

## 大安溪河床揚塵對鄰近地區之影響評估

林德貴<sup>[1]</sup> 王勝賢<sup>[1]</sup> 劉文宗<sup>[2]</sup> 黃隆明<sup>[1]\*</sup>

**摘要** 本研究選定大安溪出海口至義里大橋間之河段作為揚塵數值分析之研究區域，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研究。再者，模擬結果亦顯示，入海口河段南岸之頂安村、大甲鎮、高鐵橋鄰近地區及義里大橋等四個地區為揚塵濃度較高值之區域，此與歷年揚塵嚴重區域現場調查結果作比較亦相當吻合。採用研究區域之現地氣象資料 (風速及風向) 以及室內風洞實驗求得之揚塵排放率與風速關係曲線，可進行大安溪河床裸露地之揚塵擴散行為模擬。同時，吾人可建置河床裸露地在各種氣象條件下之揚塵擴散潛勢影響圖。模擬分析求得之冬季  $PM_{10}$  濃度值分布圖顯示，由於冬季偏北風之風速較大，使得裸露地具較大之揚塵排放量，並經擴散後造成南岸地區有較高之  $PM_{10}$  濃度值。本研究亦針對不同河段 (河段-1~河段-9) 來進行河川揚塵貢獻量分析，其結果顯示，各河段對上述南岸四個地區之最高  $PM_{10}$  日平均濃度主要貢獻為：頂安村 87.12%揚塵來自河段-1 之貢獻、大甲鎮 38.72%揚塵來自河段-4 之貢獻、高鐵橋鄰近地區 41.05%揚塵來自河段-6 之貢獻及義里大橋 54.27%揚塵來自河段-9 之貢獻。

**關鍵詞**：揚塵擴散、揚塵模式、揚塵排放率、 $PM_{10}$  濃度。

## Evaluation of the Influence of Fugitive Dust Emissions from Da-An Riverbed on Nearby Regions

Der-Guey Lin<sup>[1]</sup> Sheng-Hsien Wang<sup>[1]</sup> Wen-Tsung Liu<sup>[2]</sup> Long-Ming Huang<sup>[1]\*</sup>

**ABSTRACT** Influence charts for assessing the dispersion potential of fugitive dust of the riverbed of Da-An River under various meteorological conditions was established by a series of FDM (Fugitive Dust Model) simulations. The simulated distribution of annually average  $PM_{10}$  concentration at wintertime shows that the bare lands of the riverbed possess a larger emission quantity of fugitive dust due to the higher wind velocity of the northern monsoon in the year. In addition, the FDM simulations also indicate that the Ding-An village, the Da-Jia town, the neighborhoods of High Speed Rail Bridge, and the Yi-Li Bridge at the southern bank of the downstream reach are the main regions with higher fugitive dust concentration and which coincided with those observed in the past years. The highest daily average  $PM_{10}$  concentration for the four regions at the southern bank is mainly contributed by different reaches with different percentage as follows: 87.12% from Reach-1 for Ding-An village, 38.72% from Reach-4 for Da-Jia town, 41.05% from Reach-6 for neighborhoods of High Speed Rail Bridge, 54.27% from Reach-9 for Yi-Li Bridge. Conclusively, the Reach-1, Reach-4, Reach-6 and Reach-9 are considered as the most critical reaches with high potential of fugitive dust to the nearby communities at the downstream of Da-An River.

[1] 國立中興大學水土保持學系  
Department of Soil and Water Conservation, National Chung Hsing University, Taichung, Taiwan.

[2] 高苑科技大學土木工程系  
Department of Civil Engineering, Kao-Yuan University, Kaohsiung, Taiwan.

\* Corresponding Author. E-mail : lmhuang@nchu.edu.tw

**Key Words :** Dispersion of fugitive dust, FDM (fugitive dust model), emission rate of fugitive dust, PM<sub>10</sub> concentration.

## 一、前言

隨著氣候變遷之影響，台灣中部大安溪出海口於冬季時河川揚塵問題日益嚴重；每逢冬季枯水期，河川裸露地面積增加，加上東北季風之吹拂，以致揚塵污染問題經常發生，影響河川臨近地區居民之生活品質 (林啟文等人, 2006)。過去研究 (吳昌翰, 2006；范姜明威, 2010) 為了瞭解河川裸露地之揚塵擴散機制與其對鄰近地區之影響，主要工作皆針對河川裸露地進行現地調查，再依據現地裸露地砂粒之物理性質來探討河川揚塵之啟動機制。此外，亦於河川裸露地進行現地觀測，來獲得現地風特性對揚塵排放之影響。但由於實驗器材與人力資源之限制因素，上述研究方法僅能針對小區域之揚塵行為進行觀測，對於大區域之揚塵擴散行為則較無法確切掌握。因此，本研究將採用 FDM (fugitive dust model) 數值模式 (以下簡稱 FDM 模式)，進行河川裸露地之揚塵擴散模擬，以便藉由模擬分析成果來探討揚塵擴散對鄰近大區域範圍內保全對象之影響。

FDM 模式屬空氣品質計算數值模式，其採用高斯擴散模式作為控制方程式並進行計算。在國外，許多學者常採用此模式進行逸散性粒狀污染物之擴散模擬分析。其中，在礦區之揚塵對週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；Arpactoglu and Er, 2003；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。

## 二、揚塵模式 (FDM 模式)

FDM 模式之控制方程式由 Ermak (1977) 發展提出，演算模式乃依據其方程式並聯合一組沉積演算程式撰寫而成。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：

$$\frac{\partial A}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} k_x \frac{\partial A}{\partial x} - u \frac{\partial A}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} k_y \frac{\partial A}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} k_z \frac{\partial A}{\partial z} + v_g \frac{\partial A}{\partial z} \quad (1)$$

其中：

- $A$  = 揚塵濃度 (g/m<sup>3</sup>)
- $k_x, k_y, k_z$  = 在  $x, y$  及  $z$  方向之漩渦擴散係數 (eddy diffusivity) (m<sup>2</sup>/sec)
- $t$  = 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-方向垂直且平行地表面，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)，向下之方向取為正值。

求解方程式 (1) 時, 須作幾項簡化之假設如下:

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。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:

$$u \frac{\partial A}{\partial x} = k_y \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} + v_g \frac{\partial A}{\partial z} \quad (2)$$

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, 只要所有方向之漩渦擴散係數  $k_x, k_y, k_z$  與重力沉降速度  $v_g$  同時為順風距離之函數時, 即可達成求解之目的。由於  $v_g$  一般為常數值, 因此  $k_x, k_y, k_z$  可由單一之參數值  $k$  來表示, 即  $k_x = k_y = k_z = k$ 。最後, 吾人即可由擴散方程式求解揚塵濃度  $A$ 。FDM 模式控制方程式之各項變數示意, 如圖 1 所示:

FDM 為解析型空氣品質計算模式, 專門用以預測粒狀物在大氣中之擴散行為, 並可計算揚塵源所引起之揚塵對鄰近地區造成之影響。然而必須指出者, FDM

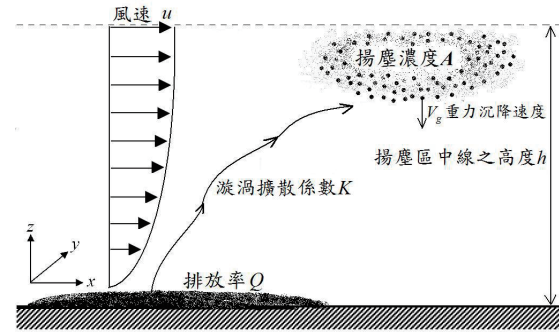


圖 1 FDM 模式控制方程式中各項變數之代表意義圖例說明

Fig.1 Illustration of analytical variables for governing equation of FDM

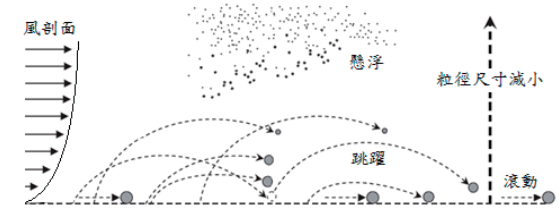


圖 2 風吹砂粒淨移活動示意圖 (改繪自 Blanco and Lal, 2008)

Fig.2 Illustrative plots for the transporting motion of windblown sand particle (modified from Blanco and Lal, 2008)

無法計算浮動揚塵源所造成之揚塵衝擊, 亦無法考慮地形因素。因此, FDM 無法進行類似上升型雲塵狀之揚塵演算。

### 三、河床揚塵研究區域概況

#### 1. 地理位置

大安溪位於台灣中部臺中縣、苗栗縣境內, 南臨大甲溪, 北為後龍溪全長約 96 km, 流域面積約 758 km<sup>2</sup>。流域上游大部份流經苗栗縣泰安鄉境內, 中游流經臺中、苗栗縣接壤地帶, 共流經 11 個鄉鎮; 分別為苗栗縣之大湖、卓蘭、泰安、苑裡等 5 個鄉鎮, 與臺中縣之和平、東勢、后里、外埔、大甲、大安等 6 個鄉鎮。

