

台灣中部河口飛砂及揚塵之調查與研究

黃隆明⁽¹⁾ 陳天慈⁽²⁾ 范姜明威⁽³⁾

摘要

本研究選定大安溪、大甲溪及烏溪鄰近出海口處，飛砂及揚塵危害嚴重地點，從事現地風速、風向、飛砂、揚塵（PM₁₀）及風蝕量之觀測，並探討飛砂量與揚塵量之關係；為彌補現地實驗之不足，再於室內風洞進行不同風速、含水率、砂粒粒徑與飛砂量之觀測；綜合實驗結果顯示，大安溪、大甲溪與烏溪之 PM₁₀ 分別為總體積 5.8%、4.6% 與 2.1%；而揚塵遞減率每公里分別約為 75%、95%及 70%。再者，砂粒粒徑介於 0.25~0.84 mm 時，其起始風速為 5.0~13.0 m/s；砂粒粒徑為 0.25 mm 以下時，其起始風速為 4 m/s。又當砂粒含水率低於 0.52%時，飛砂量達到最大值；含水率由 0.77%遞增至 1.70%時，飛砂量急遽遞減，而含水率達 3.40%時，對砂粒起動之抑制作用達到最大值。至於各河口飛砂量與揚塵量之關係分別為：大安溪： $Q' = 102.22Q^{1.05}$ 、大甲溪： $Q' = 50.705Q^{1.57}$ 及烏溪： $Q' = 85.608Q^{1.17}$ 。

(**關鍵詞**：飛砂、揚塵、風洞)

Investigation and Study of Aeolian Sand and Fugitive dust on the Coastal area in Central Taiwan

Long-Ming Huang⁽¹⁾ Tian-Cih Chen⁽²⁾ Ming-Wei FanJiang⁽³⁾

Associate Professor⁽¹⁾, Graduate Student⁽²⁾ and Master⁽³⁾, Department of Soil and Water Conservation, National Chung-Hsing University, Taichung, Taiwan 402, R.O.C.

ABSTRACT

This study conducted on-site observation of wind speed, wind direction, aeolian sand, fugitive dust (PM₁₀) and wind erosion at the locations with severe hazard of aeolian sand and fugitive dust near the estuaries of the chosen Da-an River, Dajia River and Wu River, and examined the correlation between the amount of aeolian sand and fugitive dust. To offset the insufficiency in site experiment, further observation was made on various wind speed, water

(1)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)

(2)國立中興大學水土保持學系研究生

(3)國立中興大學水土保持學系碩士

content, sand particle size and the amount of aeolian sand in the indoor wind tunnel. The experiment results, when summarized, indicated that PM_{10} at Da-an River, Dajia River and Wu River were 5.8%, 4.6% and 2.1%, respectively, of the total volume; and fugitive dust decrease rates per kilometer were 75%, 95% and 70%, respectively. Also, when the sand particle size was in the range of 0.25-0.84 mm, the starting wind speed was 5.0-13.0 m/s; while the sand particle size was under 0.25 mm, the starting wind speed was 4 m/s. when water content in the sand was lower than 0.52%, aeolian sand reached peak value; when water content gradually decreased from 0.77% to 1.70%, aeolian sand decreased sharply, and when water content reached 3.40%, the inhibition to sand starting reached the maximum. The correlations between the amount of aeolian sand and fugitive dust at the estuaries were: Da-an River, Dajia River and Wu River were $Q' = 102.22Q^{1.05}$, $Q' = 50.705Q^{1.57}$ and $Q' = 85.608Q^{1.17}$.

(Keywords : Aeolian sand; Fugitive dust; Wind tunnel)

前言

台灣中部地區自 921 大地震之後，河床受地層變化之影響，造成河床有上升現象，此外上游地區興建攔水壩等設施，導致下游行水區銳減，促使下游河床裸露面積增加，淤沙現象更加嚴重，當東北季風來臨，強勁風勢造成飛砂走石、揚塵瀰漫，附近居民飽受飛砂揚塵災害之苦。

河床飛砂運移係以滾動、跳躍及懸浮三種型態為主，中部地區自民國 93 年至 94 年，部分空品測站其 PM_{10} 懸浮微粒濃度有明顯增高之趨勢（環境保護署，2005），造成沿岸鄉鎮社區籠罩在塵霧之下，嚴重影響空氣品質，為有效抑制河川揚塵發生，環保局、河川局曾嘗試使用綠覆蓋或植生工程，經實地觀察雖然可達到抑制作用，但此種方法於汛期間易遭損壞，浪費公帑。為深入瞭解河口飛砂及揚塵運移情形，本研究於東北季風期間針對中部三大河口大安、大甲及烏溪，從事現地風速、風向、飛砂、揚塵(PM_{10})及風蝕量之觀測，為彌補現地實驗之不足，再於室內風洞進行不同風

速、含水率、砂粒粒徑與飛砂量之觀測，據此探討飛砂及揚塵之起動機制，做為爾後防治對策之參考依據，此實為本研究之主要目的，本研究流程如圖 1 所示。

文獻回顧

一、風速相關研究

(一) Prandtl(1925)

一般最常使用之風速垂直分佈，大都以 Prandtl 對數法則為主，即大氣在中性狀態下風速 U 與高度 Z 有其下列相關性：

$$\frac{U}{U_*} = 5.75 \log \frac{Z}{Z_0} \quad (1)$$

式中

U_* ：摩擦風速 (m/s)

Z_0 ：地表粗糙長度 (m)

(二) Bagnold(1954)

當有飛砂情況下，如圖 2 所示，將 Prandtl 風速 U 與高度 Z 之公式修正為：

$$U = 5.75 \times U_*' \log \frac{Z}{Z'} + u_t' \quad (2)$$

式中

U_*' : 飛砂發生時之摩擦風速(cm/s)

Z' : 實線交點之高度(cm)

u_t' : 飛砂發生時, 高度 K' 處之風速(cm/s)

圖 2 之實線部份為飛砂產生之結果, 其斜率均為 $1/(5.75U)$, 其風速大都交會於 K' 點, 此點稱之為焦點(focal point), 該焦點之風速座標即為 u_t' 。

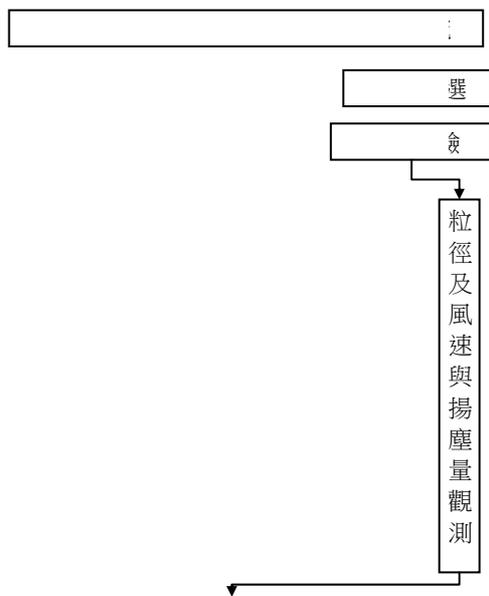


圖 1 研究流程圖

Figure 1 The flow chart of the study

(三) 吳正(1965)

