後處理程式，並探討河川揚塵擴散與風特性之關係及揚塵對於鄰近地區影響程度。最後，再針對揚塵敏感區域來進行貢獻量分析，以便作為未來河川揚塵總體防治策略擬定及揚塵抑制工法配置之參考。

(**關鍵詞**：揚塵模式(FDM)、揚塵排放率、揚塵 PM₁₀ 濃度)

Analysis of Fugitive Dust from Riverbed using FDM –A Case Study of Ta-Chia River–

Der-GueyLin⁽¹⁾ *Yu-Lin Liu*⁽²⁾ *Long-Ming Huang*⁽³⁾ *Wen-Tsung Liu*⁽⁴⁾

Professor⁽¹⁾, Graduate Student⁽²⁾ and Associate Professor⁽³⁾ Department of Soil and Water Conservation, National Chung-Hsing University, Taichung, Taiwan, R.O.C.
Associate Professor⁽⁴⁾ Department of Civil Engineering, Kao Yuan University, Kaohsiung, Taiwan, R.O.C.

ABSTRACT

This study selected the downstream reach of Ta-Chia River between estuary and Hou-Feng Bridge as a study area and performed a numerical simulation on the dispersion behavior of fugitive dust released from the bare lands of riverbed using Fugitive Dust Model (FDM). FDM is a computational air quality model using the Gaussian dispersion model to simulate the dispersive behavior of emissive pollutant. Integrating the

(1)國立中興大學水土保持學系教授

(2)國立中興大學水土保持學系碩士生

(3)國立中興大學水土保持學系副教授(通訊作者 e-mail：lmhuang@nchu.edu.tw)

(4)高苑科技大學土木工程系副教授

topographic information and meteorological data with the relationship curve between fugitive dust emission rate and wind velocity from the laboratory wind tunnel tests, one can simulate the dispersion potential of fugitive dust of Ta-Chia River. Meanwhile, the distribution of annual average PM_{10} concentration of simulations which processed by the geographic information system ArcGIS were compared with those of observations to verify the suitability of the numerical model and the associated input model parameters. At last, the simulation results of the fugitive dust potential of riverbed can be implemented as a reference to the planning of preventive strategy suitability of input parameters and the validity of numerical model. In addition, this paper also investigates the relationship between fugitive dust dispersion and wind characteristics and the influence of fugitive dust on the nearby regions susceptible to fugitive dust disaster. At last, the contribution of fugitive dust from each individual river segment to the regions was analyzed and the analysis results can be implemented as a reference to the planning of preventive strategy and the construction of countermeasure for fugitive dust control.

(Keywords : FDM (fugitive dust model), Emission rate of fugitive dust, PM_{10} concentration)

前言

近年來，大甲溪下游河段因輸砂失衡，淤砂及砂粒粒徑細化現象嚴重，尤其於冬季枯水期間，因水位下降造成河床裸露面積大增，又逢東北季風的盛行吹送下，將使得土砂微粒藉由風力向上揚起，導致空氣中懸浮粒子遽增產生揚塵現象並使得鄰近地區空氣品質惡化，嚴重影響附近居民之生活環境及健康。因此，瞭解河川裸露地砂粒懸浮行為及擴散潛勢，將有助於擬定揚塵總體防治策略及各區位防治工法之適宜性。

由國內、外過去研究中顯示，FDM 數值模式對於逸散性汙染物之擴散，可進行有效的模擬分析，以呈現逸散物之擴散趨勢。然而，過去之模擬分析大多針對小區域範圍之揚塵擴散行為來進行，而對於河川出海口大區域範圍之揚塵模擬，其分析之有效性及適宜性，則目前仍無實務案例可供參用及驗證。因此，本研究決定採用 FDM 模式，以解決河川大面積裸露地之揚塵擴散分析問

題，並檢測此模式在海岸河口大面積裸露地之揚塵擴散之適用性。最後，並運用所建立之 FDM 數值模式，來研究鄰近致災敏感地區之揚塵濃度模擬值，對揚塵擴散機制(亦即排放率)之敏感度。

本研究選定大甲溪出海口至后豐大橋間之河段及鄰近區域，彙整現地之地文參數與氣象資料，並依室內風洞實驗數據，建立河床裸露地懸浮微粒 PM_{10} (單位體積空氣中所含粒徑小於或等於 $10 \mu m$ 之懸浮微粒重量)與風速之關係，一併輸入 FDM 中模擬河川揚塵因風特性影響而擴散之趨勢，並利用模擬成果來探討河川揚塵與風特性之擴散關係及對於鄰近地區影響程度。

文獻回顧

(一)河川裸露地飛砂量

河川飛砂的移動類型分為滾動、跳躍和懸浮三大類型，至於何時以何種類型進行移動之運動機制，則大部分取決於風速之條件

以及砂粒粒徑之尺寸大小。當砂粒粒徑較大時，砂粒僅能沿地面滾動前進，其滾動量為總體飛砂量之 1/4 (Bagnold, 1954)。但當粒徑大於 0.25 mm 時，其滾動量則轉為總體飛砂量之 1/5 (Zhibao, 2002)。在砂粒跳躍方面，Owen (1980)與 Zingg (1953)在其研究中，提出砂粒粒徑、摩擦風速與跳躍高度之關係。游繁結(1989)在濁水溪河口調查中，得知飛砂懸浮量約為滾動量與跳躍量總合之 1/4。

由黃隆明等人(2010)現地揚塵飛砂試驗與調查結果可知，經由不同集砂器並配合多層風速觀測所得之飛砂量與風速數據經線性迴歸後，風速與飛砂量呈現顯著的指數關係。此顯示風速與飛砂量之關係式可間接運用於推導河川風速與飛砂揚塵排放量之關係。此外，在其觀測試驗中亦可得知全年平均風速以冬季時較大，而風向則受季風影響且大多為北北東風。又田中貞雄(1954)提出，砂體含水率與飛砂量之關係式。其中，含水率降低時，飛砂量將會增加。此顯示冬季時降雨量較低，砂體含水量相對較小。因此，砂體受風吹送後之揚塵飛砂量將會提高。

詹俊南(1996)分析台灣地區PM₁₀之污染特性，從環保署之空氣品質測站發現，在PM₁₀高污染期間，氣象局之監測資料具有溫度高、風速低與降水量少等特徵，其所形成之混合層高度較低(混合層高度定義:為空氣污染物在垂直方向所能擴散之最大高度)。反之，則較高。此顯示大氣混合層高度會影響污染物擴散之現象。

許惠娟(1999)研究大陸沙暴對台灣區空氣品質之影響，發現懸浮在大氣中之沙塵粒徑大多小於 10 μm。因此，在其研究中採用

10 μm 作為特徵粒徑，來進行揚塵擴散模式分析。

Zhibao(2002)在不同粒徑範圍與風速條件下來觀測飛砂量，並指出在相同風速條件下，隨著粒徑之增大，飛砂量有逐漸遞減之趨勢。當砂粒粒徑小於 0.56 mm 時，在相同風速條件下，隨砂粒粒徑之減小，飛砂之滾動量隨之遞增。另外，隨著風速增加，在相同粒徑條件下，滾動量隨之減少。由此可知，飛砂量與砂粒粒徑大小有密切的關聯性。