#### 2. 氣候及水文

大安溪位於中低緯度之交界, 屬亞熱帶氣候區每年 10 月至翌年 4 月盛行東北季風, 由於中央山脈阻隔, 因此雨量較少。因冬夏兩季節之盛行風向不同, 而每年 4 月至 9 月間盛行西南風、梅雨及颱風導致雨量豐沛, 一般性氣象概況資料如下: 平均溫度以 1 月最低 7 月最高, 以中央氣象局臺中站為例, 全年平均溫度在 23°C。流域內之平均相對濕度 77%, 其分佈趨勢以 11 月與 12 月最低, 5 月與 6 月最高。5 月至 9 月為整年降雨最豐沛之時期, 其中 7 月至 8 月期間較易受颱風之影響。而 10 月開始至翌年 1 月之月平均降雨量約在 30 mm 以下。大安溪流域平均年降雨量約為 3,373 mm。

依「河川管理辦法」(2007) 經濟部修訂, 汛期為每年 5 月至 11 月, 12 月至翌年 4 月為非汛期。大安溪流域汛期之降雨量約為整年度之 80%, 每年冬季常為乾旱期係由於非汛期之降雨量百分比只占整年度之 20%, 再加上非汛期降雨天數明顯減少, 且降雨天數間隔大之關係。

#### 3. 現地調查與材料特性

##### (1) 現地調查

一般而言, 河川飛砂之移動類型分為滾動 (creep)、跳躍 (saltation) 和懸浮 (suspension) 三大類型 (Blanco and Lal, 2008), 然風速之條件以及砂粒粒徑之尺寸大小, 決定河川飛砂以何種類型進行移動之運動機制。圖 2 為飛砂運動示意圖。

過去有許多國內外學者對於河川飛砂之運動型態進行進一步之分析與探討。國外學者研究指出，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% (Bagnold, 1954)。但粒徑大於 0.25 mm 時，其滾動量則約為總體飛砂量之 20% (Zhibao, 2002)。另外，White (1997) 研究指出砂粒運移過程中，跳躍約佔總砂量 50~70%，滾動約為 5~25%，懸浮約為 30~40%。

為了瞭解現地飛砂與揚塵之關係，需彙整大安溪現地試驗飛砂量與揚塵量之觀測資料。在試驗研究方法 (吳昌漢, 2006; 行政院環境保護署, 2009; 經濟部水利署第三河川局, 2010; 范姜明威, 2010) 中，皆於大安溪河床裸露地上設置不同高度之飛砂量採樣器，經過一段時間後，由各種高度所蒐集之飛砂加總而獲得該河川裸露地之飛砂量。另將粉塵採樣器架設在距離河床 1.5 m 高度上，以蒐集 PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub> 與 PM<sub>1.0</sub> 之試驗量。由飛砂量與揚塵量 (PM<sub>10</sub>) 之觀測資料中得知，一般而言，飛砂量越多，揚塵量也相對增加。且高度也會影響飛砂量之多寡，高度漸高，獲得之飛砂量會逐漸減少；另外，研究顯示，試驗獲得之飛砂量與風速之關係式，可間接推導河川裸露地揚塵量與風速之關係式 (吳昌翰, 2006)。

## (2) 砂粒物理性質

由過去研究結果顯示，飛砂與揚塵之運動機制，受現地之砂粒密度、砂粒含水率與砂粒粒徑分布等砂粒物理性質之影響 (Bagnold, 1954; 田中真雄, 1954; 林信輝、江永哲, 1979; 游繁結, 1989; Zhibao, 2002; 吳昌翰, 2006; 范姜明威, 2010)。

一般而言，當砂粒密度越大，其啟動風速也相對變大。而大安溪之砂粒密度約為 2.66 g/cm<sup>3</sup>。另外，在冬季期間，雨量較少之緣故，使河川裸露地砂粒之含水率降低，促使飛砂量與揚塵量增多。由范姜明威 (2010) 之研究成果得知，大安溪河床砂粒之粒徑分布在 0.10 mm~0.15 mm 較多，其占全部試驗砂樣之 55% 左右，如圖 3 所示。另外，也由物理試驗分析獲得大安溪河床之平均粒徑  $d$  約為 0.112 mm，又中值粒徑  $d_{50}$  約為 0.112 mm。

## 四、研究方法

本研究之工作流程，如圖 4 所示。選定模擬範圍後，先蒐集並彙整大安溪之現地調查與材料試驗資料，可獲得大安溪下游流域裸露地之飛砂量與揚塵量之觀測值及砂粒之物理特性。為模擬河川裸露地所產生之揚塵經由風力吹送擴散至鄰近地區之分布情況及

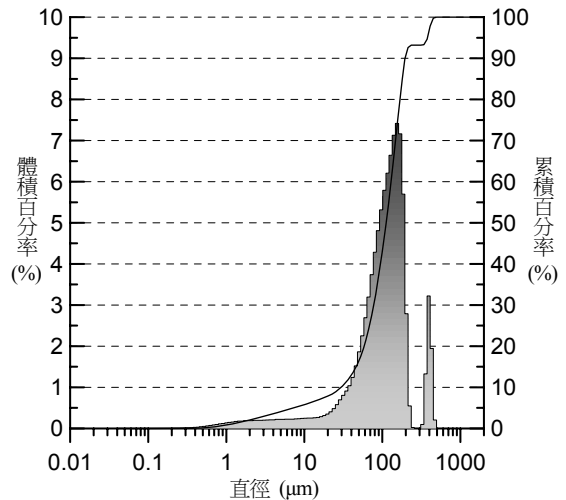


圖 3 大安溪砂粒粒徑分布

Fig.3 Grain size distribution curve of sandy soil from Da-An River

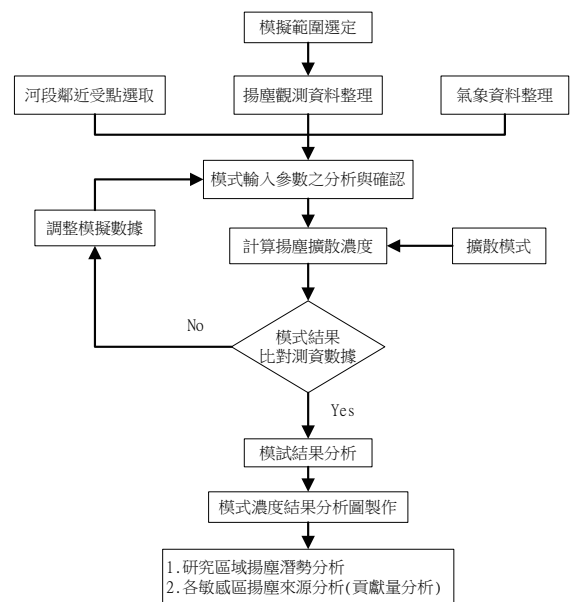


圖 4 研究工作架構流程圖

Fig.4 Flow chart of the framework of study

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；彙整大安溪模擬範圍附近之氣象監測站資料，並依照河床現地之氣象條件，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。隨之，將模式計算之各受體點揚塵濃度模擬值與環保署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，呈現數值模擬之揚塵濃度擴散結果，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。

## 五、FDM 揚塵模式之輸入參數

### 1. 模擬範圍

本研究之揚塵污染源模擬河段範圍由義里大橋起至出海口為止，河段總長度約 15 km。另因揚塵之擴散濃度會因吹送距離而遞減，故模擬範圍主要針對大安溪河段附近地區進行揚塵擴散模擬分析，研究範圍由大安溪以北之苗栗縣苑裡鎮至大安溪以南之台中縣大安鄉、大甲鎮與外埔鄉。模擬範圍如圖 5 所示。

### 2. 初始條件

在揚塵演算前，假設離地表高度 10 m 處之初始風速為 0 m/sec，亦即無揚塵情況（FDM 採用距地表高 10 m 處之風速進行揚塵演算）。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 PM<sub>10</sub> 濃度可設定為 0 μg/m<sup>3</sup>。

