

國立臺東大學資訊管理學系
環境經濟資訊管理碩士在職專班
碩士論文

卑南溪河口段風吹沙治理策略研究

The Study of Intervention Strategy for the River Bed
Dust Storm in the Mouth of Bai-nan Stream.

研究生：周元春 撰

指導教授：王文清 博士

中華民國九十八年七月

國立台東大學
學位論文考試委員審定書
系所別：環境經濟資訊管理所

本班 周元春 君

所提之論文 卑南溪河口段風吹沙治理策略研究

業經本委員會通過合於 ☒ 碩士學位論文 條件
☐ 博士學位論文

論文學位考試委員會：

張中仁

(學位考試委員會主席)

蔡西毓

王文清

(指導教授)

論文學位考試日期：98 年 6 月 26 日

國立台東大學

博碩士論文授權書

本授權書所授權之論文為本人在 國立台東大學 資訊管理學 系(所)

環境經濟資訊管理碩士在職專班 97 學年度第 2 學期取得 碩士學位之論文。

論文名稱：卑南溪河口段風吹沙治理策略研究

本人具有著作財產權之論文全文資料，授予下列單位：

同意	不同意	單 位
☒	☐	國家圖書館
☒	☐	本人畢業學校圖書館

得不限地域、時間與次數以微縮、光碟或其他各種數位化方式重製後散布發行或上載網站，藉由網路傳輸，提供讀者基於個人非營利性質之線上檢索、閱覽、下載或列印。

本論文為本人向經濟部智慧財產局申請專利(未申請者本條款請不予理會)的附件之一，申請文號為：_____，請將全文資料延後半年再公開。

公開時程

立即公開	一年後公開	二年後公開	三年後公開
		☒	

上述授權內容均無須訂立讓與及授權契約書。依本授權之發行權為非專屬性發行權利。依本授權所為之收錄、重製、發行及學術研發利用均為無償。上述同意與不同意之欄位若未鉤選，本人同意視同授權。

指導教授姓名：王 文 清 (親筆簽名)

研究生簽名：周 元 春 (親筆正楷)

學 號：4396011 (務必填寫)

日 期：中華民國 98 年 7 月 日

1. 本授權書 (得自 <http://www.lib.nttu.edu.tw/theses/> 下載) 請以黑筆撰寫並影印裝訂於書名頁之次頁。

2. 依據 91 學年度第一學期一次教務會議決議: 研究生畢業論文「至少需授權學校圖書館數位化，並至遲於三年後上載網路供各界使用及校內瀏覽。」

授權書版本 2005/06/09

博碩士論文電子檔案上網授權書

(提供授權人裝訂於紙本論文書名頁之次頁用)

本授權書所授權之論文為授權人在 國立臺東大學 資訊管理學系碩士班 _____
組 97 學年度第二 學期取得 碩士 學位之論文。

論文題目： 卑南溪河口段風吹沙治理策略研究
指導教授： 王文清

茲同意將授權人擁有著作權之上列論文全文(含摘要)，非專屬、無償授權國家圖書館及本人畢業學校圖書館，不限地域、時間與次數，以微縮、光碟或其他各種數位化方式將上列論文重製，並得將數位化之上列論文及論文電子檔以上載網路方式，提供讀者基於個人非營利性質之線上檢索、閱覽、下載或列印。

- 讀者基非營利性質之線上檢索、閱覽、下載或列印上列論文，應依著作權法相關規定辦理。

授權人：周元春

簽 名： _____ 周元春

中華民國 98 年 07 月 27 日

謝 誌

在臺東大學研究所兩年期間，感謝王文清老師的指導，使得本人在學習課程及論文寫作上有很大的收穫，也讓我從接觸一些防災計畫中得到許多寶貴的經驗。並且感謝王老師研究室助理曾俊傑學長在風沙研究領域上提供許多指導。口試時承蒙蔡西銘老師、許中立老師指教，使得本人在論文研究上獲得很大的幫助。

感謝家兄周金堂先生在風吹沙氣象等時空因素上提供許多指導，並且感謝成功大學水利及海洋研究發展文教基金會簡仲和教授、郭晉安學長協助論文指導。

最後感謝本人任職之經濟部水利署第八河川局，除了在工作上提供安定生活外，在研究論文上提供相當多之助益，並感謝管理課陳瑞林課長、工務課劉謙誠課長、規劃課李榮著課長、梁剛瑋副工程司、黃俊凱副工程司在風吹沙研究上提供許多寶貴意見，謝謝您們，謝謝大家。