在塔里木盆地布谷里沙漠地區, 用染色砂進行多次試驗觀測, 獲得各砂粒粒徑與啟動風速值, 如表 1 所示。

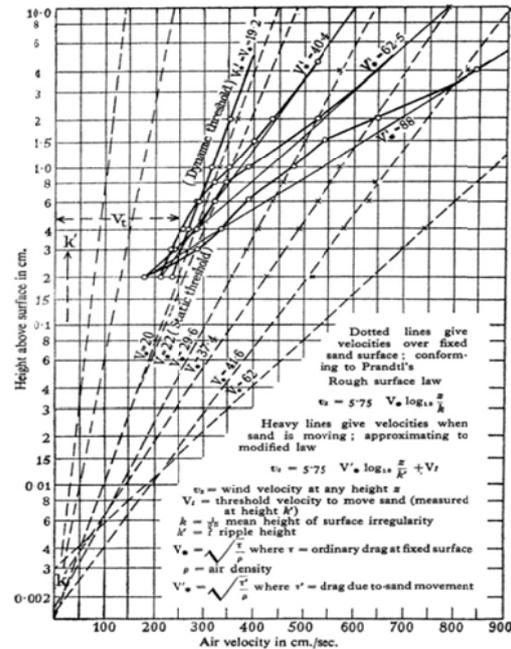


圖 2 風速垂直分佈 (Bagnold, 1954)

Figure 2 Wind velocity distributions (Bagnold, 1954)

表 1 砂粒粒徑與啟動風速值

Table 1 Sand particle size vs. starting wind speed

砂粒粒徑(mm)	啟動風速(離地 2m 處)(m/s)
0.10~0.25	4.0
0.25~0.50	5.6
0.50~1.00	6.7
>1.00	7.1

二、飛砂相關研究

(一) 林信輝、江永哲(1979)

將後龍溪口砂粒, 置於風洞內, 進行

不同含水率之飛砂量試驗，發現含水率少於 1.2%時，飛砂量無顯著變化。介於 1.2%~2.1%時，飛砂量急遽減少，若含水率大於 2.1%以上，對飛砂量抑制作用達到最大值。

(二) 蔡明華(1972)

研究海岸砂丘地土壤物理及化學性指出，沿海砂丘土壤多為粗砂與細砂，而粘粒與粉粒含量甚少，地形複雜且變動大，由表層土砂(0~20 cm)試驗分析發現，粒徑分布在 0.25~0.42 mm 者最多，佔 79.60%，0.105~0.25 mm 者次之，佔 14.80%，至於通過 0.074 mm 僅佔 0.44%，尚不及 1%。一般砂丘砂粒所佔範圍為 94~97%，粉粒及粘粒則為 0.2~1.5%及 2.8~5.0%。

(三) 游繁結(1989)

從事濁水溪河口飛砂量調查指出，表層土砂(0~2 cm)細顆粒含量少，大於 0.6 mm 之砂粒含量高達 60~80%，隨深度增加(5~20 cm)，則粒徑分佈越細，小於 0.6 mm 之砂粒含量高達 80~90%；溪床上飛砂主要發生在含水率小於 0.5%之條件下，此時飛砂量與砂粒含水率多寡無關。

(四) Humberto Blanco、Rattan Lal (2008)

砂粒運移型態取決於砂粒粒徑，如圖 3 所示，一般可將其運移型態歸納為三種：即滾動(creep)、跳躍(saltation)及懸浮(suspension)。

(五) Bagnold (1941)

一般砂丘之總飛砂量 $Q(g/cm\text{-}sec)$ 與砂粒粒徑(1.0~0.1 mm)之平方根成正比：

$$Q = C \sqrt{\frac{d}{D}} \times \frac{\rho}{g} \times U_*^3 \quad (3)$$

式中 C：常數(依粒徑分布而定)

$C=1$ (粒徑均勻分布)

$C=1.8$ (砂丘上自然分級砂)

$C=2.8$ (粒徑分布很廣)

d：砂粒粒徑(mm)

D：標準粒徑(0.25 mm)

ρ ：空氣密度 (g/cm^3)

g：重力加速度 (cm/s^2)

U_* ：摩擦風速 (cm/s)

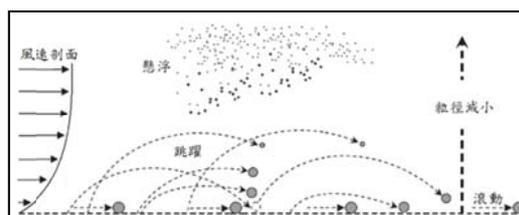


圖 3 砂粒運動示意圖

(改繪自 Blanco and Lal, 2008)

Figure 3 Illustrative plots for the transporting motion of windblown sand particle (modified from Blanco and Lal, 2008)

(六) Chepil(1945)

針對耕地之風蝕特性加以研究，獲得土壤風蝕量 $Q(g/cm\text{-}s)$ 之計算式：

$$Q = C \times \frac{\rho}{g} \times U_*^3 \quad (4)$$

式中 C 為常數，依土砂之不同其值約 1.0~3.1 之間。

(七) 中島勇喜(1979)

以因次分析推導出飛砂量 $Q(\text{g/cm-sec})$ 之關係式為：

$$\frac{Q}{d_{50} \times U_* \times \sigma} = M_1 \left(\frac{U_*^2}{g \times d_{50} \times \frac{\sigma}{\rho}} \right)^\alpha - M_2 \quad (5)$$

式中

d_{50} ：中值粒徑(mm)

U_* ：摩擦風速 (cm/s)

g ：重力加速度 (cm/s^2)

σ ：砂粒密度 (g/cm^3)

ρ ：空氣密度 (g/cm^3)

M_1 、 M_2 ：率定係數

α ：常數，中島實驗結果 $\alpha = 0.8$

由於 Bagnolde 公式係假定砂粒為圓球形狀條件下之運動狀態，但真實砂粒為不同形狀，而中島公式似乎可補正 Bagnold 公式之缺點(游繁結，1989)。

三、揚塵(PM10)之相關研究

(一) Tsoar and Pye(1987)

根據粉塵動力學研究指出，不同粒徑的粉塵顆粒可被搬運之距離，在一般風暴條件下， $10\mu\text{m}$ 以下的顆粒在大氣中可被搬運 1000 km；在氣旋性風暴(15m/s)條件下， $10 \sim 20\mu\text{m}$ 以下的顆粒在大氣中可被搬運 500km 以上， $30\mu\text{m}$ 以上的顆粒則很難被搬運到 100 km 以外的地方。

(二) 王穎釗(1987)

於野外不同類型農田地觀察發現，植被高度是影響地表粉塵啟動摩擦風速的重要因

素，隨著植被高度的增大而增大。

四、風洞實驗相關研究

(一) Zhibao Dong (2002)

於風洞試驗結果發現，不同砂粒粒徑之飛砂量與風速及高度之關係如圖 4 所示。由圖 4 得知，當風速越大，則飛砂量越多；當粒徑越大，則啟動風速越大；當高度越高，累積變化越規律。