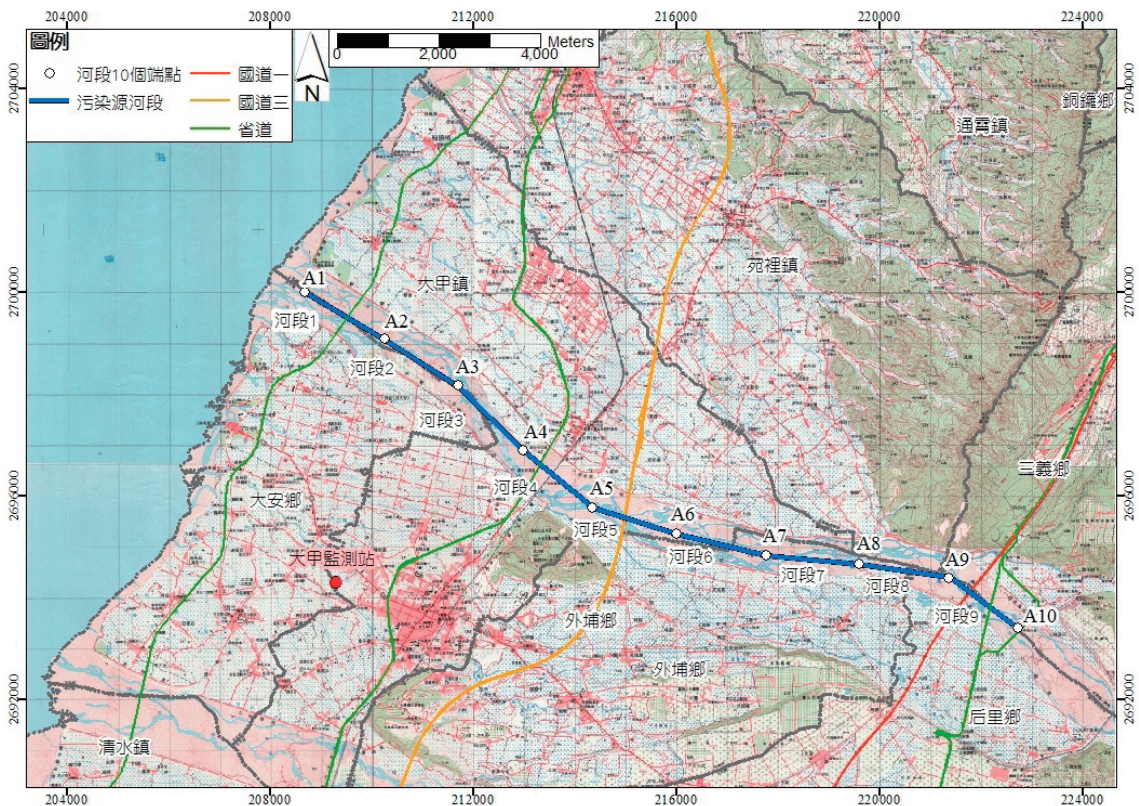


圖 5 大安溪 FDM 模擬河段範圍與線型揚塵源示意

Fig.5 Range of different river reach (Reach-1~Reach-9) and line-pattern fugitive dust source for FDM simulation of Da-An River

### 3. 邊界條件

在揚塵演算過程中，河川揚塵之擴散方式並不受幾何邊界之影響，且幾何邊界受點之  $PM_{10}$  濃度並無監測資料可供比對，因此其揚塵濃度計算值完全依據 FDM 之演算模式來決定。

### 4. 揚塵排放率計算

污染源資料除幾何輸入參數之外，還需輸入污染源排放率。依據相關研究成果可知河床揚塵多因風蝕作用造成，且其排放量與風速具正相關性。本研究採用之 FDM 模式，將接受與風速相關之揚塵排放率，亦即採用輸入之風速與揚塵排放率之關係曲線，來進行揚塵模擬。此計算方式將可求得較符合現況揚塵排放特性之揚塵擴散濃度。本研究參考「河川揚塵對大氣懸浮微粒影響程度之評估專案工作計畫」(2008) 報告中風洞實驗數據資料來建立揚塵排放率與風速之關係式。表 1 為大安溪河床砂粒之風洞實驗數據。其中，實驗採用之風洞截面尺寸為  $0.3 \times 0.5$  m (=寬 $\times$ 高)，風洞內鋪設砂土之面積為  $3 \times 0.3$  m (=長 $\times$ 寬)，實驗中量測不同風速下之揚塵 ( $PM_{10}$ ) 濃度。若實驗中風洞內之風速及揚塵濃度皆假設為均勻分佈，則由下式可計算求得單位面積在單位時間內之揚塵排放重量 (即排放率 E)。

$$E = V \times A \times C \quad (3)$$

其中：

$V$  = 風速 (m/sec)

$A$  = 風洞截面積 ( $m^2$ )

$C$  = 揚塵濃度 ( $\mu g/m^3$ )

本研究以線源型態來進行河床揚塵濃度模擬，所需採用之排放率單位為 g/m-sec。因此，將前述排放率 E 乘以河床寬度後再經單位轉換即可求得線源排放率  $EL$  (g/m-sec)。河床裸露面之寬度可參考航照圖，並假設為平均值 460 m。

FDM 模式所需輸入與風速相關之排放率，乃建立在 10 m 高度之風速條件下之排放率。因此，FDM 模式內建之風剖面公式將輸入氣象資料中之風速轉換成為 10 m 高度之相當風速，再據以計算該風速下對應之排放率。其風剖面公式可表示如下：

$$U_{10} = U_* \times (10/h)^k \quad (4)$$

其中：

$U_{10}$  為 10 m 高度之風速；

$U_*$  為高度  $h^*$  之風速；

$k$  為指數常數。

在 FDM 模式中， $k$  值依垂直穩定度之等級來決定，垂直穩定度 A~F 級所對應之  $k$  值分別為：0.07、0.07、0.1、0.15、0.35 及 0.35，其代表 6 種垂直穩定度情況下之垂直風剖面關係。本研究以中性穩定度 D 級 ( $k$  值為 0.15) 之情況，將風洞實驗之風速 (設為 0.2 m 高度之風速) 轉換為 10 m 高度之風速。線源排放率與 10 m 高度風速之推算結果，整理如表 2 所示。由迴歸分析所建立之線源排放率  $EL$  (g/m-sec) 與風速 (m/sec) 之迴歸公式如下式：

$$EL = 0.00020136 \times (U_{10})^{2.721} \quad (5)$$

依迴歸分析上述公式之相關係數  $R^2$  值為 0.997，如圖 6 所示。公式 (11) FDM 模式中線源排放率  $EL$  (g/m-sec) 與風速之關係式，用以模擬揚塵擴散後之濃度。

表 1 大安溪土砂樣本之風洞實驗結果

Table 1 Testing results of wind tunnel test on sandy soil sampled from Da-An River

風速 (m/sec)	$PM_{10}$ ( $\mu g/m^3$ )
7	360
8	484
9	560
10	677
11	844
12	948
13	996
14	1220
15	1406

表 2 大安溪 0.2 m 高度之風速轉換成 10 m 高度之風速時，FDM 線源揚塵源之當量排放率

Table 2 Equivalent emission rate of line-pattern fugitive dust source of FDM for wind velocity at 10 m height converted from wind velocity at 0.2 m height

$U_{0.2}$ (m/sec)	$U_{10}$ (m/sec)	$PM_{10}$ $\times 10^{-3}$ ( $\mu g/m^3$ )	$E$ $\times 10^{-4}$ (g/m <sup>2</sup> -sec)	$EL$ $\times 10^{-1}$ (g/m-sec)
7	12.59	0.36	4.20	1.93
8	14.39	0.48	6.45	2.97
9	16.18	0.56	8.40	3.86
10	17.98	0.68	11.28	5.19
11	19.78	0.84	15.47	7.12
12	21.58	0.9	18.96	8.72
13	23.38	1.00	21.58	9.93
14	25.18	1.22	28.47	13.09
15	26.97	1.41	35.15	16.17

## 5. 揚塵排放源

大安溪模擬河段總長度約 15 km, 考慮河川轉折與河段長度之幾何特性, 以及受體點分布之面積 (或揚塵擴散預測面積) 廣達 187 公頃之大區域情況, 因此, 吾人可將模式中河段之面型揚塵源近似為線型揚塵源, 並將河段劃分為 9 段, 且各河段劃分長度相等以利於後續各河段之揚塵貢獻量分析, 各河段之端點座標如表 3 所示。

另外, 排放高度為砂塵經風力或其他擾動揚起後, 僅受擴散作用控制下之排放高度。實際上, 河床揚塵自河床面起至特定高度 (又稱頂部高度) 間皆有砂塵排放, 然而在 FDM 模式中只採用頂部高度來代表揚塵排放高度, 參考一般現地觀察資料及過去經驗可假設揚塵排放高度為 5 m。

表 3 大安溪 FDM 模擬各劃分河段之端點編號及座標  
Table 3 Coordinate of end points (A1~A10) used to define the number of river reach (Reach-1~Reach-9) for FDM simulation of Da-An River

點位編號	點位座標	
	X	Y
A1	208666	2700000
A2	210250	2699100
A3	211686	2698173
A4	212980	2696891
A5	214338	2695764
A6	216004	2695264
A7	217759	2694828
A8	219604	2694675
A9	221373	2694393
A10	222718	2693419

註：座標系統採TWD67二度分帶座標

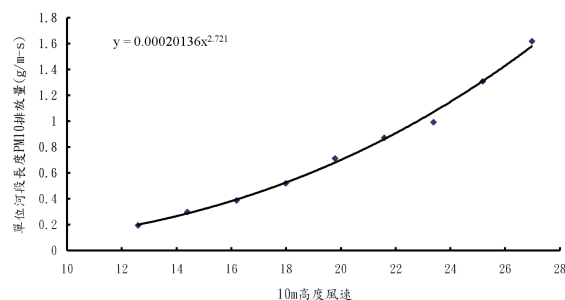


圖 6 大安溪之 FDM 模式線型揚塵源所採用之風速與排放量關係

Fig.6 Relationship between wind velocity and emission rate of line-pattern fugitive dust source used for the FDM of Da-An River