梁鳳文(2005)之研究指出，在不穩定之大氣狀況下，污染源較易擴散，此表示污染物擴散的範圍較廣，其濃度相對降低，因而對大氣污染濃度有改善效果。再者，由試驗結果得知，當污染物粒徑越大時，越容易受重力影響。因此，污染物之最終落點與污染源之距離將會越近，並造成污染源附近有較高的濃度分布。因此，長時間的污染物擴散結果，在特定範圍內會形成較高之濃度分布。

(二)揚塵模式(FDM)之應用及理論

1.揚塵模式(FDM)

FDM 為解析型空氣品質計算模式 (computerized air quality model)，特別設計用以計算揚塵源所引起之揚塵濃度 (concentration)與揚塵沉積量(deposition)造成之衝擊。在模式中，使用者可將每一個揚塵源之揚塵散發設定為由一系列不同等級尺寸之微型顆粒所組成，對於每一個等級尺寸之微型顆粒 FDM 可計算其重力沉降速度 (gravitational settling velocity)及沉積速度 (deposition velocity)。此外，本模式亦可計算

使用者所選定所有受體點位置 (receptor locations) 之揚塵濃度及其沉積量。然而 FDM 並無法計算浮動揚塵源 (buoyant point sources) 所造成之揚塵衝擊，因此無法進行類似上升 (plume-rise) 型雲塵狀之揚塵演算。

在氣象資料輸入處理方面，FDM 可接受美國環保署 (Environmental Protection Agency, EPA) RAMMET 氣象前處理程式所提供氣象輸出數據或可由使用者自行輸入特定期間內每小時氣象資料。經 FDM 計算後，可輸出受體點位置 (x 座標, y 座標) 於此期間之 1 小時、3 小時、8 小時及 24 小時之平均揚塵濃度。

FDM 之揚塵源可分為 3 類：點型源 (point source)，線型源 (line source) 及面積型源 (area source)，其中線型及面積型點源之演算乃依據 CALINE3 模式 (California Department of Transportation, 1979) 進行演算。對於面積型揚塵源，使用者僅須輸入面積中心之 x、y 方向之座標及邊長，且其形狀並不一定為方形但可為長方形，同時其極限寬長比 (ratio of width to length) 約為 1 : 5。若面積型揚塵源之長度為寬度之 5 倍以上時，即必須將此面積型揚塵源分割為一系列較小之面積型揚塵源或將其模擬為一系列之垂直風向之線型揚塵源來進行演算。另 FDM 共可處理 500 組受體點及 200 組揚塵源資料，且可將所有揚塵源散發出來之微型顆粒分成 20 種顆粒尺寸等級 (particle size classes) 來進行擴散演算。

2. FDM 控制方程式

FDM 模式乃依據 Ermak (1977) 所提方程式並聯合一組精細之沉積演算程式撰寫發

展而成。對於空氣中污染物傳輸及散佈，當污染物由均勻尺寸之微型顆粒所組成時，其控制方程式可表示如下：

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} K_x \frac{\partial X}{\partial x} - u \frac{\partial X}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} K_y \frac{\partial X}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} K_z \frac{\partial X}{\partial z} + v_g \frac{\partial X}{\partial z} \quad (1)$$

其中：

X = 揚塵濃度 (g/m^3)；

K_x, K_y, K_z = 在 x, y 及 z 方向之漩渦擴散係數 (m^2/sec)；

t = 為時間 (sec)；

x, y, z = 三維空間座標； x -方向與風向平行， y -方向與 x -方向垂直且平行於地面， z -方向同時垂直 x -方向與地表 (m)；

u = 風速 (m/sec)；

v_g = 重力沉降速度 (m/sec)，其中向下之方向取為正值。

求解方程式 (1) 時，必須作幾項簡化之假設如下：

(1) 與同方向之風速引起之水平對流 (advection) 來比較，在 x -方向之擴散性 (diffusion) 可假設為很小，此假設可消除任何非穩態流所需之特殊考量。

(2) 漩渦擴散係數假設值為順風距離之函數。

依據上述假設最終之擴散方程式可由方程式 (1) 加以簡化如下：

$$u \frac{\partial X}{\partial x} = K_y \frac{\partial^2 X}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 X}{\partial z^2} + v_g \frac{\partial X}{\partial z} \quad (2)$$

另外，對於漩渦擴散係數，在空間及時

間上可進一步假設為定值。實際上，為了求得控制方程式之解答，只要漩渦擴散係數與重力沉降速度 v_g 同時為順風距離之函數時，即可達成求解目之。因為 v_g 一般為常數值，因此在所有方向之漩渦擴散係數(K_x , K_y , K_z)，可由單一之參數值 K 來表示，即 $K_x=K_y=K_z=K$ 。最後，解得之揚塵濃度即可表為：

$$X = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} e^{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}} e^{\left[\frac{-v_g(z-h)}{2K} - \frac{v_g^2\sigma_z^2}{8K^2} \right]} \times \left[e^{-\frac{(z-h)^2}{2\sigma_z^2}} + e^{-\frac{(z+h)^2}{2\sigma_z^2}} - \sqrt{2\pi} \frac{v_l\sigma_z}{K} e^{\left[\frac{v_l(z+h)}{K} + \frac{v_l^2\sigma_z^2}{2K^2} \right]} \times \operatorname{erfc} \left[\frac{v_l\sigma_z}{\sqrt{2}K} + \frac{z+h}{\sqrt{2}\sigma_z} \right] \right] \quad (3)$$

其中：

χ =揚塵濃度 (g/m^3);

Q =排放率 (g/sec);

u =風速 (m/sec);

σ_y, σ_z =在 y -及 z -方向之揚塵濃度標準偏差值(m);

x, y, z =受體點(揚塵受體點)座標(m)

v_g =重力沉降速度 (m/sec);

h =揚塵區中線之高度 (plume centerline height)

(m);

K =漩渦擴散係數 (m^2/sec);

$v_l=u_d (v_g/2)$;

u_d =沉積速度 (m/sec)

在 y -及 z -方向之揚塵濃度標準偏差值可表成：

$$\sigma^2(x) = \frac{2}{u} \int_0^x K dx \quad (4)$$

當假設 K 為常數且採用方程式(3)之假設式

時，即可將 K 假設為下式：

$$K = \frac{\sigma_z^2 u}{2x} \quad (5)$$

為了簡化方程式之表示式，可設定兩個參數 γ 及 β 如下：

$$\gamma = \frac{v_l \sqrt{2} x}{\sigma_z u} + \frac{z+h}{\sqrt{2}\sigma_z} \quad (6)$$

$$\beta = \frac{x}{\sqrt{2}\sigma_z u} \quad (7)$$

最後，方程式(3)揚塵濃度 χ 可表為：

其中，

$$X = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} e^{\left[\frac{-v_g(z-h)\sqrt{2}\beta}{\sigma_z} - v_g^2\beta^2 \right]} \times \left[e^{-\frac{(z-h)^2}{2\sigma_z^2}} + e^{-\frac{(z+h)^2}{2\sigma_z^2}} - 4\sqrt{\pi} v_l \beta e^{\left(-\frac{(z+h)^2}{2\sigma_z^2} \right)} e^{\gamma^2} \operatorname{ERFC}(\gamma) \right] \quad (8)$$

$$\operatorname{ERFC}(\gamma) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty e^{-t^2} dt = 1 - \operatorname{ERF}(\gamma) \quad (9)$$

$$\operatorname{ERF}(\gamma) = \operatorname{error\ function} \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\gamma e^{-t^2} dt \quad (10)$$