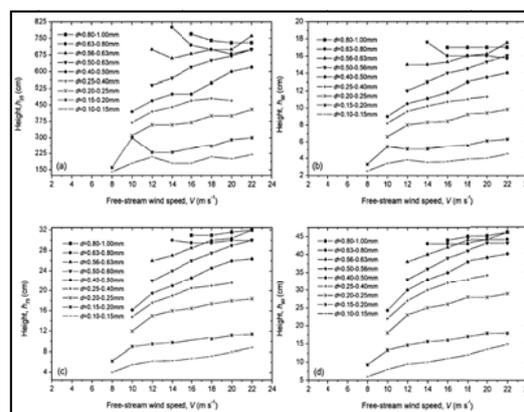


圖 4 不同高度下之累積飛砂量曲線(Dong, 2002)

Figure 4 Curve for cumulated aeolian sand at various altitudes (Dong, 2002)

材料與方法

一、試區概況

各試區採樣點位，如圖 5 所示，大安溪橋左側 (X:209722, Y:2699263)；大甲溪橋右側 (X:206308, Y:2691148)；烏溪 (X:203068, Y:2669471)國道 3 號至國道 1 號間；大都位於河川下游出海口，飛砂及揚塵危害嚴重地點。



圖 5 各樣區採樣點位置圖

(資料來源：Google Earth，2006)

Figure 5 Diagram of sampling locations

(Source : Google Earth，2006)

二、現地實驗

(一) 風速風向觀測

現地風速觀測係使用 Young-3002 型多層風杯風速計，數據以每秒擷取一次，經由自記式記錄器 CR10 記錄，並配合集砂器，測定地面上高度 0.05m、0.25m、0.3m、0.4 m、0.7m、1.0m、1.3 m 及 1.5 m 共 8 個剖面，取 10 分鐘之平均風速值；風向觀測係使用 Davis 多功能綜合氣象觀測儀，架設於迎風面，高度為 1.5 m，如圖 6 所示。

(二) 風蝕深度觀測

為瞭解各試區飛砂揚塵之貢獻量，在各試區劃定 10 m×10 m 之區塊，每隔 2.5 m 插入一支有刻度鐵棒，如圖 7 所示，觀測一天 24 小時之差值，再求得試區平均風蝕深度，將其乘上面積，即為飛砂揚塵之貢獻量。

(三) 飛砂量及揚塵量觀測

1. 飛砂量觀測

本研究飛砂量之收集採用 BSNE (Big Spring Number Eight) 垂直集砂器及 H-2 型水平集砂器。水平集砂器主要收集 0~0.01 m 及 0.01~0.25 m 高度跳躍與滾動之砂粒；垂直集砂器則是收集懸浮型態之砂粒，其架設高度為 0.25 m、0.3 m、0.4 m、0.7 m、1.0 m 及 1.3 m，共 8 個剖面，如圖 8 所示。



圖 6 試驗區觀測情形

Figure 6 deployed map of observation

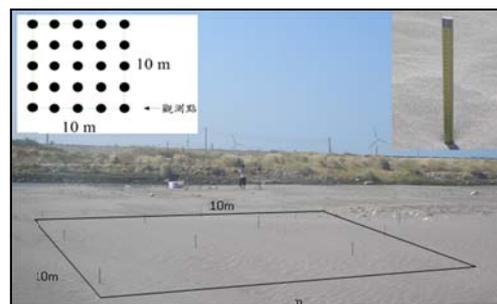


圖 7 風蝕深度觀測區現況圖

Figure 7 Diagram of wind erosion depth

2. 揚塵量觀測

採用 TSI-8520 型直讀式粉塵計，儀器量測範圍為 0.001~100 mg/m³，量測時間

為每 30 秒記錄一筆資料，10 分鐘平均一次，可量測 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 和 $PM_{1.0}$ ，本研究現地量測以 PM_{10} 為主；由於懸浮微粒易對人體呼吸系統造成影響，故本研究粉塵採樣器架設高度為 1.5 m，此為一般成年人口鼻之高度。

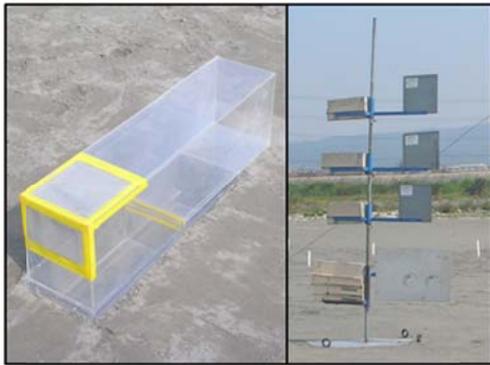


圖 8 H-2 型集砂器和 BSNE 型集砂器
Figure 8 H-2 sampler and BSNE sampler

(四) 揚塵遞減率觀測

於現地勘選與風向平行之適宜路線，同時於對照點及移動點處架設 TSI-8520 型直讀式粉塵計，記錄並計算揚塵衰減量之相對值，如圖 9~11 所示。

三、室內風洞試驗

使用非循環吹出式風洞，全長 10 m，試驗段長 4.8 m，內部高 0.5 m、寬 0.3 m，如圖 12 所示；由 5 匹馬力之交流馬達帶動風扇送風，進氣口並裝有控制閥，以控制風速大小。風速之測定使用皮托管(Pitot tube)及差壓計。

風洞試驗所使用之砂粒係經由 48 小時烘乾之砂粒，為避免送風時間過長，導致料

源不足，影響試驗結果，每次測回均為 3 分鐘，重新鋪砂後，再行測試，並重複 3 次。

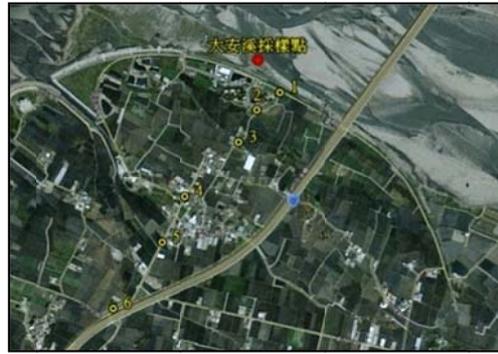


圖 9 大安溪揚塵衰退量觀測路線
Figure 9 Route map for observation on fugitive dust decrease in Da-an River



圖 10 大甲溪揚塵衰退量觀測路線圖
Figure 10 Route map for observation on fugitive dust decrease in Dajia River

(一) 粒徑及風速與飛砂量之觀測

本項試驗之砂粒，係經美國標準篩過篩後，採用五種粒徑分佈： $\# 10 \sim \# 20$ 、 $\# 20 \sim \# 40$ 、 $\# 40 \sim \# 60$ 、 $\# 60 \sim \# 100$ 及 $\# 100$ 以下，試驗時採用砂粒粒徑分佈

較廣者，因其所產生之飛砂粒徑分佈亦較明顯；取篩分後之砂粒樣本，鋪設厚 3 cm、寬 30 cm 及長 200 cm 之試驗段，由前期試驗得知，試驗段下游 80 cm 之後，皆為穩定之集砂區，因而將 H-2 型水平集砂器設置於試驗段地氈下游 100 cm 處，如圖 13 所示。試驗時風速分別為 4 m/s、5 m/s、6 m/s、7 m/s、9 m/s、11 m/s、13 m/s 及 15 m/s。



圖 11 烏溪揚塵衰退量觀測路線圖
Figure 11 Route map for observation on fugitive dust decrease in Wu River