本研究模擬部份採用大甲空品測站之實測資料與揚塵濃度模擬值進行比對, 來檢驗 FDM 模式所採用排放率公式之合理性。本研究依據 97 年台中縣空品報告中大甲空品測站之年平均總  $PM_{10}$  濃度值大約為  $70 \mu g/m^3$ 。然而, 必須指出環保署空品測站  $PM_{10}$  濃度實測值中, 實際上包含了各類型污染源之貢獻, 河川揚塵  $PM_{10}$  濃度只為其中一部分 (蔣孟祺, 2008)。因此, 依上述排放率公式計算出研究區河段揚塵擴散後於大甲空品測站之年平均揚塵  $PM_{10}$  濃度模擬值為  $9.2 \mu g/m^3$ , 與其總  $PM_{10}$  實測值 ( $=70 \mu g/m^3$ ) 為低之比對原則, 判定 FDM 模式所採用之排放率落在合理範圍內。由於目前並無河川揚塵  $PM_{10}$  濃度之長時間觀測數據, 因此僅能採用環保署空品測站之  $PM_{10}$  觀測濃度值 (其值必然高於河川揚塵  $PM_{10}$ ) 進行比對, 以判釋模擬結果之合理性。

## 6. 揚塵受體點

受體點即為 FDM 模式之數值監測點, 由此點位可獲得揚塵濃度之計算結果。為瞭解河床揚塵擴散後之  $PM_{10}$  濃度分布, 在研究河段兩側布設受體點以計算其  $PM_{10}$  濃度, 受體點高度在 FDM 模式中設為 1.5 m, 其約為人體呼吸之平均高度, 受體點布設如圖 7 所示。另外, 在鄰近大安溪之揚塵敏感區 (方位由西向東), 如頂安村、高鐵橋鄰近地區、大甲鎮及義里大橋鄰近地區等同時布設受體點, 分析其受河段揚塵影響之程度。

## 7. 氣象資料

氣象資料之選用以距離研究區河段較近之氣象站資料為原則, 並採用近似大安溪河床風場實際情況之風向及風速資料輸入 FDM 模式計算擴散後之  $PM_{10}$  濃度。距離研究區較近之中央氣象局測站為梧棲測站與台中測站, 由繪製之兩個測站之風玫瑰圖 (圖 8(a) 與圖 8(b)), 可知梧棲測站之風速雖然較高, 但因風向過度集中, 與大安溪河床實際風速不相符, 而台中測站風速低, 與大安溪河床實際風速之差異太大。

另外, 整理鄰近之三義、豐原及沙鹿等環保署空氣品質測站之風向及風速資料, 可繪製風玫瑰圖 (圖 8(c)、圖 8(d) 與圖 8(e))。由風玫瑰圖顯示, 三義測站風向侷限於單一方向, 研判因受地形影響所致, 與研究區之風向不同, 故不予採用; 豐原測站之風向較無明顯之地形影響, 但由於位在建築物密集之市區, 風速明顯偏低; 沙鹿測站之風向分布型態與豐原測站類

似，因其受地形因素影響較不明顯，因此風速較豐原測站高。由前述 5 測站地文與風特性綜合分析後，本研究將採用沙鹿測站之風向、風速及氣溫資料進行研究區之 FDM 數值模擬。

除了風向與風速外，FDM 模式尚需輸入穩定度及混合層高度之資料。除了風向與風速外，FDM 模式尚需輸入穩定度、混合層高度及氣溫等資料。本研究採用 2008 年板橋探空氣球所得資料，經計算先求得風速、雲量及日照強度等資料後，再利用 Pasquill (1961) 之穩定度等級分類表來決定穩定度等級。其中，穩定度等級共分成六級，級別由最不穩定等級至最穩定等級，可分為 A、B、C、D、E 及 F 級。配合五個風速區間之風速大小，即可決定穩定度等級。白天採用日照強度即強、中及弱三個等級來決定穩定度之等級，而夜晚則以雲量 0.5 (=4/8) 作為分界點來決定穩定度之等級。

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，本研究使用之混合層高度乃採用

Holzworth (1972) 所提出之乾絕熱模式 (乾空氣或未飽和濕空氣在絕熱上升或下沉過程中溫度隨高度的變化率，又稱乾絕熱直減率)，將地面溫度沿乾絕熱曲線降溫，直至與探空溫度曲線 (用探空氣球蒐集的高空溫度數據繪出之曲線) 相交處之高度定義為混合層高度，為目前空品分析模式採用最廣之方法。本研究以 2008 年板橋探空氣球所得資料來估計混合層高度。

## 8. 揚塵模式執行相關參數

大安溪研究區河段長約 15 km，在 FDM 數值模擬中具有線型污染源 (以下簡稱線源) 之幾何特性。因此，FDM 揚塵模擬採用線源之型態來進行污染源擴散計算。FDM 模式之主要輸入資料包括：地表粗糙度、粒狀物密度、風速計距離地面之高度、粒徑分佈等通用參數，以及污染源資料、受體點資料、氣象資料等特定參數。整理 FDM 模式所需輸入資料及各項參數設定如表 4 所示。



圖 7 大安溪 FDM 模擬受體點位置 (紅色實心圓點)

Fig.7 Layout of receptor for FDM simulation of Da-An River (red solid circle)



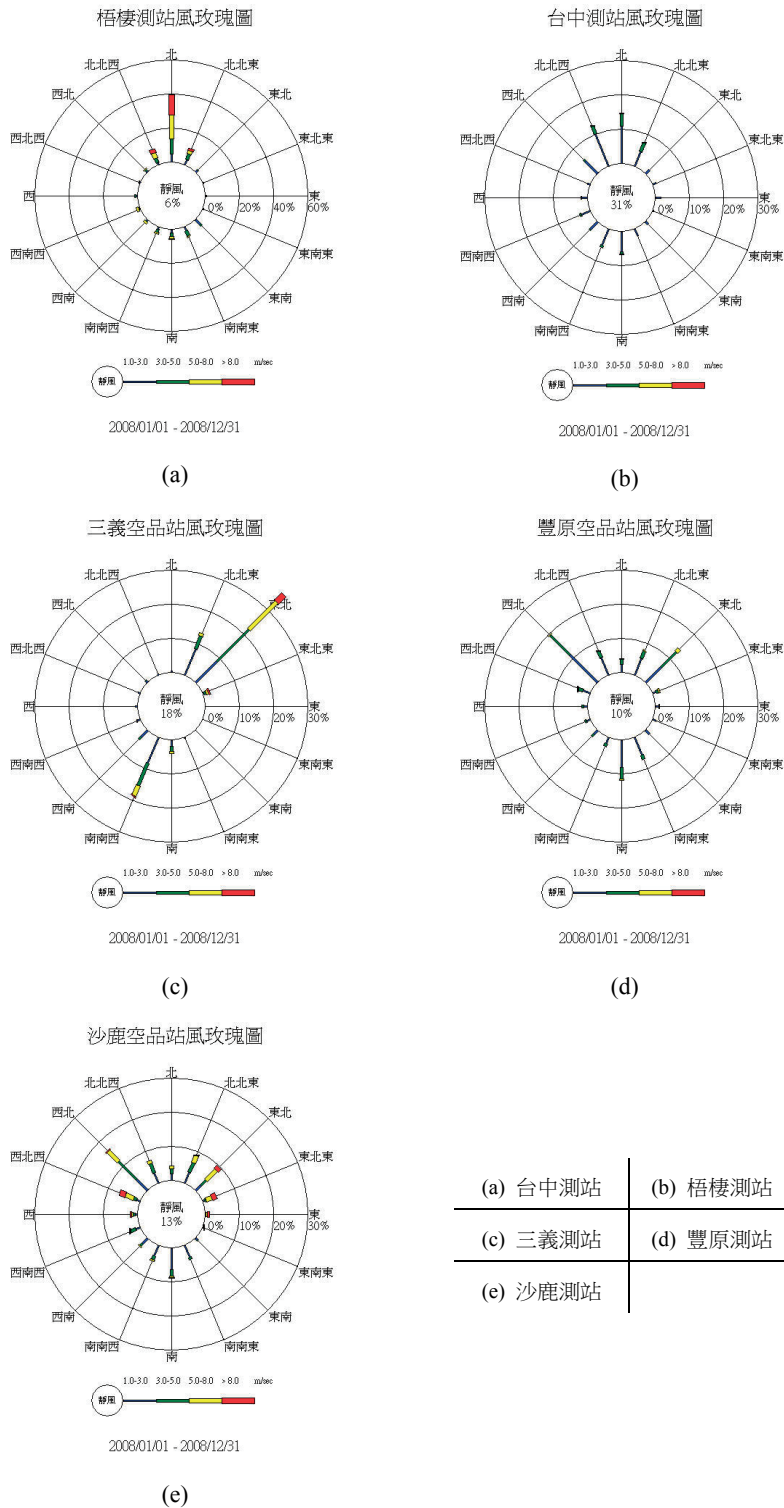


圖 8 各測站風玫瑰圖 (2008 年)