國外許多學者常採用 FDM 模式進行逸散性粒狀污染物之擴散模擬分析。其中，在礦區採礦造成之揚塵對周邊地區環境影響之研究方面，大多採用 FDM 模式之濃度模擬值與法定標準值之比對，來確認 FDM 模式在逸散型擴散物模擬分析之適用性 (Abbott, 1999; Trivedi 等人, 2009)。

另外，Sabah(2006)則採用 FDM 模式，來模擬水泥生產工廠之揚塵對周遭環境污染之影響評估。該研究採用推估之揚塵排放率進行揚塵模擬演算，並在濃度模擬值與鄰近地區之監測值比對方面獲得良好的吻合度，此結果顯示 FDM 模式在揚塵污染擴散之模擬分析上具有高度之可靠性。

Sivacoumar 等人(2009)為研究評估印度水泥生產工廠之揚塵對周遭環境污染之影響，採用 FDM、ISCST3 與 AERMOD 等三種空氣品質計算數值模式，進行揚塵模擬分析。由模擬結果發現，FDM 模式之濃度模擬值明顯較高，並推論 FDM 模式在模擬水泥揚塵濃度上較為保守。

國外許多工業性之揚塵污染問題，大多採用 FDM 模式來進行分析與評估。在國內研究方面，金門縣衛生局曾在空氣品質粒狀污染物之成因探討及管制計畫(1998)中，也採用 FDM 模式來模擬金門地區之總懸浮微粒值 TSP(Total Suspended Particulate)與單位天數逸散污染物之濃度值，並與法規標準值進行比對，以確認該地區粒狀污染物對環境影響及必要之改善管制措施。

由國內、外過去研究中顯示，FDM 數值模式對於逸散性汙染物之擴散，可進行有效的模擬分析，以呈現逸散物之擴散趨勢。然而，過去之模擬分析大多針對小區域範圍之揚塵擴散行為來進行，而對於海岸河口大區域範圍之揚塵模擬，其分析之有效性及適宜性，則目前仍無實務案例可供參用及驗證。因此，本研究決定採用 FDM 模式，以解決河川大面積裸露地之揚塵擴散分析問題，並檢測此模式在海岸河口大面積裸露地之揚

塵擴散之適用性。最後，並運用所建立之 FDM 數值模式，來研究鄰近致災敏感地區之揚塵濃度模擬值，對揚塵擴散機制(亦即排放率)之敏感度。

研究區域之基本概況

(一)地理位置

大甲溪流域位處台灣島中西部，北與大安溪為鄰，南臨烏溪，面積為 1,235 km²。其流域上游發源地與蘭陽溪流域鄰接，山地屬於宜蘭縣大同鄉。上游合歡溪發源地屬於南投縣仁愛鄉。上游山區屬臺中市和平區，中下游為則分屬東勢區、新社區、石岡區、豐原區、后里區、神岡區、外埔區、大甲區、清水區、大安區。

(二)水文

大甲溪是台灣水資源最豐富的河川，全長為 140 km，平均比降為 1：39，大小支流共 22 條。其流域位處台灣島中西部，北與大安溪為鄰，南臨烏溪，面積 1,235 km²。幹流由東往西橫貫臺中區境，於大甲與清水間注入臺灣海峽。大甲溪下游將大肚溪台地與后里台地截開分離，低水流路呈網狀流路，迂迴於臺中盆地北端，並埋積大量砂礫於河口，造成沖積扇，與大安溪沖積扇相疊，成一合流沖積扇。

(三)氣候

大甲溪流域地形複雜，流域呈現亞熱帶、暖溫帶到冷溫帶等各個不同之氣候帶。流域東西狹長，地表起伏量大，因此氣候差異頗大。一般性氣象資料概況如下：

1.氣溫：

大甲溪年平均氣溫隨標高之增加而遞減，由攝氏 14.6°C 增至 22.6°C，以 12 月至翌年 2 月為低溫期，以 1 月為最低；夏季 6 月 8 月為高溫期，以 7 月為最高。

2.相對溼度：

大甲溪流域內年平均相對濕度約在 70~80% 之間，下游區域以 6 月至 11 月為低濕期，中上游區域以 10 月至 4 月為低濕期。

3.雨量：

大甲溪流域降雨量南北差異不大，隨地形變化東西向空間降雨差異較大，年降雨差距可達 2,500 mm 以上。而每年降雨量最多是出現在 6 月，年平均降雨量為 2,797 mm。一年四季中，又以冬季(11 月至翌年 1 月)之降雨量明顯不足，降雨量僅占整年度約 5%。

4.風特性：

大甲溪河段地區之氣候深受東北季風影響，每年 10 月迄翌年 4 月，季風期間以吹東北風為主，平均風速可達 5 m/sec 以上，位於沿海之出海口地區受其影響最烈；另外，夏季則盛行西南季風，風速一般不大，僅沿海地帶有強風出現之機會。

現地調查及材料試驗

(一)飛砂運動型態與飛砂量、揚塵量之觀測

一般而言，河川飛砂之移動類型可分為滾動(creep)、跳躍(saltation)和懸浮(suspension)三大類型(Blanco and Lal, 2008)，至於何時以何種類型進行移動之運動機制，則大部分取決於

風速之條件及砂粒粒徑之尺寸大小。圖 1 為飛砂運動示意圖。

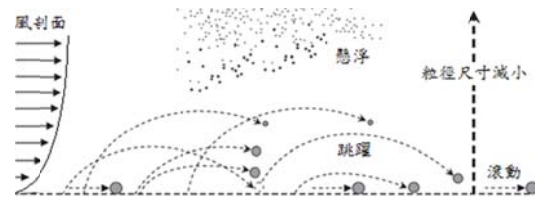


圖 1 飛砂運動示意圖

(改繪自 Blanco and Lal, 2008)

Figure 1 Illustrative plots for the motion of transportation of windblown sand (modified from Blanco and Lal, 2008)

過去有許多研究對於河川飛砂之運動型態有相當深入的分析與探討。Bagnold(1954)之研究指出，當砂粒粒徑較大時，砂粒僅能沿地面滾動前進，其滾動量約為總體飛砂量之 25%。再者，Zhibao(2002)之研究則顯示，當粒徑大於 0.25 mm 時，其滾動量則轉變約為總體飛砂量之 20%。

為瞭解現地飛砂與揚塵之關係，本研究彙整大甲溪現地調查試驗所得之飛砂量與揚塵量之觀測資料。其中，採用在大甲溪河床裸露地上各種高度設置之飛砂量採樣器之現地試驗方法，經過一段時間後，將不同高度採樣器所收集之飛砂量進行加總，即可獲得該河川裸露地之飛砂量。另外，在距離河床 1.5 m 高度上，架設粉塵採樣器，來收集 PM₁₀、PM_{2.5}與 PM_{1.0}之試驗量。由上述飛砂量與揚塵量(PM₁₀)之觀測資料可推知，在飛砂量越多之情況，揚塵量也會相對增加。同時，高度也會影響飛砂量之收集，當高度漸增時，飛砂量會逐漸減少。另外，黃隆明等人(2010)之試驗研究指出，依據試驗獲得