卑南溪河口段風吹沙治理策略研究

作者：周元春

國立臺東大學 環境經濟資訊管理所

摘要

卑南溪河口段位於臺東縣臺東市東北方，東臨臺東市富岡里、西臨臺東市區、南臨太平洋、北臨臺東海岸山脈。卑南溪穿越海端鄉中央山脈後，沿臺東海岸山脈至卑南鄉利吉斷層帶，該斷層為鬆散泥岩地質，土壤流失嚴重，河床散佈相當多之砂、礫石及細塵土，為卑南溪河口段風沙來源之一。位於卑南溪西南方之臺東市，是臺東縣十六個鄉鎮市之地理、人口、政治、經濟及文化中心。臺東市素有沙城之稱，每年秋冬季或颱風侵襲前，強勁東北季風，造成卑南溪河口段嚴重之「風吹沙」災害，隨氣流懸浮運動，使市區籠罩在一片灰濛濛的沙塵中，戶外能見度相當低，空氣品質十分低劣，尤其對臺東市區居民交通安全、生活品質、農工商業均造成相當大之影響。為解決卑南溪河口段風吹沙所造成之危害，各相關機關每年均耗費相當多的政府預算，進行河床沙灘地綠覆蓋、水覆蓋、機械抽水噴灑、生化劑膠結裸露沙灘地或鋪設稻草蓆覆蓋等工法，進行風吹沙防治工作，但是防治成效均十分有限，卑南溪河口段風吹沙每年仍繼續侵襲著臺東市民。探究本地區風吹沙防治成效不彰原因，無風吹沙監測資料建立、風沙起動機制及歷年防治工法效益分析評估等。本研究藉由卑南溪下游河口段至臺東市區氣象、水文、地理及沙灘地等各項時空條件資料蒐集分析、現地勘察驗證比對，並蒐集國內外風沙治理策略分析研究，卑南溪河口段歷年風沙治理結果效益評估，綜整為卑南溪河口段風吹沙治理策略。研究結果，卑南溪河口段風吹沙災害為細塵土懸浮微粒災害，防治作為應從風沙源頭治理作起，加強河床穩固及植生，並由卑南溪河口段左、右兩岸以都市及非都市計畫等手段，劃設70公尺以上保安林帶，廣植防風林相，以提高及破壞侵入卑南溪河口段之風場，減少河床風蝕現象產生，並改善河口段噴水霧設施，使河床保濕膠結，植生抗旱養護，提高風阻降低風蝕等策略，以有效達成卑南溪河口段風吹沙防治。

關鍵詞：卑南溪、利吉斷層、河床、風吹沙

The Study of Intervention Strategy for the River Bed Dust Storm in the Mouth of Bai-nan Stream

Chou Yuan-Chun

Abstract

The estuary of Pei-Nan Stream is located in the northeast of Taitung City, facing eastward toward Fu-Kung Village, westward toward downtown Taitung, southward toward the Pacific Ocean, and northward toward the Taitung Coast Mountains. The stream courses through Taiwan Central Mountains in Hai-Duan Town and then runs along the Taitung Coast Mountains all the way to Li-Chi Fault Zone in Pei-Nan Town. Li-Chi Fault Zone, which is composed of soft, easily eroded shales, has suffered a sever degree of soil loss. With its river bed filled with great amount of sand, gravels, and fine dust, the fault zone has become one of the hot spots of dust storms at the estuary of Pei-Nan Stream. Taitung City, the center of the sixteen villages and towns in Taitung County in terms of geography, population, politics, economics, and culture, is situated in the southwest of Pei-Nan Stream, and has been well-known as “The Sand City” . Every year during fall and winter time, or even right before the arrival of a typhoon, strong northeastern monsoon gales will bring about serious dust storms at the estuary of Pei-Nan Stream. With great amount of dust floating and circulating in the air, downtown Taitung is engulfed in thick layers of dust. The low outdoor visibility and inferior air quality are great endangerments to the residents’ traffic safety, living quality and inconvenience when engaging in agricultural, industrial, and business activities. In order to solve dust storm-related problems, authorities concerned have spent considerable government budgets implementing all sorts of mitigation and prevention engineering such as river bed vegetation restoration, watershed restoration, automatic sprinkler systems, biochemical cementation of sandy river bed soils, or installation of straw sand barrier, but of little or no avail. Every year, dust storms arising from the estuary of Pei-Nan Stream remain to torment the residents of Taitung City.