Fig.8 Wind rose diagram (2008) of instrumentation stations (a)Tai-Chung (b)Wu-Chi (c)San-Yi (d)Feng-Yuan (e)Sha-Lu

表 4 大安溪 FDM 模式輸入資料與參數設定

Table 4 Input data and determination of parameters required for FDM simulation of Da-An River

資料項目	參數設定說明
<b>選項開關</b>	
1 線源演算法	線源演算法選用預設之五等分積分，參數設定為1
2 氣象資料選項	氣象資料採用預處理之氣象檔案 (Rammet binary format)，參數設定為2
3 繪圖輸出檔	產生繪圖資料檔，參數設定為2
4 氣象資料列表選項	氣象資料不列表，參數設定為1
5 後處理選項	不產生後處理程式資料檔，參數設定為1
6 沈降參數選項	自動計算每小時之沈澱速率與重力沈降速度，參數設定為1
7 一小時值輸出選項	若選擇一小時值輸出則設定為4，其他時段則設定為1
8 三小時平均濃度輸出	參數設定為1
9 八小時平均濃度輸出	參數設定為1
10 廿四小時平均濃度輸出	若選擇日平均值輸出則設定為4，其他時段則設定為1
11 長期輸出 (long term)	若選擇年平均值輸出則設定為4，其他時段則設定為1
12 靜風處理	參數設定為1，當風速等於1 m/sec且風向與前一筆相同時，將判定為靜風
13 逐時排放檔	不採用逐時排放檔，參數設定為1
14 螢幕顯示	顯示模擬之氣象資料序號與污染源序號，參數設定為0
<b>整數參數</b>	
污染源數目	配合河段劃分為9段，參數設定為9
受點數	配合已知監測點位置進行受體點布設，參數設定為205
粒徑等級分類	粒徑等級假設為1種
模擬時數	參數設定為民國97年全年總時數共8784小時
<b>實數參數</b>	
氣象資料時間間隔	氣象資料為每小時一筆資料，參數設定為60分鐘
地表粗糙度	參考「河川揚塵對大氣懸浮微粒影響程度之評估專案工作計畫」報告 (2008，行政院環保署，中山醫學大學執行)，參數設定為3 cm
長度單位轉換係數	長度單位均採公制，參數設定為1
粒狀物密度設定值	參考「河川揚塵對大氣懸浮微粒影響程度之評估專案工作計畫」報告 (2008，行政院環保署，中山醫學大學執行)，參數設定為2.60 g/cm <sup>3</sup>
風速計離地面高度	採用沙鹿空品站風速計高度，設定為20 m
氣象資料選擇開關	0表示不模擬，1表示模擬，共有366個開關，全年氣象條件均模擬，全部參數設定為1
特徵粒徑	假設為1種粒徑分佈，特徵粒徑假設為10 μm
粒徑分佈	假設為1種粒徑分佈，參數設定為1
受點	依受體點布設位置，輸入X,Y座標。參考人類一般呼吸高度Z座標設定為1.5 m (FDM設定污染源於離地表1.5 m高度處進行擴散)
<b>污染源資料</b>	
體源層數 (垂直分布污染源)	設定為9層
污染源類別	採線源方式模擬，參數設定為2
指定粒徑分佈	若不在污染源資料中另行指定時，參數設定為0
排放率	參考「河川揚塵對大氣懸浮微粒影響程度之評估專案工作計畫」報告 (2008，行政院環保署，中山醫學大學執行) 之風洞實驗資料，進行迴歸分析可求得排放率指數公式，參數設定為0.00020136
風速相關係數	參考「河川揚塵對大氣懸浮微粒影響程度之評估專案工作計畫」報告 (2008，行政院環保署，中山醫學大學執行) 風洞實驗資料，進行迴歸分析可求得指數公式，參數設定為2.721
污染源X座標	依河段劃分結果輸入第一個端點X座標
污染源Y座標	依河段劃分結果輸入第一個端點Y座標
污染源X座標(2nd)	依河段劃分結果輸入第二個端點X座標
污染源Y座標(2nd)	依河段劃分結果輸入第二個端點Y座標
排放高度	經現場勘查，觀察河床揚塵之頂端高度，假設為5 m
線源寬度	假設裸露河床之平均寬度為460 m
指定污染源之粒狀物密度	使用第4列所指定之粒狀物密度值，此處空白

# 六、結果與討論

## 1. 研究區域揚塵潛勢分析

經前述輸入參數設定，本研究以 FDM 模式計算各個受體點在不同時間下之  $PM_{10}$  揚塵濃度，並以年平均、日平均及小時揚塵濃度值（以下簡稱濃度值）作為輸出資料。採用年平均濃度模擬值來繪製濃度值分布，如圖 9 示。由圖中可觀察到，揚塵  $PM_{10}$  濃度由河段向兩側逐漸遞減之現象，且由於一年中偏北風之風速較大，因此造成較大排放量，並經擴散後濃度較高值大多分布在河段南岸地區。再者，模擬結果同時顯示，大安溪南岸之頂安村、高鐵橋鄰近地區、大甲鎮及義里大橋等地區為較高揚塵濃度值集中之區域，此與歷年揚塵嚴重區域現場調查所得成果（經濟部水利署第三河川局，2010）比較亦相當吻合。

考慮颱風期間風速較大同時也伴隨較多降雨之時段，其現地條件並不易造成揚塵。因此，由敏感區-1~4（分別為頂安村、高鐵橋鄰近地區、大甲鎮市區及義里大橋）之揚塵模擬結果進行篩選得知，各敏感區最大濃度值出現時間分別為：(1) 敏感區-1 為 2 月 9 日，(2) 敏感區-2 為 5 月 10 日，(3) 敏感區-3 為 2 月 12 日，

(4) 敏感區-4 為 12 月 22 日。隨之，採用各敏感區揚塵最大濃度值出現日之  $PM_{10}$  濃度與時間資料，繪製最高模擬值出現日之揚塵  $PM_{10}$  濃度分布，如圖 10(a) ~ (d) 所示。必須指出者，由於敏感區-1~敏感區-4 所在區位，目前並無觀測資料可供判斷模式模擬之正確性及差異量。因此，上述各敏感區之揚塵模擬結果僅能視為在合理推估輸入參數條件下，求得之揚塵  $PM_{10}$  濃度分布趨勢以及其可能發生時段，單一特定時間之預測並不具有實務上的意義。

另者，2 月 9 日、5 月 10 日與 2 月 12 日之濃度空間分布與年平均濃度值的分布型態相類似，即  $PM_{10}$  濃度高值位於河段南岸地區。12 月 22 日之日平均  $PM_{10}$  濃度分布型態稍有不同，其濃度高值則集中在研究區河段之東半部。以敏感區-1（頂安村）為例，將敏感區-1 揚塵最大  $PM_{10}$  濃度值出現日該日之小時氣象條件列表，如表 5 示，並繪製其平均濃度最高之該日逐時  $PM_{10}$  濃度變化趨勢圖，如圖 11(a) ~ (d) 所示。由上述繪圖可明顯看出，風速及風向對揚塵  $PM_{10}$  濃度之影響。當風向與河段流向相近時，揚塵會在局部地區出現高濃度值，且其濃度值較其他風向造成之濃度值還要高。

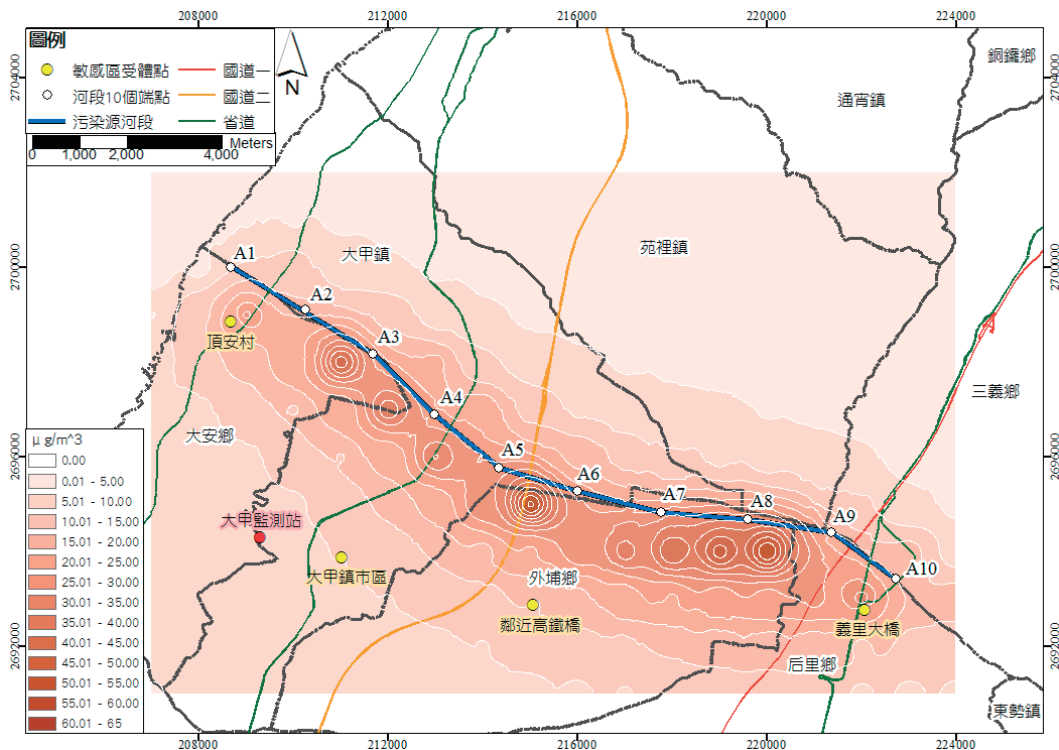


圖 9 揚塵模擬年平均  $PM_{10}$  濃度值分布

Fig.9 Distribution of annually average  $PM_{10}$  concentration from FDM simulation