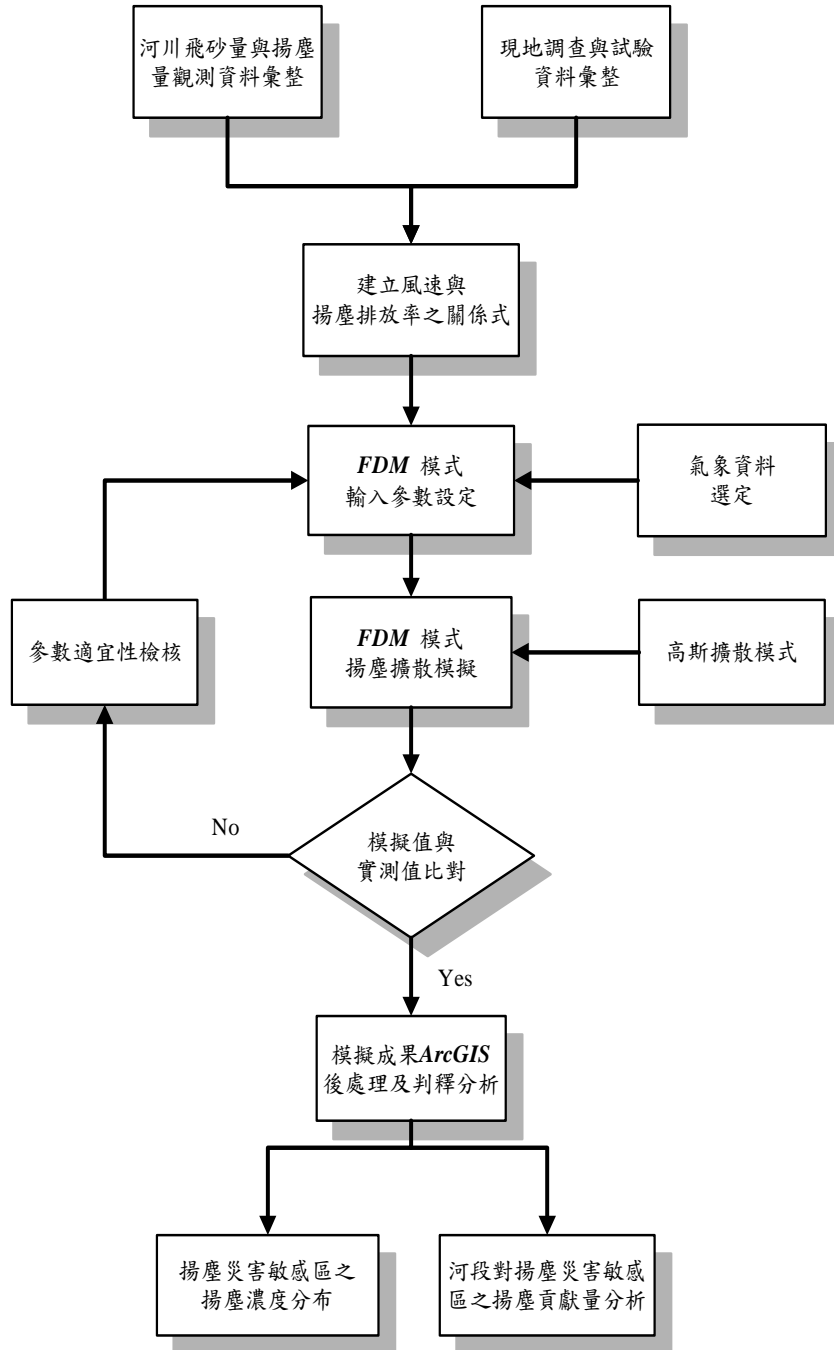


圖 3 研究工作流程

Figure 3 Flow chart of framework and working procedures of the study

之飛砂量與風速之關係式，可用於間接推導河川裸露地之揚塵量與風速之關係式。

(二)砂粒物理性質

由過去研究結果顯示，現地之砂粒密度、砂粒含水率與砂粒粒徑分布等砂粒物理性質，皆會影響飛砂與揚塵之運動機制 (Bagnold, 1954; 田中貞雄, 1954; 吳正, 1965; 林信輝及江永哲, 1979; Tsoar and Pye, 1987; 游繁結, 1989; Zhibao, 2002; 黃隆明等人, 2010)。

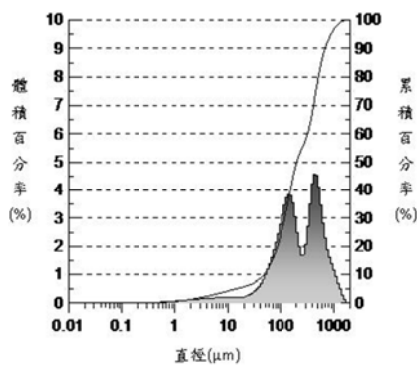


圖 2 大甲溪河床裸露地之砂粒粒徑分佈
Figure 2 Grain size distribution curve of sandy soil from Ta-Chia River

一般而言，當砂粒密度越大時，其啟動風速也相對變大。本研究砂源取自大甲溪出海口至后豐大橋間之裸露河床處，其砂粒密度約為 2.65g/cm^3 ，砂粒粒徑分佈如圖 2 所示(黃隆明等人, 2010)。而在冬季期間，由於雨量較少之緣故，使河川裸露地砂粒之含水率降低，此將促使飛砂量與揚塵量增多。另外，由物理試驗分析結果可知，大甲溪出海之河床砂粒之平均粒徑約為 0.185 mm ，又中值粒徑 d_{50} 約為 0.18 mm 。

研究方法

本研究之工作流程，如圖 3 所示。首先，收集與彙整大甲溪之現地調查與材料試驗資料，由資料分析中可獲得大甲溪下游流域裸露地之飛砂量與揚塵量之觀測值，以及砂粒之物理特性。隨之，選定數值模擬範圍後，為模擬河川裸露地揚塵源之揚塵經由風力吹送擴散至鄰近地區之分布情況及其影響，於 FDM 模式中可將揚塵源視為線型揚塵源，並依據風洞試驗求得之揚塵量與風速之關係，來建立其揚塵排放率。

首先，彙整大甲溪模擬範圍附近之氣象監測站資料，且依照河川裸露地現地之氣象條件，選取最符合現地氣象型態之測站資料；輸入各項模式參數與氣象資料後，FDM 模式即採用高斯擴散模式來進行河川揚塵擴散分析計算。

其次，將模式計算之各受體點揚塵濃度模擬值與氣象局空氣品質測站之觀測值進行比對，同時調整各項輸入參數以達到模擬分析之最佳化。

最後，使用 ArcGIS 地理資訊系統平台，以呈現數值模擬之揚塵擴散結果，並進行模擬地區之揚塵潛勢分析。在參數研究中，可改變模式中之揚塵排放率，以探討排放率對河川鄰近地區之揚塵擴散影響。另外，針對劃分之 9 個線型揚塵源(即 9 個揚塵河段)，分別進行各河段對揚塵災害敏感區之揚塵貢獻量分析，以便未來提供各河段抑制工法整體配置之依據。

FDM 揚塵模式之輸入參數

(一)揚塵風洞試驗及排放率計算

由於實驗設備與人力資源之限制，難由現地獲得河川裸露地揚塵量與風速關係之資料。因此，本研究採用間接方式，採集現地砂樣進行室內風洞試驗，再依據試驗結果來建立 FDM 模式所需之線型揚塵源排放率。風洞設備全長 10 m，而試驗段長度 4.8 m，如圖 4 所示。其中，採用 5 匹馬力之交流電馬達來帶動風扇送風，進氣口並裝有控制閥，以控制風速大小。此外，在風洞試驗段入口處放置長 0.62 m 之擾流板，且於其後方鋪設長 0.5 m 之地氈以穩定風場。