In this study, a probe into those approaches seeking to explain the ineffectiveness reveals that lack of dust storm monitoring, lack of study on mechanisms of dust rising, and lack of analysis and assessments on the intervention engineering over the years are held responsible. This study proposes a set of mitigation and intervention strategies by integrating the data gathered and analyzed

from (1) temporal and spatial data on climate, hydrology, landscape and sandy river bed soils collected and cross-examined by in-site inspection conducted from the estuary of downstream of Pei-Nan Stream to downtown Taitung , (2) analysis on the dust storm mitigation and intervention strategies conducted in Taiwan and abroad, and (3) effect assessments of the intervention engineering approaches over the years. The results show that the dust storms originating from the estuary of Pei-Nan Stream are categorized as airborne particulate hazards. Proposed intervention strategies seek to directly deal with the very origin of the dust storm to achieve effective dust storm interventions: (1) improving river bed stabilization and vegetation restoration, (2) building a shelterbelt (windbreak zone) more than 70 meters along the banks of the estuary of Pei-Nan Stream by means of urban or non-urban design projects, (3) planting windbreak trees on a massive scale so that wind flows blowing through the estuary of Pei-Nan Stream can be modified and the erosion of the river bed can be reduced, (4) upgrading the automatic sprinkling systems at the mouth of the stream to help keep the river bed stay moist, and finally (5) restoring and maintaining river bed vegetation to resist drought and reduce wind speed and wind erosion.



Key Words : Pei-Nan Stream; Li-Chi Fault Zone; River Bed; Dust Storm

目 錄

摘要	I
Abstract	II
表目錄	VI
圖目錄	VIII
第一章 緒論	1
1-1 研究背景與動機	1
1-1-1 研究背景	1
1-1-2 研究動機	2
1-2 研究問題性質與定義	3
1-3 研究範圍及目的	4
1-4 研究內容	5
1-5 研究流程	5
第二章 文獻回顧	7
2-1 風吹沙與沙塵暴相關定義	7
2-1-1 沙塵暴定義	7
2-1-2 風吹沙定義	8
2-2 國內風沙治理研究	9
2-2-1 臺北縣福隆至澳底海灘風吹沙	9
2-2-2 花蓮縣花蓮溪風吹沙	10
2-2-3 新竹縣頭前溪風吹沙	10
2-2-4 臺東縣卑南溪風吹沙	11
2-2-5 國內風沙治理研究成果	11
2-3 國外風沙治理研究	12
2-3-1 中國大陸沙塵治理研究	12
2-3-2 非洲利比亞沙漠沙塵研究	14
2-3-3 灰塵和沙塵暴：逼近的災難—早期的警告	15
2-3-4 國外風沙治理研究成果	19
2-4 卑南溪河口段風吹沙與國外沙塵暴比較	20
2-5 臺灣主要風治危害區域及治理	21
2-6 卑南溪風吹沙環境資料蒐集	23
2-6-1 氣象	23
2-6-2 河川水文	27
2-6-3 河灘地質及變遷	28
2-6-4 河灘地風沙起動風速	31
2-6-5 臺東市區空氣品質	34
第三章 卑南溪河口段風吹沙特性分析	39
3-1 河床現地勘查與分析	39
3-1-1 河床風沙來源	39

3-1-2 風吹沙主要河段-----	40
3-2 卑南溪口風吹沙發生之時空特性-----	42
3-2-1 風吹沙發生之空間特性-----	42
3-2-2 風吹沙發生之時間特性-----	42
3-3 卑南溪河口段風吹沙起動條件探討-----	43
3-3-1 風吹沙起動之氣象條件-----	43
3-3-2 風吹沙起動之水文條件-----	44
3-3-3 風吹沙起動之地面條件-----	45
3-4 卑南溪河口段風吹沙影響層面-----	46
3-4-1 對臺東市區空氣品質影響-----	46
3-4-2 對民眾日常生活及健康影響-----	52
3-4-3 對耕作土壤及作物之危害-----	53
第四章 卑南溪河口段風沙防治策略-----	54
4-1 風沙防治原理-----	54
4-2 卑南溪河口段風吹沙防治策略比對及驗證-----	54
4-2-1 沙灘及水文變遷與卑南溪河口段風吹沙關係-----	54
4-2-2 風速風向等氣象因子與卑南溪河口段風吹沙關係-----	58
4-2-3 河床沙源與臺東市區風吹沙關係比對分析-----	61
4-3 歷年風沙治理方法分析及探討-----	63
4-3-1 治理成效之評估方式-----	64
4-3-2 卑南溪河口段風沙防治作為及效益分析-----	64
4-3-3 其他縣市風沙防治作為及效益分析-----	72
4-3-4 不同思考模式風沙防治作為-----	76
4-4 風吹沙防治策略-----	78
4-4-1 短期風沙防治策略-----	78
4-4-2 中長期風沙防治策略-----	82
4-5 風沙防治策略佈置-----	83
第五章 結論與建議-----	85
參考文獻-----	87