表 5 敏感區-1 之 2008 年 2 月 9 日各小時氣象條件

Table 5 Hourly meteorological conditions for Region-1 at 2008, Feb./09

時間 (年月日時)	風向 (°)	風速 (m/sec)	絕對溫度 (K)	大氣 穩定度 (等級)	混合層 高度 (m)	時間 (年月日時)	風向 (°)	風速 (m/sec)	絕對溫度 (K)	大氣 穩定度 (等級)	混合層 高度 (m)
08020901	96	9.9	285.9	D	300.0	08020913	44	7.5	286.4	D	1103.5
08020902	100	8.5	285.3	D	300.0	08020914	92	10.8	286.4	D	1103.5
08020903	110	9.8	285.5	D	300.0	08020915	92	9.2	284.4	D	577.8
08020904	74	9.9	284.8	D	300.0	08020916	87	9.9	284.1	D	431.0
08020905	85	11.0	284.7	D	300.0	08020917	111	8.4	283.9	D	414.3
08020906	138	11.4	284.0	D	300.0	08020918	30	9.2	283.1	D	300.0
08020907	85	9.5	284.0	C	422.3	08020919	71	7.6	283.2	D	565.8
08020908	39	8.1	284.4	D	577.8	08020920	308	7.9	283.2	D	565.8
08020909	49	8.4	284.9	D	725.8	08020921	55	7.2	283.6	E	811.2
08020910	84	9.3	284.9	D	725.8	08020922	49	7.3	283.6	D	811.2
08020911	97	7.7	285.2	D	805.5	08020923	61	7.3	283.7	E	836.7
08020912	59	9.2	285.4	D	856.3	08020924	197	8.1	283.4	D	724.5

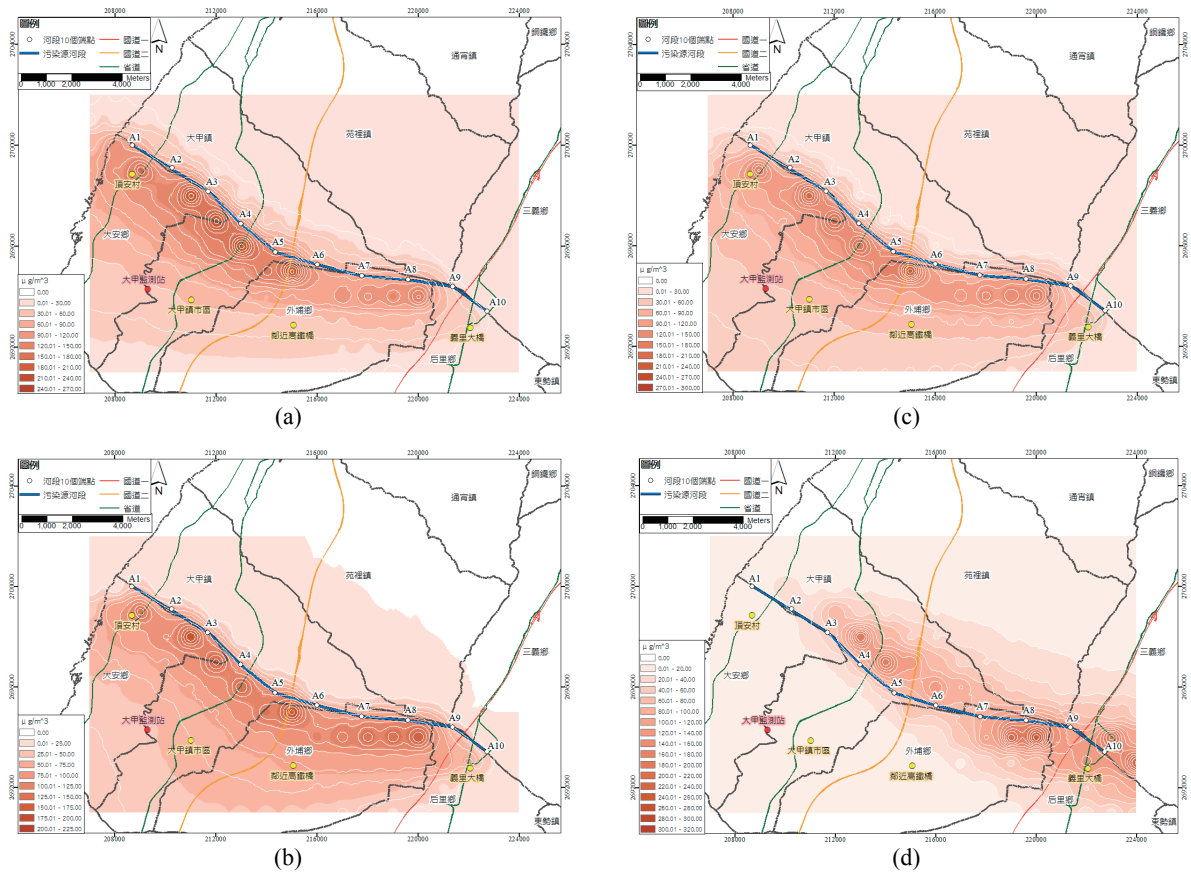
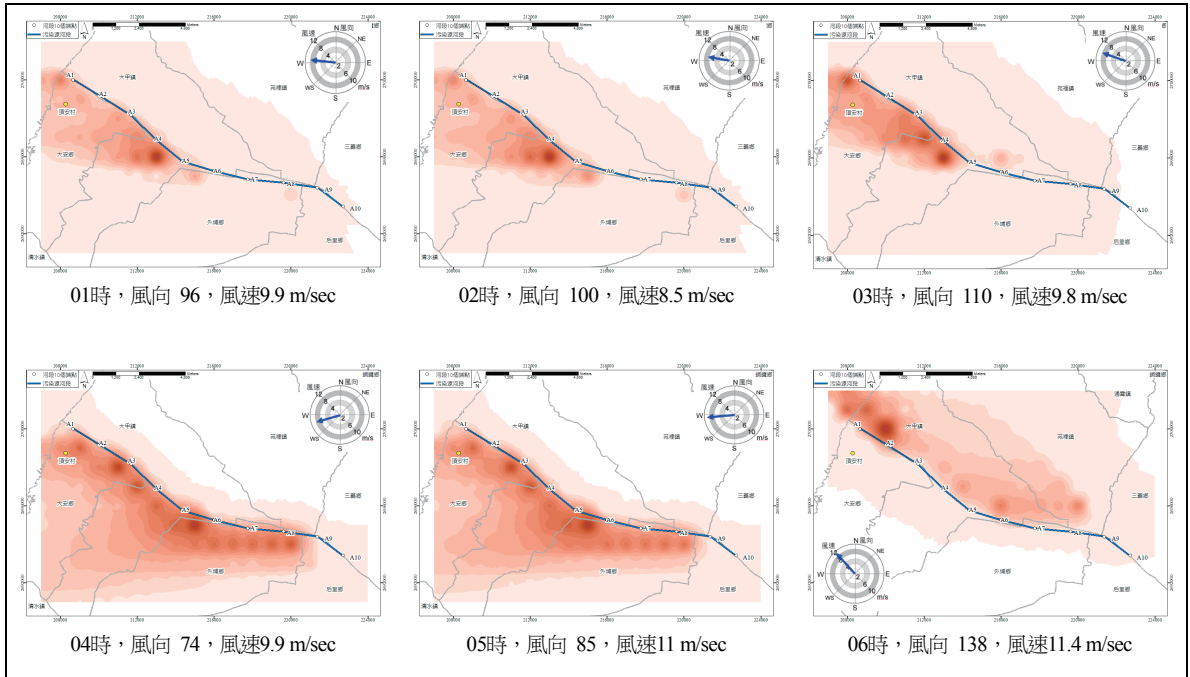
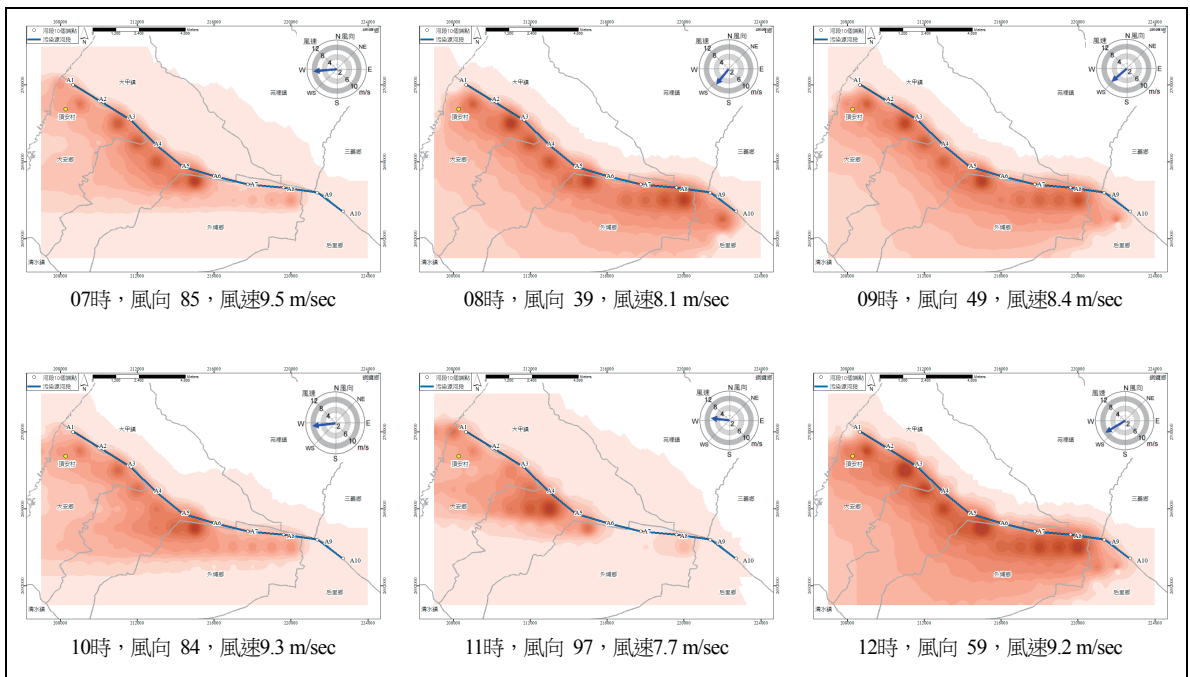