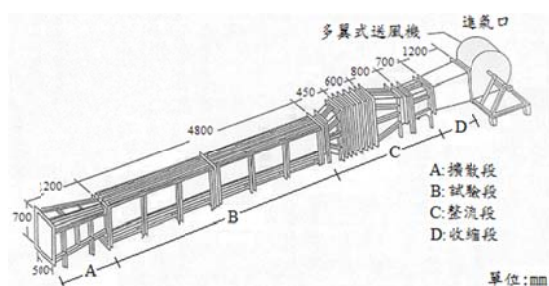


圖 4 風洞試驗設備圖

Figure 4 Layout of wind tunnel testing facility

為推估大甲溪模擬河段之線型揚塵源排放率，乃採用大甲溪出海口附近所採集之土砂樣本，進行室內風洞試驗，並觀測風速與揚塵量之關係。風洞試驗時，將砂體鋪設於試驗段內，而在試驗段之下風處 225 cm 距離之位置，放置揚塵採樣計以進行揚塵量之收集。試驗時採用 9 種風速(7 m/s~15 m/s)進行不同風速下之揚塵量(PM₁₀)觀測，其中，試驗風速之測定採用試驗段中皮托管與差壓計之讀數，經由轉換計算得到所需之風速，再由率定結果發覺，風速值小數第二位，對於揚塵量影響極微，故而研究中將風

速值取為整數。試驗結果如表 1 所示。其中，風洞試驗之風洞口截面尺寸為 0.3 m × 0.5 m (=寬×高)，而在風洞試驗段內鋪設之土砂樣本，其面積 A_s 為 3.0 m × 0.3 m (=長×寬)。試驗中，在風洞內之風速及受風影響之揚塵濃度皆假設為均勻分布之條件下，來調整變化風速，並於一定距離進行揚塵(PM₁₀)濃度量測。最後，由試驗結果可推得在單位時間內所獲得之揚塵排放量 Q (μg/sec)。

$$Q = V \times A \times q \quad (11)$$

其中：

- V = 風速 (m/sec)
- A = 風洞口截面積 (m²)
- q = 揚塵濃度 (μg/m³)

另外，FDM 模式所輸入之排放率，乃是建立在 10 m 高度上之風速情況條件下。因此，將風洞試驗中之 0.2 m 高度風速($V_{0.2}$)轉換成 10 m 高度風速(V_{10})，其模式中風速剖面轉換公式如下：

$$V_{10} = V_{0.2} \times (10/h_{0.2})^k \quad (12)$$

其中：

- V_{10} = 10 m 高度之風速 (m/sec)
- $V_{0.2}$ = 0.2 m 高度之風速 (m/sec)
- k = 指數常數

FDM 模式中，係依據大氣垂直穩定度之情況來決定 k 值，由於本研究所需之資料皆取自大氣中性穩定時之數值，此時 k 值依 FDM 模式之建議為 0.15。再者，將 Q (μg/sec) 除以風洞試驗段中所鋪設之土砂樣本表面積 A_s (m²)，進一步獲得單位面積下單位時間內所獲得之揚塵量 Q_s (g/m²-sec)，公式如下：

$$Q_s = Q/A_s \quad (13)$$

又參考大甲溪流域之航照圖(經濟部水利署第三河川局, 2010), 假設大甲溪流域之平均河寬約為 460 m, 因此將 Q_s 乘上假設之平均河寬, 即可獲得單位河段長度下單位時間內之揚塵量 $Q_L(\text{g/m-sec})$ 。最後, 風速剖面公式分別整理如表 2 及圖 5 所示。並由迴歸分析所建立之線型揚塵源排放率 $Q_L(\text{g/m-sec})$

(二)線型揚塵源排放率

進行 FDM 分析所採用之模擬河段, 乃與

表 1 大甲溪土砂樣本之風洞試驗結果

Table 1 Testing results of wind tunnel test of soil sampled from Da-Chia River

V (m/sec)	q ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
7	460
8	596
9	960
10	1440
11	1280
12	1390
13	1532
14	1668
15	1768

表 2 不同風速與線型揚塵源排放率之關係

Table 2 Relationship between wind velocity and emission rate of line-pattern fugitive dust source

$V_{0.2}$	V_{10}	Q_L
7	12.59	1.65
8	14.39	2.44
9	16.18	4.42
10	17.98	5.83
11	19.78	7.20
12	21.58	8.53
13	23.38	10.18
14	25.18	11.94
15	26.97	13.55

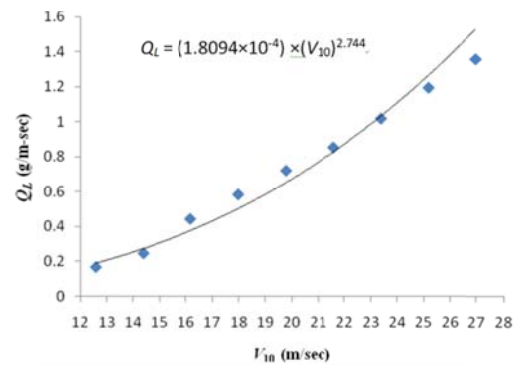


圖 5 大甲溪之風速與線型揚塵源排放率關係
Figure 5 Relationship between wind velocity and line-pattern fugitive dust source of Da-Chia River

風速 $V_{10}(\text{m/sec})$ 之迴歸公式可表示如下：

$$Q_L = (1.8094 \times 10^{-4}) \times (V_{10})^{2.744} \quad (14)$$

由后豐大橋起至出海口為止, 如圖 6 所示。模擬河段總長度約為 18 km, 依照實際河川之轉折與河段長度之幾何特性, 吾人可採用模式中之線型揚塵源設定來建立河川線型揚塵源排放率, 並將模擬河段劃分為 9 段(編號依序為河段-1~河段-9), 河段劃分後各河段之長度約略相等, 而各河段之端點座

標，如表 3 所示。

表 3 大甲溪揚塵模擬河段劃分之端點座標
Table 3 Coordinate of ending point to define river segments for FDM simulation of Da-Chia River

模擬河段	線源座標	X	Y
河段-1	B1	204262	2692167
	B2	206312	2691484
河段-2	B3	208216	2690882
河段-3	B4	210233	2690329
	B5	211974	2689434
河段-4	B6	213390	2688246
河段-5	B7	214951	2687221
	B8	216969	2686733
河段-6	B9	216969	2686733
	B10	220971	2686505

備註：座標系統採用 TWD 67

(三)揚塵受體點

揚塵受體點即為 FDM 模式之數值檢視點，每個受體點之位置可輸入(X, Y, Z)座標予以確定，並由該座標點位來獲得其揚塵濃度之計算結果。為瞭解河床揚塵擴散後之 PM₁₀ 濃度分布，可在模擬河段兩側布設受體點，以檢視 PM₁₀ 濃度之計算結果。FDM 分析所有受體點之布設位置，如圖 7 所示。同時，在模擬分析中受體點之 Z 座標值(即高程