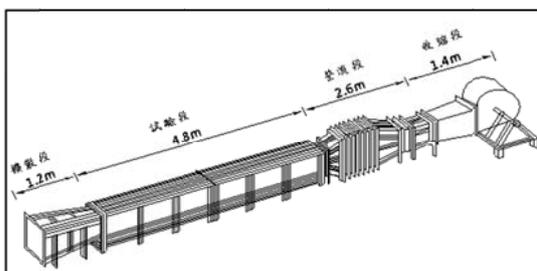


圖 12 風洞配置示意圖
Figure 12 Diagram of wind tunnel layout

(二) 砂粒含水率與飛砂量之觀測

本項試驗採用三個樣區中粒徑分佈範圍較小者，可減少因為不同粒徑對飛砂量所產

生之誤差；試驗前使用噴霧器，讓砂粒與水充份攪拌均勻，並取其中 50 g 砂粒樣本，進行含水率測定。試驗布置亦如圖 13 所示，試驗風速為 10 m/s，風速量測點係位於地氈下游面 100 cm、高 25 cm 處。

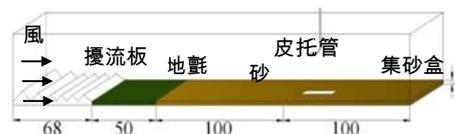


圖 13 飛砂量之觀測
Figure 13 Observation on aeolian sand

(三) 飛砂量及揚塵量與風速之觀測

試驗時取篩分後之砂粒樣本，鋪設厚 3 cm、寬 30 cm 及長 300 cm 之試驗段，並由前期試驗得知，試驗段下游 225cm 處，揚塵量最多且穩定，因而將 H-2 型水平集砂器及 TSI-8520 型直讀式粉塵計，設置於試驗段下游 225 cm 處，如圖 14 所示，分別收集飛砂量及揚塵量。

粉塵計設置高度係將現地高度 1.5 m，以 1：20 之縮尺，將其架設於高 7.5 cm 處，試驗時該點風速分別為 5 m/s、6 m/s、7 m/s、8 m/s、9 m/s、10 m/s、11 m/s、12 m/s、13 m/s、14 m/s 及 15 m/s 等 11 種。

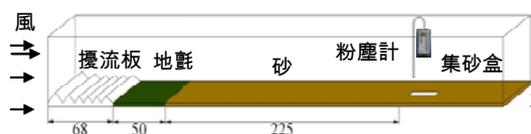


圖 14 飛砂量與揚塵量之觀測
Figure 14 Observation on aeolian sand and fugitive dust

(四) 粒徑及風速與揚塵量之觀測

當砂體 PM₁₀ 含量較高時，所產生之揚塵粒徑分佈亦較明顯，因此，本項試驗將採用三個樣區中 PM₁₀ 含量較高者；試驗布置亦如圖 14 所示，於試驗段下游面 225 cm 處，同時架設三台粉塵計，分別收集粒徑為 PM₁₀、PM_{2.5} 和 PM_{1.0} 之揚塵量。試驗風速與飛砂量及揚塵量之觀測相同，採用 11 種風速。

結果與討論

一、砂粒物性分析

(一) 砂粒密度之探討

本研究採用比重瓶法測定砂粒之密度，結果大安溪、大甲溪及烏溪砂粒之密度分別為 2.66、2.63 及 2.43 g/cm³，由於在相同體積下，密度愈大重量愈重，砂粒之啟動風速理應愈大，然而如果砂粒形狀、粒徑大小及含水量不同時，則所得結果也可能差異頗大。

(二) 砂粒含水率之探討

裸露砂面之含水率是影響風砂運移的重要因素，因此，探討砂粒含水率有助於了解現地飛砂搬運狀況；將現地所採集之砂粒樣本，裝入密封袋，攜回實驗室分析其含水率，經試驗後獲得大安溪、大甲溪及烏溪砂粒之含水率分別為 0.56%、0.51% 及 0.54%。

(三) 砂粒粒徑及質地之探討

將三大河口試區所採集之砂粒樣本，經由雷射光繞射粒徑分析儀 (Coulter LS230，Beckman) 進行分析，可進一步獲得更完整砂

粒粒徑分布概況，結果如表 2 及圖 15~17 所示，由表 2 得知，各試區砂粒含量均超過 83% 以上，粉粒與黏粒含量則不及 20%，易受風蝕作用引起飛砂，根據美國農業部公布之土壤質地，大安溪為砂質壤土，而大甲溪及烏溪為砂土。

表 2 三大河口粒徑參數
Table 2 Parameters of particle size at these estuaries

粒徑(mm)	含量(%)	大安溪	大甲溪	烏溪
砂粒(%)0.05~2.00mm		83.40	89.40	96.90
粉粒(%)0.002~0.05mm		14.51	9.24	2.41
黏粒(%)<0.002mm		2.09	1.36	0.69
中值粒徑 d ₅₀		0.112	0.201	0.224
平均值 M _z		0.112	0.281	0.249
標準偏差 σ ₁		2.381	1.135	1.626