圖 10 各敏感區日平均揚塵最高模擬值出現日之揚塵 PM10 濃度分布 (a) 敏感區-1 (2 月 9 日) (b) 敏感區-2 (5 月 10 日) (c) 敏感區-3 (2 月 12 日) (d) 敏感區-4 (12 月 22 日)

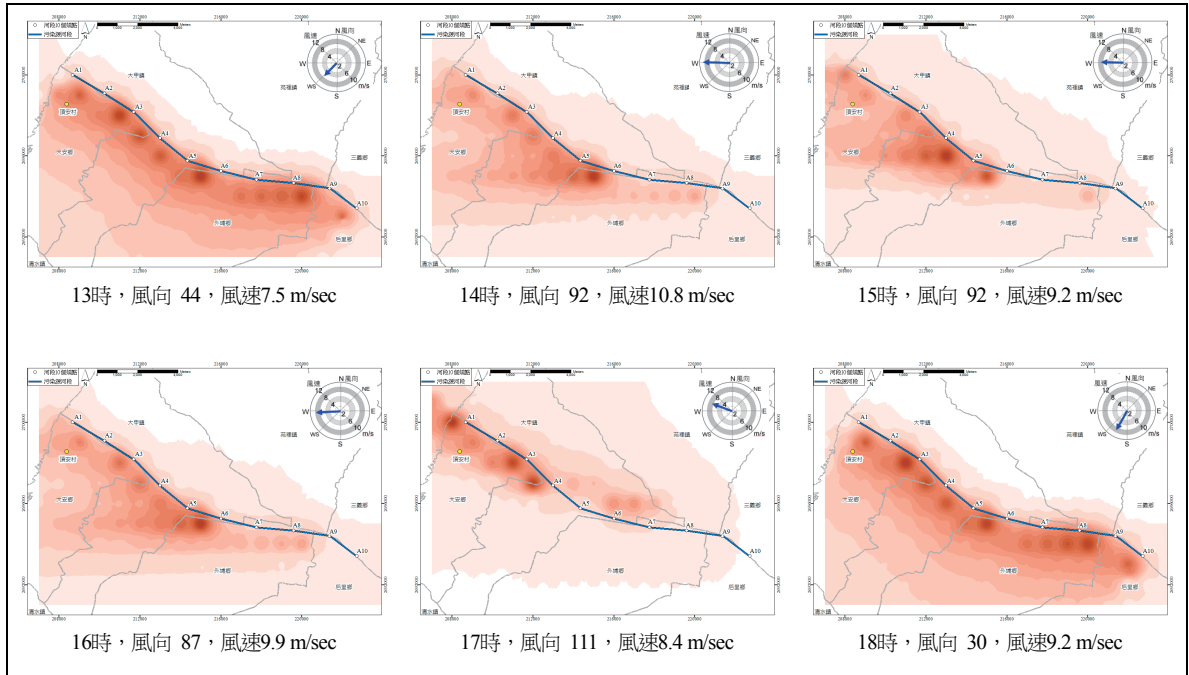
Fig.10 Distribution of PM<sub>10</sub> concentration for different regions susceptible to fugitive dust disaster and the day with occurrence of maximum simulation of daily PM<sub>10</sub> concentration (a) Region-1, Feb./02 (b) Region-2, May/10 (c) Region-3, Feb./12 (d) Region-4, Dec./22



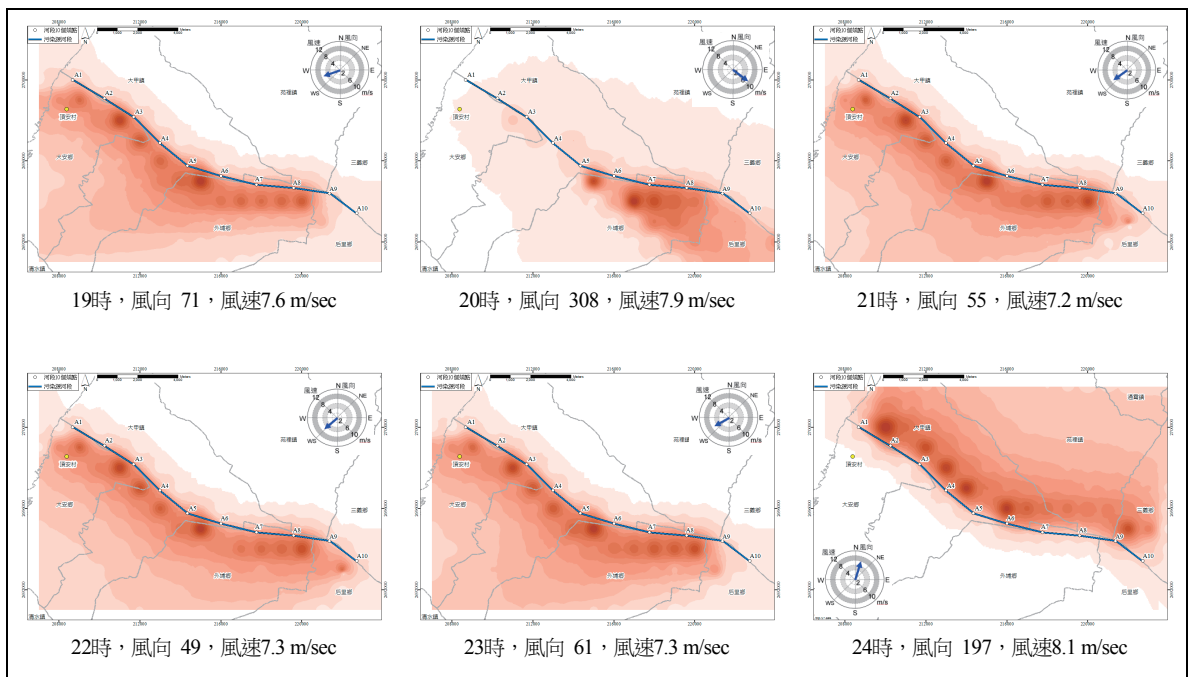
(a)



(b)



(c)



(d)

圖 11 2008 年 2 月 9 日平均濃度最高之該日小時 PM<sub>10</sub> 濃度變化趨勢圖 (a) 01-06 時 (b) 07-12 時 (c) 13-18 時 (d) 19-24 時

Fig.11 Variation trend of hourly PM<sub>10</sub> concentration at 2008, Feb./09 with the occurrence of maximum simulation of daily average PM<sub>10</sub> concentration (a) 01~06 hours (b) 07~12 hours (c) 13~18 hours (d) 19~24 hours