座標值)設為 1.5 m，此相當於一般人類呼吸器官之平均高度。另外，同時在鄰近大甲溪下風處之揚塵敏感區(方位由西向東)，布設受體點，其座標，如表 4 所示。

表 4 大甲溪 FDM 揚塵災害敏感區之受體點座標

Table 4 Coordinate of receptors at the regions susceptible to fugitive dust disaster for FDM simulation of Da-Chia River

敏感區名稱	座標(TWD67)	
	X	Y
高美里	204755.473	2689679.60
菁埔里	207370.442	2688155.61
清水區中心	206062.480	2685478.66
圳前村	214033.352	2686158.60
神洲村	218430.288	2685519.58

(四)氣象資料

由於大甲溪河段現地未架設氣象監測儀器，無法得到河段現場長時間之氣象資料，經調查評估後，研究所需之氣象資料，選用距濱海試區最近之沙鹿氣象監測站之 2008 年全年逐時氣象資料。沙鹿測站之風玫瑰圖，如圖 8 所示。

(五)揚塵模式執行相關參數

1.初始條件

模式模擬演算前，均假設離地表高度 10 m 處之初始風速為 0 m/sec，亦即無揚塵產生。亦即在初始階段河川裸露地微粒子並不隨風吹起動，因此模擬區之 PM₁₀ 濃度可設定為 0 μg/m³。

林德貴、劉昱麟、黃隆明、劉文宗:利用 FDM 模式分析河床揚塵-以大甲溪為例

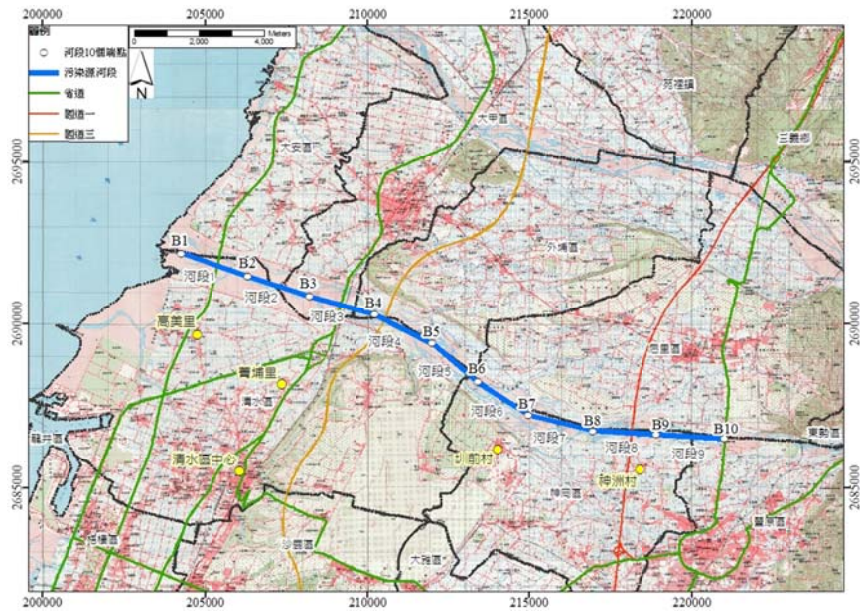


圖 6 大甲溪 FDM 模擬河段範圍與線型揚塵源示意

Figure 6 Range of individual river segment and line-pattern fugitive dust source for FDM simulation of Da-Chia River

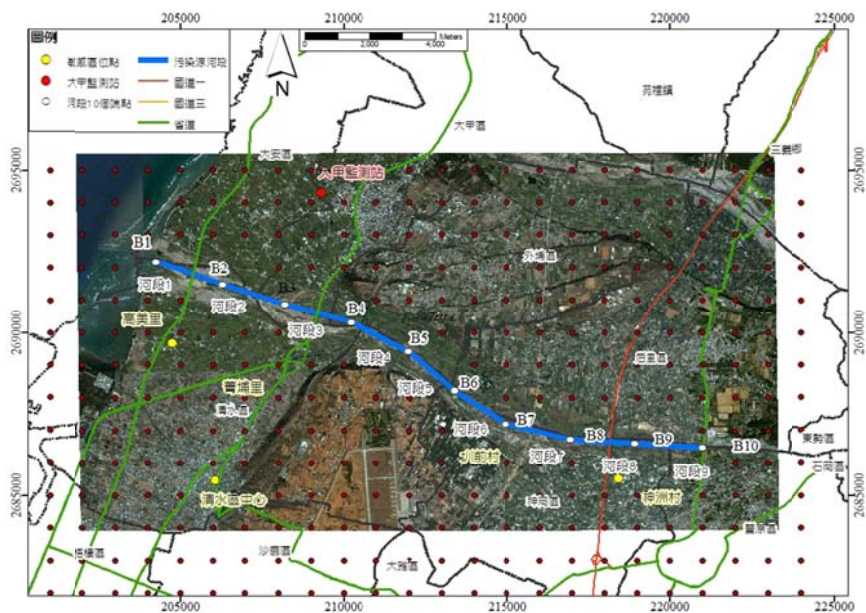


圖 7 大甲溪 FDM 模擬受體點(紅色實心圓點)之布設位置

Figure 7 Configuration of receptors (red solid circle) for FDM simulation of Da-Chia River

2.邊界條件

模式模擬計算過程中，河川裸露地揚塵之擴散方式並不受幾何邊界之影響，且目前幾何邊界受點之 PM_{10} 濃度並無氣象監測資料可供比對，因此其模擬揚塵濃度值完全依據 FDM 之演算模式來決定。

3.整理 FDM 模式相關輸入資料與參數設定說明，如表 5 所示。

分析結果

(一)揚塵擴散分析

由於河川揚塵主要受到雨量、風速及風向之影響。在冬季期間，受東北季風吹拂及雨量較少之情形下，進而選擇冬季期間(12月、1月與2月)為氣象資料之模擬時段來進行模擬演算，並獲得各受體點於此期間之 PM_{10} 揚塵濃度模擬值，如圖 9(a)~圖 9(d)所

示。

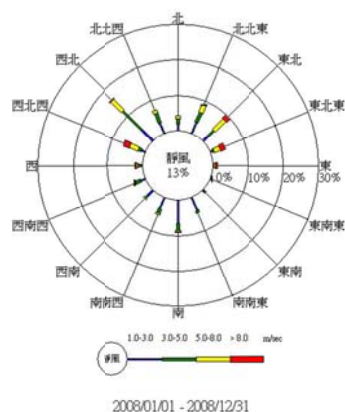


圖 8 沙鹿測站之風玫瑰圖

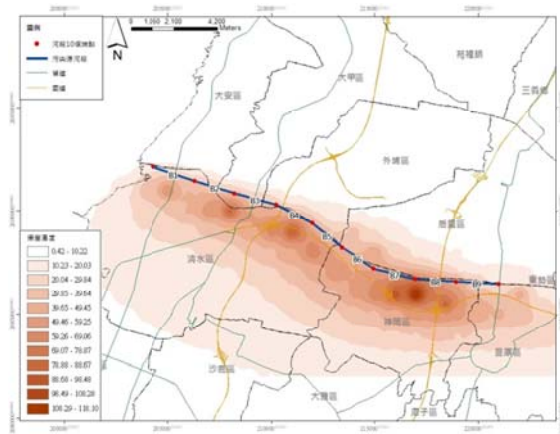
Figure 8 Wind rose diagram of Sha-Lu station