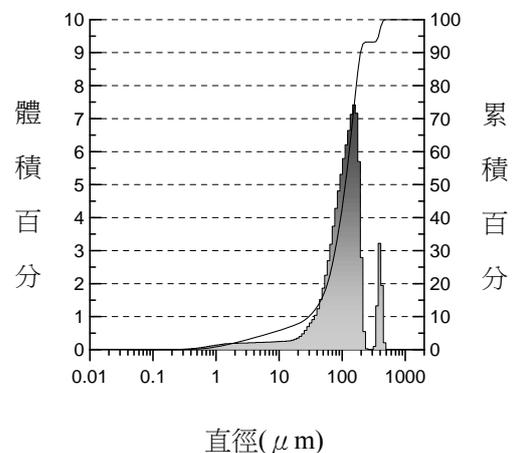


圖 15 大安溪砂粒粒徑分布

Figure 15 Particle size in Da-an River

由圖 15~17 得知，三個樣區中以烏溪粒徑分佈範圍較小，此區砂粒可作為含

水率與飛砂量觀測試驗之用；而大甲溪粒徑分佈範圍較廣，則可作為砂粒粒徑及風速與揚塵量觀測試驗之用。

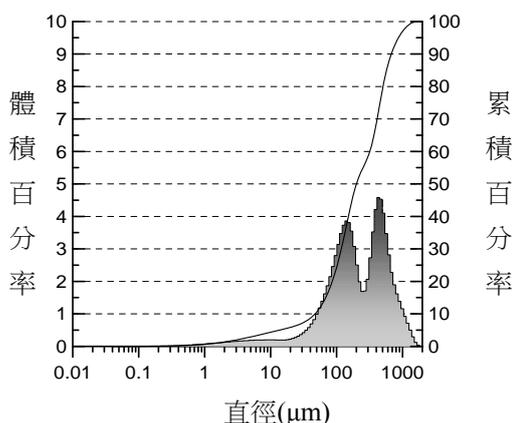


圖 16 大甲溪砂粒粒徑分布

Figure 16 Particle size in Da-jia River

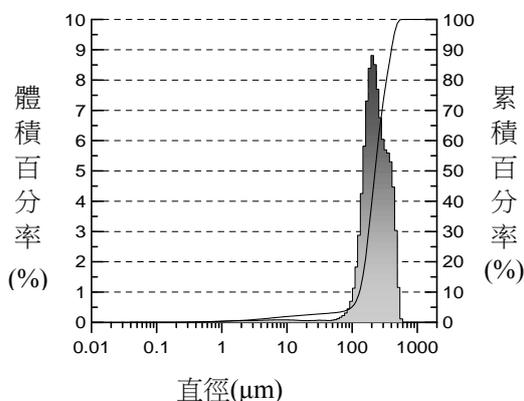


圖 17 烏溪砂粒粒徑分布

Figure 17 Particle size in Wu River

二、現地試驗

(一) 風速垂直分佈之探討

將現地 98 年 10 月 17 日至 99 年 1 月

30 日，所測得 27 次測回風速與高度之對數值，代入(8)式進行直線迴歸分析，可求得常數 a、迴歸係數 b 及相關係數 r，結果相關係數均達 0.95 以上，表示沿海前線風衝地區，風速與 1.5 m 以下高度之對數值，呈極顯著相關，不但風速剖面符合 Prandtl(1925)對數律分佈理論，而且其風向極為穩定。因此，再依(10)式可求出摩擦風速 U_* 與粗糙長度 Z_0 。

由計算結果得知，大安溪、大甲溪及烏溪之 U_* 分別為：0.78m/s、0.67m/s 及 0.68m/s； Z_0 分別為： $5.46 \times 10^{-3}m$ 、 $3.29 \times 10^{-3}m$ 及 $3.88 \times 10^{-3}m$ 。Bagnold(1954)指出，摩擦風速 U_* 為風速與高度間之增率，可以代表風速剖面之特性，三個試區 U_* 介於 0.67~0.78m/s，以大安溪最大，有較強的風速梯度；又粗糙長度 Z_0 係代表地況之指標，其值越大，表示地面有越大的粗糙度，致使風速為零時所發生之位置越高，三個試區 Z_0 介於 $3.29 \times 10^{-3}m \sim 5.46 \times 10^{-3}m$ ，此與 Simiu(1986)之建議值：海岸砂地地形： $0.0001m \leq Z_0 \leq 0.01m$ ，相吻合。

(二) 風速垂直剖面與飛砂量之探討

將各試區 14 個測回，0~1.3m 共 8 個高度之集砂器，所收集到的飛砂量，以積分方式求得 1.3m 高度以下之總飛砂量，再進一步將總飛砂量與各高度之風速進行迴歸分析，結果發現，三個試區在 0.25 m 高度之風速與 0~1.3 m 剖面之飛砂量關係最佳，呈非線性正相關，如圖 18~20 所示，皆達 1% 顯著水準，其迴歸式如(13)~(15)式所示，故爾後之分析皆

採 0.25 m 高度之風速為代表。

大安溪： $Q = 0.0049 \times U_{0.25}^{3.8335}$ ， $r = 0.920^{**}$ (13)

大甲溪： $Q = 0.1558 \times U_{0.25}^{2.0079}$ ， $r = 0.798^{**}$ (14)

烏溪： $Q = 2.6563 \times U_{0.25}^{2.4336}$ ， $r = 0.899^{**}$ (15)

式中 Q：各測回斷面之飛砂量(g/m-sec)

$U_{0.25}$ ：0.25 m 高度之風速(m/sec)

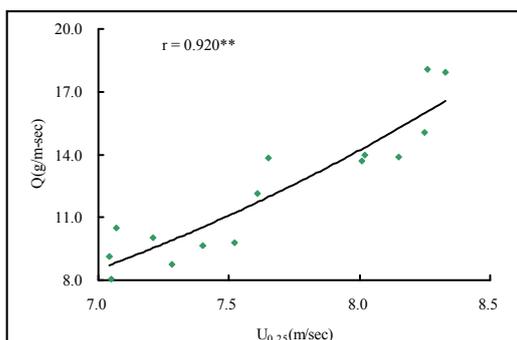


圖 18 大安溪 $U_{0.25}$ 與 Q 之關係圖

Figure 18 Diagram of relation between $U_{0.25}$ and Q in Da-an River

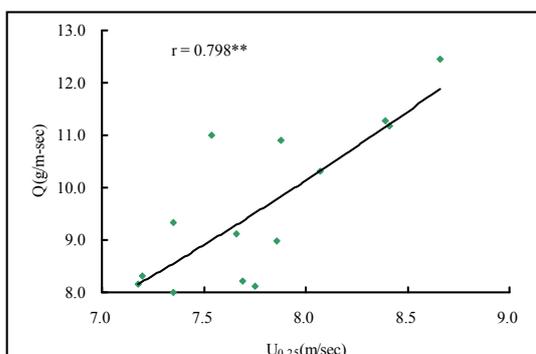


圖 19 大甲溪 $U_{0.25}$ 與 Q 之關係圖

Figure 19 Diagram of relation between $U_{0.25}$ and Q in Da-jia River

(三) 風蝕深度之探討

為得知各試區裸露地潛在飛砂揚塵發生區之風蝕量，研究中於 99 年 1 月 28 日至 99 年

3 月 11 日，多次分別至三個試區量測 100 m² 觀測區內風蝕之深度 (m/day)，據以推估各試區之風蝕體積 (m³/day)，再經由砂粒密度換算成風蝕量 (ton/day)。

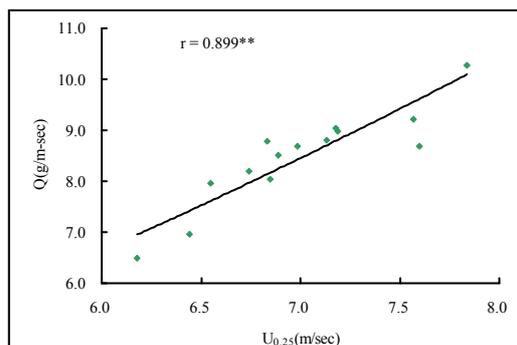


圖 20 烏溪 $U_{0.25}$ 與 Q 之關係圖

Figure 20 Diagram of relation between $U_{0.25}$ and Q in Wu River

表 3 潛在飛砂揚塵發生區之風蝕量

Table 3 Measured contribution of potential areas for aeolian sand and fugitive dust

流域	大安溪	大甲溪	烏溪
1.5m			
平均風速 (m/s)	6.52	6.78	8.45
風蝕深度 (m/day)	0.0084	0.0094	0.0156
風蝕體積 (m ³ /day)	0.84	0.94	1.56
風蝕量 (ton/day)	2.23	2.47	3.79
風蝕量 (ton/季)	201.1	222.5	341.2
揚塵量 (ton/季)	11.7	10.2	7.2

由於大安溪、大甲溪與烏溪砂粒粒徑分析結果，PM₁₀ 之累積體積百分比分別為 5.8%、4.6%及 2.1%。，如圖 15~17 所

示，故可進而求得風蝕量 (ton/季) 與揚塵量 (ton/季)，其結果如表 3 所示，由表 3 得知，風蝕量深受風速影響，而揚塵量則與現地砂粒組成有直接關係。爾後若能得知飛砂揚塵潛在區位面積，則可以本研究結果，估算各試區飛砂揚塵潛在貢獻量。