## 2. 各敏感區揚塵來源分析 (貢獻量分析)

為瞭解各敏感區受揚塵最大影響之來源, 本研究以 FDM 模式個別計算大安溪 9 個河段揚塵源擴散後於受體點之濃度模擬值, 並彙整模擬結果進行貢獻量分析。

河床之揚塵型態並不像工廠、車輛等污染源具有持續穩定排放之特性, 河床揚塵主要受風力作用而產生排放, 且其排放率與風速具有顯著之相關性。一般而言, 在風力較弱之季節, 其揚塵影響不如工廠、車輛等污染源顯著。然而, 在風力較強之天候, 當河床處於裸露且乾燥之狀態下, 其 PM<sub>10</sub> 排放對鄰近地區之影響可能達到人為污染源排放影響之 10 倍以上。

一般而言, 平均風力較強之東北季風季節較容易感受到河床揚塵之影響, 只是影響之時間通常不會持續太久, 對年平均值之濃度貢獻度較不明顯。因此, 本研究在東北季風盛行期間之模擬結果後, 以各敏感區代表持續影響之冬季季平均, 來探討 9 個河段對各敏感區揚塵濃度之貢獻百分比, 並整理如表 6。其中顯示, 對頂安村受體點濃度而言, 其最高 PM<sub>10</sub> 季平均濃度之貢獻主要來自鄰近的河段-1 之揚塵影響, 揚塵貢獻量為 87.12%。大甲鎮與高鐵橋受體點濃度之主要貢獻各來自河段-4 的揚塵源貢獻量 38.72% 與河段-6 的揚塵貢獻量為 41.05%。義里大橋受體點則以河段-9 之揚塵貢獻最多。最後, 可依各河段對特定敏感區之揚塵貢獻量, 在各河段之裸露河床揚塵源進行適當抑制工法之配置, 以達到最佳之揚塵抑制效果。

表 6 大安溪 FDM 模擬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 reach (Reach-1~Reach-9) to the regions susceptible to fugitive dust disaster of FDM simulation of Da-An River**

敏感點貢獻量分析	12~2月平均值				
	敏感區1	敏感區2	敏感區3	敏感區4	
河段-1	87.12%	2.60%	2.72%	1.29%	
河段-2	9.90%	4.58%	2.77%	1.52%	
河段-3	1.55%	16.90%	3.52%	2.16%	
河段-4	0.45%	38.72%	4.75%	2.87%	
揚塵源	河段-5	0.26%	18.77%	11.83%	3.87%
	河段-6	0.22%	9.81%	41.05%	6.39%
	河段-7	0.20%	4.61%	19.66%	11.44%
	河段-8	0.17%	2.55%	9.41%	16.18%
	河段-9	0.13%	1.47%	4.29%	54.27%

## 七、結 論

本研究使用 FDM 數值模式計算大安溪河川揚塵 PM<sub>10</sub> 濃度在各受體點及各敏感區之分布情況。並利用行政院環保署 (2008) 「河川揚塵對大氣懸浮微粒影響程度之評估專案工作計畫」報告中, 風洞實驗數據資料來建立河川揚塵排放率與風速之關係式。同時, 採用河川鄰近空氣品質測站 (大甲測站) 之 PSI 換算之 PM<sub>10</sub> 濃度觀測值與大安溪年平均之 PM<sub>10</sub> 濃度模擬值進行比較, 以確定模擬結果與現地狀況之吻合度以及可靠性。最後, 整合 Arc-GIS 地理資訊系統與 FDM 模式之計算成果, 繪製揚塵擴散濃度潛勢圖。此做法不僅可看出模擬河段之 PM<sub>10</sub> 濃度分布情況, 亦可由模擬濃度潛勢圖中觀察出不同風速與風向, 對河川揚塵變化趨勢所造成的影響。

由各河段揚塵對 PM<sub>10</sub> 濃度之貢獻量分析得知, 各個敏感區因位置及離河床距離的不同, 造成河川揚塵源之河段亦不同。因此, 未來在該敏感區之揚塵抑制工法配置, 應於此兩河段之裸露河床為主, 以便達到最經濟及最實效之揚塵抑制效果。

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, 目前欠缺空品測站各不同污染源對 PM<sub>10</sub> 濃度之貢獻百分比資料。因此, 僅依照大甲監測站年平均之 PM<sub>10</sub> 濃度模擬值小於實際觀測值之間接比對結果來初步驗證模擬之合理性。再者, 由於缺乏大安溪河床上真實之風速、風向及揚塵濃度等相關監測數據資料可供比對使用。因此, 在未來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, 10(1-2), 57-59。(Sadao, T. (1954). "A study on prevention of wind erosion." *Agricultural Meteorology*, 10(1-2), 57-59, (in Japanese))
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」, 行政院環境保護署出版。(Environmental Protection Administration. (2008). "The working project to estimate the influence of the fugitive dust to the air suspension particle in central Taiwan." Published by

- Environmental Protection Administration, Taiwan. (in Chinese))
3. 金門縣衛生局 (1998), 「粒狀物污染成因探討」, 金門縣衛生局出版。(Public Health Bureau, Kinmen County, ROC. (1998). "A study on particulate matter pollution." Published by Public Health Bureau, Kinmen County, ROC. (in Chinese))
  4. 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 10(2), 173-193。  
(Lin, S.H., Jiang Y.J. (1979). "Test on the relationships between sand moisture and its erodibility by wind." *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 10(2), 173-193. (in Chinese))
  5. 范姜明威 (2010), 「台灣中部河口飛砂及揚塵之調查與研究」, 碩士論文, 國立中興大學水土保持學系。(Fanjiang, M.W. (2010). *Investigation and study of aeolian sand and fugitive dust on the estuaries in central Taiwan*. Master thesis, National Chung Hsing University, Department of Soil and Water Conservation. (in Chinese))
  6. 吳昌翰 (2006), 「台中港海岸飛砂量推估之研究」, 碩士論文, 國立中興大學水土保持學系研究所。(Wu, C.H. (2006). *A study on the estimate wind blown sand in Taichung Harbor*. Master thesis, National Chung Hsing University, Department of Soil and Water Conservation Research Institute. (in Chinese))
  7. 游繁結 (1989), 「濁水溪河口飛砂量之調查研究」, 農林學報, 38(1), 75-104。(Yu, F.C. (1989). "Investigation and study on the quantity of sand movement on the mouth of the Cho-Shui River." *Journal of Agriculture and Forestry*, 38(1), 75-104. (in Chinese))
  8. 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」, 經濟部水利署第三河川局出版。(Water Resource Agency. (2010). "A fugitive dust prevention project for Da-An, Dajia and Wu River." Published by the third river management office, Water Resource Agency, Taiwan. (in Chinese))
  9. 孫孟祺 (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。(Suen, M.C. (2008). *A study for using receptor model to analysis the affect of river bank in central air quality area*. Master thesis, Department of Environmental Engineering, National Chung Hsing University. (in Chinese))
  10. Abbott, M.L. (1999). "Air dispersion modeling of mine waste in the southeast Missouri Old Lead Belt." Idaho National Engineering and Environmental Laboratory.
  11. Arpactoğlu, C.B., and Er, C. (2003). "Estimation of fugitive dust impacts of open-pit mines on local air quality – A case study: Bellavista Gold Mine, Costa Rica." 18th. International Mining Congress and Exhibition of Turkey - IMCET.
  12. Bagnold, R.D. (1954). *The physics of blown sand and desert dunes*. London: Mathuen.
  13. Blanco, H., and Lal, R. (2008). *Principles of Soil Conservation and Management*. Springer Science, 55-80.
  14. Ermak, D.L. (1977). "An analytical model for air pollutant transport and deposition from a point source." *Atmospheric Environment*, 11, 231-237.
  15. Sabah, A., and Abdul, W. (2006). "Impact of fugitive dust emissions from cement plants on nearby communities." *Ecological Modeling*, 195, (3-4).
  16. Sivacoumar, R., Mohan Raj, S., Chinnadurai, J., and Jayabalou, R. (2009). "Modeling of fugitive dust emission and control measures in stone crushing industry." *Journal of Environmental Monitoring*, 11, 987-997.
  17. Trivedi, R., Chakraborty, M.K., and Tewary, B.K. (2009). "Dust dispersion modeling using fugitive dust model at an opencast coal project of Western Coalfields Limited, Indis." *Journal of Scientific and Industrial Research*, 68, 71-78.
  18. Tsoar, H., and Pye, K. (1987). "Dust transport and the question of desert loess formation." *Sedimentology* 34 (1), 139-153.
  19. EPA. (1992). "User's guild for the fugitive dust model (FDM)." User's Instruction, published by the United States Environmental Protection Agency.
  20. Zhibao, D. (2002). "The flux profile of a blowing sand cloud: A wind tunnel investigation." *Geomorphology*, 49, 219-230.

---

2010年11月30日 收稿

2011年02月18日 修正

2012年03月02日 接受

(本文開放討論至 2013 年 3 月 31 日)