由於河川裸露地之揚塵主要受到雨量少、風速大且風向(風特性影響)之互相影響，

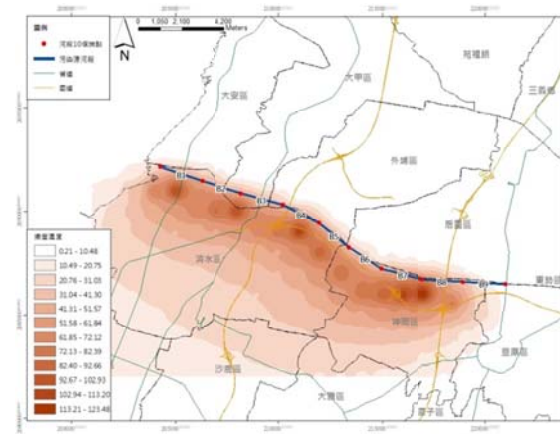
表 5 大甲溪 FDM 模式相關輸入資料與參數設定

Table 5 Relevant input data and determination of parameters for FDM simulation of Da-Chia River

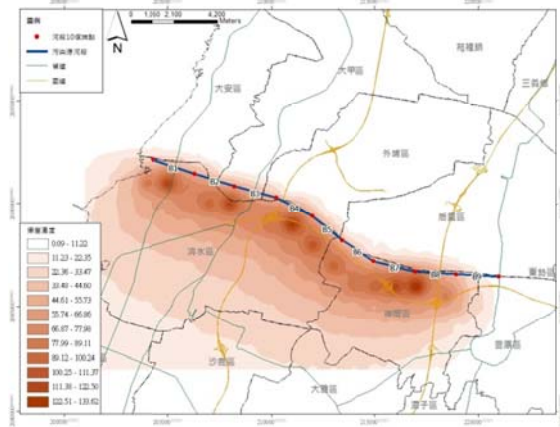
設定項目	設定值	單位	說明
地表粗糙度	0.3	cm	採用過去量測之數據
粒狀物密度	2.65	g/cm^3	採用過去量測之數據
風速計距離地面之高度	20	m	採用沙鹿空氣品質測站之風速計高度
揚塵排放源種類	2	$g/m\text{-}sec$	採用線型揚塵源排放源(line type)
排放高度	20	m	假設揚塵排放高度可達 20 m
線源寬度	460	m	假設為均勻河川裸露地之平均寬度
氣象資料時間間格	60	minute	採用逐時氣象檔案



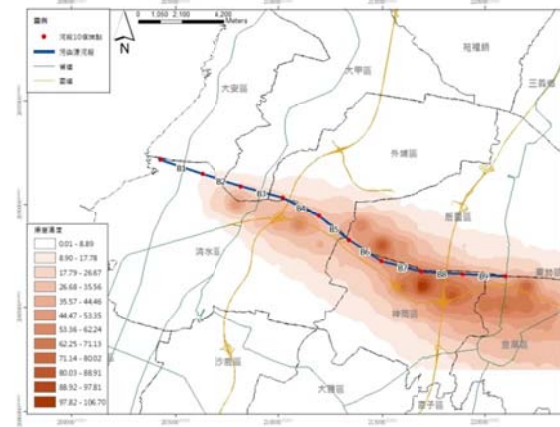
(a)



(b)



(c)



(d)

圖 9 大甲溪模擬河段各時期之 PM_{10} 平均濃度分布圖 (a)冬季(12月至翌年2月) (b)1月 (c)2月 (d)12月

Figure 9 Distribution of average PM_{10} concentration for various periods of FDM simulation of Da-Chia River

(a) Wintertime Dec. ~ Feb. (b) Jan. (c) Feb. (d) last Dec.

表 6 大甲溪各河段對各敏感區揚塵濃度之貢獻百分比

Table 6 Contribution percentage of fugitive dust from different river segments (Seg-1~Seg-9) to the regions susceptible to fugitive dust disaster of FDM simulation of Da-Chia River

污染源 敏感區	敏感區-1	敏感區-2	敏感區-3	敏感區-4	敏感區-5
	高美里	菁埔里	清水區中心	圳前村	神州村
河段-1	35.84%	6.63%	4.43%	2.08%	1.01%
河段-2	42.56%	10.36%	9.85%	3.00%	1.13%
河段-3	14.03%	45.52%	24.22%	4.01%	1.50%
河段-4	3.69%	23.04%	26.06%	3.62%	2.01%
河段-5	1.47%	8.36%	13.68%	4.20%	2.90%
河段-6	0.90%	2.56%	10.50%	28.88%	5.43%
河段-7	0.61%	1.63%	5.80%	44.40%	15.32%
河段-8	0.46%	1.08%	3.00%	7.16%	24.69%
河段-9	0.44%	0.83%	2.45%	2.65%	46.01%

因此在冬季期間，由於東北季風之吹拂和雨量較少之情況下，大甲溪模擬河段南岸之地區揚塵污染明顯較北岸嚴重；另外，冬季期間，風速通常較大且風向主要為東北風，又揚塵排放率為風速之函數，因此當風速變大時，揚塵排放率也隨之增加，由風向與排放率增加之影響，以致揚塵平均濃度模擬值較高者大多分布於大甲溪河段之西南岸地區。

另外，由於揚塵係屬粒狀污染物，會受風特性影響而懸浮於空氣一段距離後沉降在臨近地區。因此，由圖 9 中發現，揚塵模擬濃度主要從河段(線型排放源)向河段兩側呈現遞減之分布，受河川揚塵污染之影響範圍主要侷限於河段兩岸之臨近地區。

(二)揚塵貢獻量分析

位於大甲溪河段南岸之揚塵災害敏感區，於冬季時飽受河川揚塵之苦，因此，本研究採用 FDM 模式，來獲得災害敏感區受到各模擬河段揚塵濃度污染之百分比。近一步分別進行各河段對揚塵災害敏感區之揚塵貢獻量分析。然而，河床裸露地揚塵並非像車輛、工廠等污染源一樣具有持續穩定排放之特性，其主要受風特性之影響而產生排放，且其排放率為風速之函數關係。

一般而言，在風特性較弱之情況(即風向不定與風速較小)，其揚塵污染影響不如車輛、工廠等污染源顯著。反之，在風特性較強之情況下，當河床處於裸露且近似乾燥之狀態下，其揚塵排放對河段鄰近地區之影響可能達到人為污染源(車輛與工廠等)排放影響之 10 倍以上。河段走向與其鄰近地區之敏感區，受到風速與風向的風特性影響，因

而產生不同之濃度結果，因此進一步呈現出各河段鄰近地區之揚塵濃度擴散趨勢。各敏感區之河床裸露地揚塵來源分析，如表 6 中所示。其中，以敏感區-1 而言，冬季時揚塵濃度較多之貢獻河段主要為河段-1 與河段-2；另外，由於敏感區-2 之地理位置位於模擬河段-3 之西南岸，以致所得揚塵濃度最多之貢獻河段主要為河段-3。此外，敏感區-3 之地理位置位於模擬河段-3 及河段-4 之西南岸，且距此兩河段之距離相近，故該區域由河段-2 及河段-3 之揚塵濃度貢獻百分比皆約為 25%。再者，河段-6 及河段-7 距敏感區-4 甚近，但因冬季風向之關係，造成河段-7 之揚塵濃度貢獻百分比比較河段-6 之貢獻百分比為多。而敏感區-5 則位於模擬河段-8 及河段-9 之南岸，亦因該區冬季風向之關係，可由模擬結果中得出河段-9 之揚塵濃度貢獻百分比比較其他河段之貢獻百分比為高。