(四) 飛砂量與揚塵量之探討

由中島(1979)以因次分析所推導之飛砂量推估式(5)式得知，飛砂量與各因子之關係；游繁結(1986)指出，假設砂粒密度、砂粒含水率與飛砂量呈反比關係，則可將中島飛砂量 Q 推估式修正為：

$$\frac{Q}{d_{50} \times U_* \times \sigma} = F_1 \left(\frac{U_*^2}{g \times d_{50} \times \frac{\sigma}{\rho} \times \omega} \right)^\alpha \quad (16)$$

根據林信輝等(1979)之試驗結果，當砂粒含水率 ω 小於 1.2% 時，在相同風速條件下，飛砂量與含水率無關。而本研究試區之砂粒含水率皆小於 1.2%，故可將(16)式中含水率去除；再將各試區 14 個測回，所收集到的總飛砂量，以及砂粒中值粒徑 d_{50} 、地面 0.25 m 高度之風速 $U_{0.25}$ (以 $U_{0.25}$ 代替 U_* 所得結果較佳)、砂粒密度 σ 、重力加速度 g 及空氣密度 ρ 帶入(16)式，將各試區計算所得之值，經由最佳化迴歸分析，即可求得各試區之飛砂量估算式如下：

大安溪：

$$\frac{Q}{d_{50} \times U_{0.25} \times \sigma} = 7 \times 10^{-5} \times \left(\frac{U_{0.25}^2}{g \times d_{50} \times \frac{\sigma}{\rho}} \right)^{1.341} \quad (17)$$

$r = 0.85^{**}$

大甲溪：

$$\frac{Q}{d_{50} \times U_{0.25} \times \sigma} = 6 \times 10^{-4} \times \left(\frac{U_{0.25}^2}{g \times d_{50} \times \frac{\sigma}{\rho}} \right)^{0.504}$$

$r = 0.545^*$ (18)

烏溪：

$$\frac{Q}{d_{50} \times U_{0.25} \times \sigma} = 1.1 \times 10^{-3} \times \left(\frac{U_{0.25}^2}{g \times d_{50} \times \frac{\sigma}{\rho}} \right)^{0.285}$$

$r = 0.563^*$ (19)

將中島飛砂量修正式(17)~(19)式及 Bagnold(1941)飛砂量推估式(3)式，所推求之飛砂量與現地實測值比較，如表 4 所示，由表 4 得知 Bagnold 推估所得之飛砂量明顯高估，究其原因，除飛砂量公式推演之背景不同外，其所考量的因子亦不夠周詳，造成推估時產生較大的誤差；由於影響飛砂量因子多且雜，建議使用中島因次分析之推估式，較為理想。

為進一步瞭解現地飛砂量(Q)與揚塵量 $PM_{10}(Q')$ 之關係，將總飛砂量與 1.5m 高度揚塵量進行最佳化迴歸分析，結果如 20~22 式所示，飛砂量與揚塵量呈極顯著相關，可以據此推求不同飛砂量時之揚塵量。

大安溪： $Q' = 102.22Q^{1.05}$ ， $r=0.980^{**}$ (20)

大甲溪： $Q' = 50.705Q^{1.57}$ ， $r=0.967^{**}$ (21)

烏溪： $Q' = 85.608Q^{1.17}$ ， $r=0.904^{**}$ (22)

(五) 揚塵遞減率之探討

揚塵量之遞減雖非單純僅與距離有

關，但整體而言，離河口愈遠揚塵量有逐漸降低的趨勢，揚塵遞減率可依下式推估：

$$\text{遞減率} = \frac{\text{對照點揚塵濃度} - \text{觀測點揚塵濃度}}{\text{對照點揚塵濃度}} \times 100\% \quad (23)$$

(23)式中對照點係位於測線最前端，河

床裸露灘地處之不移動點，而觀測點則是隨測線之測點移動；將各試區之觀測值及揚塵遞減率列於表 5 中，由表 5 得知，大安溪、大甲溪及烏溪揚塵遞減率每公里約 75%、95%及 70%。

表 4 河口飛砂量之實測值與推估值
Table 4 Measured and estimated aeolian sand at estuary

大安溪				大甲溪				烏溪			
飛砂量 實測值	中島 推估值	Bagnold 推估值	揚塵 實測值	飛砂量 實測值	中島 推估值	Bagnold 推估值	揚塵 實測值	飛砂量 實測值	中島 推估值	Bagnold 推估值	揚塵 實測值
(g/m-s)	(g/m-s)	(g/m-s)	($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	(g/m-s)	(g/m-s)	(g/m-s)	($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	(g/m-s)	(g/m-s)	(g/m-s)	($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
13.85	12.34	95.40	1657	10.32	10.06	103.14	2215	8.20	10.68	79.72	1102
13.88	15.73	75.51	1707	11.18	10.93	88.71	2349	9.21	12.81	116.75	1206
13.69	14.72	201.03	1641	12.45	11.60	78.66	2407	8.69	11.69	57.58	1098
17.95	17.10	115.28	1966	9.34	8.34	110.95	1674	8.98	12.31	70.80	1125
18.09	16.56	106.63	2077	11.01	8.78	74.76	2327	7.96	10.19	36.84	1134
15.07	16.48	120.65	1867	10.90	9.59	89.80	2091	9.05	12.46	51.15	1124
13.98	14.79	142.81	1639	11.28	10.88	86.55	2377	10.28	15.23	122.00	1287
8.75	10.20	65.95	1004	7.99	8.34	60.57	1405	8.03	10.33	64.43	945
9.80	11.56	71.26	1176	8.11	9.28	73.32	1345	8.70	11.71	58.09	1069
9.66	10.86	63.99	1095	8.97	9.54	65.92	1510	8.78	11.88	60.35	1005
10.02	9.83	80.69	1111	9.12	9.06	48.21	1585	8.80	11.92	61.93	1056
12.14	12.09	77.44	1229	8.22	9.13	81.19	1415	8.51	11.32	50.26	1036
10.47	9.12	64.78	1115	8.31	8.00	56.36	1330	6.48	7.38	61.45	720
9.11	8.97	95.17	1025	8.15	7.96	68.33	1358	6.96	8.26	74.29	848

三、風洞實驗

(一) 粒徑及風速與飛砂量之探討

本試驗採用粒徑分佈較廣之大甲溪砂粒，將粒徑分為 5 級，進行 8 種風速試驗，觀測粒徑、風速與飛砂量之關係，並推估不同粒徑之啟動風速。由表 6 中得知，當風速小於或等於 9 m/s 時，飛砂量隨粒徑遞減而遞增，但風速大於 9 m/s 時，飛砂量反而隨粒徑遞減

而遞減；究其原因，係由於高風速(11~15 m/s)時，愈細粒徑之砂粒，大多以懸浮方式呈現，因而能收集到滾動及跳躍之飛砂量較少，然而較低風速(9 m/s 以下)時，此時較細粒徑之砂粒，方才接近其啟動風速值，故懸浮量亦較少，所以收集到的總飛砂量反而較多。