由河段揚塵貢獻量之分析結果顯示，各河段與各敏感區之相對位置，因風特性之影響產生不同之揚塵貢獻量，此結果可提供抑制揚塵工法之配置對策。若於各敏感區中最大揚塵貢獻量之河段中進行適當之工法配置，可於受影響之敏感區中獲得最大之揚塵抑制效果。

結論與建議

河段走向與其鄰近地區之敏感區，受到風速與風向的風特性影響，因而產生不同之濃度結果，因此進一步呈現出各河段鄰近地區之揚塵濃度擴散趨勢。且由分析結果發現，當風向與河段呈現正交情況，則該河段下風處之揚塵濃度會明顯較多。由河段揚塵

貢獻量之分析結果顯示，各河段與各敏感區之相對位置，因風特性之影響產生不同之揚塵貢獻量，此結果可提供抑制揚塵工法之配置對策：若在各敏感區中所得最大揚塵貢獻量之河段中，進行適當之工法配置，則對受影響之敏感區將會有最佳之揚塵抑制效果。

在未來進一步的研究方面，可依循本研究之 FDM 模擬步驟，針對高潛勢揚塵河川特有之河川揚塵排放率與風速之關係，來建立河川揚塵影響範圍與揚塵危害潛勢之預測機制。由於，目前欠缺空氣品質測站中各不同污染源對 PM₁₀ 濃度之貢獻百分比資料。因此，本研究僅依據研究臨近地區之沙鹿空氣品質監測站年平均之 PM₁₀ 濃度模擬值小於實際觀測值(TSP)之間接比對結果，來初步驗證模擬之合理性。再者，由於缺乏大甲溪河床上實際之風特性及河川裸露地揚塵濃度等相關監測數據資料，可供模式分析結果進行比對。因此，在未來有必要取得更準確之實際觀測資料，來進行數值模式之參數率定及有效性驗證。

參考文獻

1. 田中貞雄(1954)，「風蝕防止に關する研究」，農業氣象，第 10 卷，第 1 之 2 期，第 57~59 頁。
2. 行政院環境保護署(2008)，「河川揚塵對中部大氣懸浮微粒影響程度之評估專案工作計畫」，中山醫學大學執行。
3. 吳正(1965)，「新疆和田地區沙土及土壤風蝕的初步研究」，中國地理學會地貌學術

- 討論會，第 125~127 頁。
4. 金門縣衛生局(1998)，「粒狀物污染成因探討」，新系環境技術有限公司執行。
 5. 林信輝、江永哲(1979)，「砂體含水量與飛砂量之關係試驗」，中華水土保持學報，第 10 卷，第 2 期(2)，第 173~193 頁。
 6. 林啟文(2006)，「濁水溪鄰近地區季風揚塵來源分析」，第二十三屆空氣污染控制技術研討會，台中市。
 7. 許惠娟(1999)，「大陸沙暴對台灣地區空氣品質的影響」，碩士論文，國立台灣大學大氣科學研究所。
 8. 梁鳳文(2005)，「以歐氏-拉氏法模擬煙流粒子在建築物尾流區中的擴散」，碩士論文，國立中央大學土木工程研究所。
 9. 黃隆明、盧力璋、陳財輝(2010)，「飛砂移動機制之風洞實驗」，國立中興大學農林學報，第 59 卷，第 3 期，第 199~213 頁。
 10. 黃隆明、吳昌翰(2010)，「台中港海岸飛砂量推估之探討」，國立中興大學水土保持學報，第 42 卷，第 4 期，第 393~407 頁。
 11. 游繁結(1989)，「濁水溪河口飛砂量之調查研究」，中華農林學報，第 38 卷，第 1 期，第 75~104 頁。
 12. 詹俊南(1996)，「台灣地區 PM₁₀ 污染特性分析」，碩士論文，台灣大學環境工程研究所。
 13. 經濟部水利署第三河川局(2010)，「大安、大甲及烏溪揚塵防制改善試辦計畫」，弘強工程顧問企業有限公司執行。
 14. 經濟部水利署第四河川局(2007)，「濁水溪下游段河川裸露地揚塵改善策略研究」，大葉大學執行。
 15. 臺中縣環境保護局(2008)，「臺中縣河川流域稽查管制及裸露地揚塵改善計畫」，弘強工程顧問企業有限公司執行。
 16. 蔣孟祺(2008)，「利用受體模式推估中部空品區受到河川揚塵之影響」，碩士論文，國立中興大學環境工程研究所。
 17. Abbott, M. L. (1999), Air Dispersion Modeling Of Mine Waste In The Southeast Missouri Old Lead Belt, Idaho National Engineering and Environmental Laboratory.
 18. Bagnold, R.D. (1954), The physics of blown sand and desert dunes, London, Mathuen.
 19. Blanco, H. and R Lal. (2008), "Principles of Soil Conservation and Management," Springer Science, 55-80.
 20. California Department of Transportation (1979), "CALINE3 - A versatile Dispersion Model for Predicting Air Pollutant Levels Near Highways and Arterial Streets," Office of Transportatio Laboratory, Department of Transportation, State of California, Sacramento, California 95807, No. FHWA/CA/TL-79/23.
 21. Ermak, D. L. (1977), "An Analytical Model for Air Pollutant Transport and Deposition from a Point Source, Atmospheric Environment," 11: 231-237.

22. Holzworth, C. G. (1964), "Estimates of mean maximum mixing depths in contiguous United States. Mon. Wea.," 92: 235-242.
23. Owen, P. R. (1980), The physics of sand movement. lecture notes, workshop on physics of flow in desert, International Centre for Theoretical Physics, United Kingdom Trieste.
24. Pasquill, F. (1961), "The estimation of the dispersion of windborne material, Meteorological Magazine," 90: 3-49.
25. Sabah, A. and Abdul-Wahab (2006), "Impact of fugitive dust emissions from cement plants on nearby communities," Ecological Modeling Volume 195, Issues 3-4, 15 June 2006, 338-348.
26. Sivacoumar, R., Raj Mohan S., Chinnadurai Jeremiah and R. Jayabalou (2009), "Modeling of fugitive dust emission and control measures in stone crushing industry," Journal of Environmental Monitoring.
27. Trivedi Ratnesh, M. K. Chakraborty and B. K. Tewary (2009), "Dust dispersion modeling using fugitive dust model at an opencast coal project of Western Coalfields Limited, India," Journal of Scientific & Industrial Research 68, January 2009, 71-78.
28. Tsoar Haim, Pye Kenneth (1987), "Dust transport and the question of desert loess formation," Sedimentology 34 (1): 139-153.
29. USEPA (1992), "User's Guild for the Fugitive Dust Model(FDM) - Volume I - User Instruction."
30. Zhibao, D. (2002), "The flux profile of a blowing sand cloud: A wind tunnel investigation," Geomorphology, 49: 219-230.
31. Zingg, A. W. (1953), "Wind tunnel studies of the movement of sedimentary material," Proceeding of the 5th Hydraulics Conf. Bull, Inst. of Hydraulic., 34: 11-35

水土保持學報 43(3) : 239 – 258 (2011)

Journal of Soil and Water Conservation , 43 (3) : 239 - 258 (2011)