綜合表 6 中得知，粒徑 0.84~2.00 mm 之砂粒其起始風速為 13 m/s；粒徑

0.42~0.84 mm 之砂粒其起始風速為 9 m/s ;
 粒徑 0.25~42 mm 之砂粒其起始風速為 5
 m/s ; 粒徑 0.25 mm 以下之砂粒其起始風速為
 4 m/s 。

(二) 砂粒含水率與飛砂量之探討

本項試驗採用烏溪樣區之砂粒，因為由圖 15~17 得知，其粒徑分佈範圍較小，可減少因為不同粒徑對飛砂量所產生之誤差；試驗時將砂粒含水率於 0~5.82 %之間共分為 16 種，所得結果如圖 21 所示，由圖 21 得知，含水率低於 0.52 %時，飛砂量增加有限，已接近穩定狀態，變化極小，其值與乾砂時並無太大差異；然而當含水率在 0.77% 以上時，飛砂量由 50.88 g/m-s 急遽減少，當上昇至 1.70 %時，飛砂量降至 1.23 g/m-sec，約為高峰期 2.4%；由此可知，本實驗中砂體含水率對於飛砂量影響顯著的範圍介於 0.77~1.70 %之間，當含水率達到 0.77%以上時，水分子開始對砂粒運動產生抑制作用，達到 1.70%時，極為顯著，再增至 3.40%時，其抑制作用將達到最大值，此可作為爾後飛砂防治預警機制之參考依據。

(三) 飛砂量及揚塵量與風速之探討

將試驗所得之資料，列於表 7 中，由表 7 得知，風速大於 5m/s 時，即有飛砂與顯著之揚塵產生，為瞭解三個試區中飛砂量 Q 及揚塵量 Q'與風速 U 之關係，作為爾後抑制飛砂及揚塵之參考依據，因而將其進行各種迴歸與相關分析，所得結果如 (24)~(29) 式所示，皆呈極顯著相關，可據此推求不同風速時之揚塵量。

$$\text{大安溪 } Q = 0.019 \times U^{3.544}, r=0.999^{**} \quad (24)$$

$$\text{大甲溪 } Q = 0.025 \times U^{3.453}, r=0.994^{**} \quad (25)$$

$$\text{烏溪 } Q = 0.014 \times U^{3.691}, r=0.993^{**} \quad (26)$$

$$\text{大安溪 } Q'_{10} = 2.938U^{2.261}, r=0.996^{**} \quad (27)$$

$$\text{大甲溪 } Q'_{10} = 0.658U^{3.100}, r=0.996^{**} \quad (28)$$

$$\text{烏溪 } Q'_{10} = 0.299U^{3.134}, r=0.982^{**} \quad (29)$$

表 5 各試區揚塵遞減率之觀測資料

Table 5 Observed decrease in fugitive dust in Da-an, Dajia and Wu Rivers

大安溪(觀測日期 98.10.26)						
觀測點	與對照點距離 (m)	觀測點		對照點		遞減率 (%)
		PM ₁₀ (mg/m ³)	風速 (m/s)	PM ₁₀ (mg/m ³)	風速 (m/s)	
1	200	1.131	7.6	1.446	8.1	21.8
2	320	1.325	7.8	1.745	8	24.1
3	500	1.025	7.9	1.621	8.2	36.8
4	800	0.785	7.7	1.483	7.7	47.1
5	930	0.539	7.1	1.584	7.9	66.0
6	1150	0.056	5.2	0.814	9.2	93.1
大甲溪(觀測日期 99.01.24)						
1	100	0.773	9.2	0.852	9.3	9.3
2	350	0.532	7.3	0.834	9.2	36.2
3	400	0.521	7.2	0.861	9.4	39.5
4	550	0.157	5.8	0.883	9.3	82.2
5	630	0.063	5.6	0.821	9.5	92.3
6	700	0.056	5.2	0.814	9.2	93.1
烏溪(觀測日期 99.03.11)						
1	1060	0.163	6.7	0.563	7.3	71.0
2	1120	0.065	6.2	0.532	7.2	87.8
3	1260	0.067	6.2	0.521	7.3	87.1
4	1480	0.064	6.1	0.536	7.4	88.1
5	1900	0.068	6	0.542	7.5	87.5
6	2320	0.062	5.5	0.563	7.3	89.0

(四) 粒徑及風速與揚塵量觀測

由於砂體 PM₁₀ 含量較高時，所產生之揚塵粒徑分佈亦較明顯，因此，由圖 15~17 中得知，三個樣區中以大安溪之 PM₁₀ 含量較高，故採用大安溪砂粒從事本項試驗。試驗時亦採 11 種風速，揚塵粒

表 6 不同砂粒粒徑及風速之飛砂量

Table 6 Amount of aeolian sand at various sand particle sizes and wind speeds

飛砂量 Q (g/m-sec)	風速(m/sec)							
	4	5	6	7	9	11	13	15
0.84~2.00 mm	0	0	0	0	0	0	0	0.2
0.42~0.84mm	0	0	0	0	0	0.7	29.7	43.5
0.25~0.42mm	0	0	11.2	19.8	68.1	101.2	127.6	133.8
0.15~0.25mm	0	0.6	28.6	36.5	74.6	97.4	106.6	108.5
<0.15mm	0	6.8	31.8	40.0	78.4	93.2	98.3	96.5

徑分別為 10 μ m、2.5 μ m 及 1.0 μ m 三種，所得結果列於表 8 中。

由表 8 得知，相同揚塵粒徑，風速愈強揚塵量愈多；為進一步瞭解揚塵量(Q₁₀、Q_{2.5}、Q_{1.0})與風速 U 之關係，再將其進行各種迴歸與相關分析，所得結果如 (30)~(32) 式所示，皆呈極顯著相關，可據此推求不同風速時之揚塵量。

$$PM_{10} : Q'_{10} = 2.94U^{2.26}, \quad r=0.989^{**} \quad (30)$$

$$PM_{2.5} : Q'_{2.5} = 3.48U^{1.99}, \quad r=0.986^{**} \quad (31)$$

$$PM_{1.0} : Q'_{1.0} = 5.47U^{1.52}, \quad r=0.997^{**} \quad (32)$$

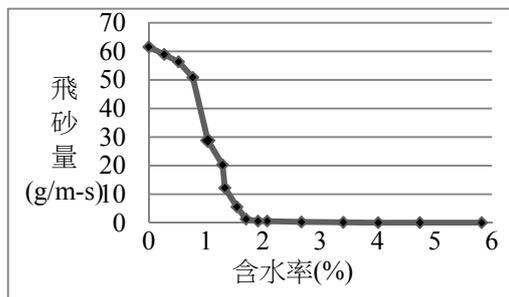


圖 21 砂粒含水率與飛砂量之關係

Figure 21 Water content in sand vs. aeolian sand

表 7 不同風速及飛砂與揚塵量

Table 7 Various wind speed and Aeoliansandvs. fugitive dust

風速 (m/s)	大安溪		大甲溪		烏溪	
	PM ₁₀ (μg/m ³)	飛砂量 (g/m-s)	PM ₁₀ (μg/m ³)	飛砂量 (g/m-s)	PM ₁₀ (μg/m ³)	飛砂量 (g/m-s)
5	113	5.5	101	5.8	69	5.6
6	148	10.5	188	12.1	86	10.3
7	197	18.2	231	19.6	101	17.0
8	425	33.3	372	35.0	156	28.6
9	499	46.8	566	46.2	236	55.6
10	557	87.7	910	89.3	337	98.2
11	682	116.3	1228	121.9	589	118.7
12	776	143.9	1634	141.2	893	149.9
13	935	175.3	1921	162.1	1023	204.7
14	1076	205.0	2259	210.2	1233	228.6
15	1293	227.0	2683	238.2	1561	253.6

結論

綜合本試驗之結果可得以下之結論：

一、砂粒物性方面

大安溪、大甲溪及烏溪之砂粒密度分別為 2.66、2.63 及 2.43 g/cm³；含水率為 0.56%、0.51%及 0.54%；又粒徑分析結果得知，PM₁₀ 之累積體積百分比分別為

5.8%、4.6%及 2.1%，其中大甲溪粒徑分佈範圍較廣，烏溪最小；三個試區土壤之質地，大安溪為砂質壤土，而大甲溪及烏溪為砂土。

表 8 不同粒徑及風速與揚塵量

Table 8 Various particle sizes and wind speed vs. fugitive dust

風速 (m/s)	PM _{2.5-10} (µg/m ³)	PM _{1.0-2.5} (µg/m ³)	PM _{1.0} (µg/m ³)
5	21	29	63
6	33	38	77
7	47	49	101
8	187	101	137
9	203	128	168
10	232	136	189
11	265	198	219
12	301	243	232
13	368	302	265
14	421	372	283
15	501	462	330

二、現地試驗方面

(一) 由風速剖面特性得知，三個試區 U_* 介於 0.67~0.78m/s，為一般都市地表摩擦風速的 2~3 倍；又粗糙長度 Z_0 介於 $3.29 \times 10^{-3}m \sim 5.46 \times 10^{-3}m$ ，此數值與海岸砂地地形相吻合。

(二) 獲得風速 $U_{0.25}$ 與飛砂量 Q 之迴歸式：

$$\text{大安溪} : Q = 0.0049 \times U_{0.25}^{3.8335}, r=0.920^{**}$$

$$\text{大甲溪} : Q = 0.1558 \times U_{0.25}^{2.0079}, r=0.798^{**}$$

$$\text{烏溪} : Q = 2.6563 \times U_{0.25}^{2.4336}, r=0.899^{**}$$

(三) 由風蝕深度觀測，初步推估獲得大安溪、大甲溪及烏溪之飛砂量 $100m^2$ 約為 201.1、222.5 及 341.2ton/季；揚塵量為 11.7、10.2 及 7.2ton/季。

(四) 獲得飛砂量 Q 與揚塵量 Q' 之迴歸式：

$$\text{大安溪} : Q' = 102.22Q^{1.05}, r=0.980^{**}$$

$$\text{大甲溪} : Q' = 50.705Q^{1.57}, r=0.967^{**}$$

$$\text{烏溪} : Q' = 85.608Q^{1.17}, r=0.904^{**}$$

(五) 大安溪、大甲溪及烏溪揚塵遞減率每公里約 75%、95%及 70%。

三、風洞試驗方面

(一) 粒徑 0.84~2.00 mm 之砂粒其起始風速為 13 m/s；粒徑 0.42~0.84 mm 之砂粒其起始風速為 9 m/s；粒徑 0.25~0.42 mm 之砂粒其起始風速為 5 m/s；粒徑 0.25 mm 以下之砂粒其起始風速為 4 m/s。

(二) 本試驗中砂體含水率對於飛砂量影響顯著的範圍介於 0.77~1.70 %之間，當含水率達到 0.77%以上時，水分子開始對砂粒運動產生抑制作用，達到 1.70%時，極為顯著，再增至 3.40%時，其抑制作用將達到最大值。

(三) 獲得飛砂量 Q 及揚塵量 Q' 與風速 U 之關係式：

$$\text{大安溪} Q = 0.019 \times U^{3.544}, r=0.999^{**}$$

$$\text{大甲溪} Q = 0.025 \times U^{3.453}, r=0.994^{**}$$

$$\text{烏溪} Q = 0.014 \times U^{3.691}, r=0.993^{**}$$

$$\text{大安溪} Q'_{10} = 2.938U^{2.261}, r=0.996^{**}$$

$$\text{大甲溪} Q'_{10} = 0.658U^{3.100}, r=0.996^{**}$$

$$\text{烏溪} Q'_{10} = 0.299U^{3.134}, r=0.982^{**}$$

(四) 獲得風速 U 與揚塵量 Q 之關係式：

$$PM_{10} : Q'_{10} = 2.94U^{2.26}, r = 0.989^{**}$$

$$PM_{2.5} : Q'_{2.5} = 3.48U^{1.99}, r = 0.986^{**}$$

$$PM_{1.0} : Q'_{1.0} = 5.47U^{1.52}, r = 0.997^{**}$$

參考文獻

1. 王穎釗、張承中、高建華、劉初全、栗志豔(2007),「不同類型農田地表粉塵起動摩阻風速的野外觀測」,安徽農業科學期刊,第 37 卷,第 2 期,第 710-721 頁。
2. 行政院環保署環境檢測所(2005)「土壤採樣方法」,網址:<http://www.niea.gov.tw/niea/SOIL/S10261B.htm>
3. 行政院環保署環境檢測所(2005),94 年台灣地區空氣汙染防制總檢討。
4. 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。
5. 林信輝、江永哲(1979),「砂體含水率與飛砂量之關係試驗」,中華水土保持學報,第 10 卷,第 2 期,第 173-193 頁。
6. 游繁結(1986),「台灣西海岸飛砂量推估之初步研究」,中華水土保持學報,第 17 卷,第 1 期,第 107-117 頁。
7. 游繁結(1989),「濁水溪河口飛砂量之調查與研究」,農林學報,第 38 卷,第 1 期,第 75-104 頁。
8. 蔡明華(1972),「崎頂海岸砂丘地土壤物理及化學性測定研究」,沙丘利用,第 73 期,第三號。
9. 中島勇喜(1979),「飛砂制御に関する基礎的研究」,九州大學農學部演習林報告,第 51 卷,第 125-183 頁。
10. 河村龍馬(1951),「飛砂の研究」,東京大學理工研報,第 5 卷,第 3-4 頁。
11. Bagnold, R. A. (1954), "The physics of blown sand and desert dunes", Chapman and Hall: 86.
12. Chepil, W.S (1945), "Dynamics of Wind Erosion", III, The transport Capacity of the Wind, Soil Science, (60):475-480.
13. Dong, Z, X. Liu, H. Wang, A. Zhao and X Wang. (2002), "The flux profile of a blowing sand cloud":a wind tunnel investigation. Geomorphology 49:219-230.
14. Humberto Blanco and Lal. Rattan (2008), "Principles of Soil Conservation and Management", Springer Science:55-80.
15. Simiu, E. and R. H. Scanlan (1986), Wind Effects on Structures, 2nd edit., John Wiley & Sons, Inc. New York:39-52.
16. Tsoar, H. and K. Pyr. (1987), "Dust transport and the question of desert loess formation", Sedimentology, Volume 34 Issue 1:139-153.

水土保持學報 43(3) : 259 – 276 (2011)

Journal of Soil and Water Conservation , 43 (3) : 259 - 276 (2011)