表目錄

表 2-1	沙塵暴天氣強度劃分標準	7
表 2-2	陸上應用之蒲福風級速表	8
表 2-3	行政院環境保護署臺灣地區沙塵天氣觀測標準	9
表 2-4	沙塵暴有關之視障天氣現象符號	13
表 2-5	在 15 metres/second 風速時土壤粒子的懸浮運動時間	17
表 2-6	臺灣主要風沙危害區域	21
表 2-7	臺灣主要風沙危害區域與治理方法	22
表 2-8	經濟部水利署富岡氣象站 97 年度風速資料統計表	23
表 2-9	中央氣象局臺東氣象站 1993—2008 年風速風向分析表	25
表 2-10	臺東氣象站 97 年度降雨、氣溫與相對濕度資料統計表	26
表 2-11	97 年卑南溪河口段日平均水位	28
表 2-12	各次風沙調查摩擦風速(U^*)估算結果表	32
表 2-13	各次風沙調查飛沙揚塵總量、摩擦風速與河床表面含水量表	33
表 2-14	各次風沙調查飛沙揚塵量與高度關係和總量估算結果表	34
表 2-15	臺東市區 2007 年 10 月 4 日定點落塵調查結果	35
表 2-16	臺東市區 2007 年 11 月 19 日定點落塵調查結果	36
表 2-17	臺東市區 2008 年 5 月 5 日定點落塵調查結果	37
表 2-18	臺東市區各定點落塵粒徑分析	38
表 2-19	臺東市區各定點落塵礦物成份分析	38
表 3-1	臺東市區懸浮微粒氣象因子與卑南溪口氣象因子比對彙整表	50
表 4-1	風沙防治策略、原理及作法	54
表 4-2	2008 年 11 月卑南溪河道沙洲面積計算表	55
表 4-3	2008 年月平均水位、沙灘裸露面積與懸浮微粒值關係表	57
表 4-4	民國 89 年至 97 年風飛沙次數統計表	58
表 4-5	民國 89 年至 97 年風飛沙月份統計表	59
表 4-6	河口段試辦水覆蓋及綠覆蓋防治作為一覽表	65
表 4-7	河床蓆覆蓋及堤前坡綠覆蓋等風沙防治一覽表	71
表 4-8	防風林植栽樹種種類表	80
表 4-9	河床草種植生種類表	81

圖目錄

圖 1-1	卑南溪河口段相關地理位置圖	2
圖 1-2	臺東市風吹沙災害照片	3
圖 1-3	研究計畫範圍圖	4
圖 1-4	研究流程圖	6
圖 2-1	沙塵製造及運輸過程圖	7
圖 2-2	沙塵災害治理措施分類體系圖	12
圖 2-3	石英類小球體之感受性曲線	14
圖 2-4	全球乾旱陸地分佈區塊圖	16
圖 2-5	在紅海上方的灰塵衛星影像圖	16
圖 2-6	石英沙與食鹽比較	17
圖 2-7	風蝕下典型的風刮表面	18
圖 2-8	沙透過風運輸形成沙丘	18
圖 2-9	風吹沙運動型態示意圖	19
圖 2-10	經濟部水利署富岡氣象站各月份風速風向分佈風發圖	24
圖 2-11	中央氣象局臺東氣象站各月份風速風向分佈風發圖	27
圖 2-12	卑南溪流域地層組成圖	29
圖 2-13	卑南溪民國 18 年、22 年、50 年流路圖	30
圖 2-14	卑南溪民國 69 年、75 年、89 年流路圖	31
圖 2-15	各次風沙調查飛沙揚塵總量與摩擦風速關係圖	33
圖 2-16	2007 年 10 月 4 日臺東縣環保局空氣品質監測資料	35
圖 2-17	2007 年 11 月 19 日臺東縣環保局空氣品質監測資料	36
圖 2-18	2008 年 5 月 5 日臺東縣環保局空氣品質監測資料	37
圖 3-1	卑南溪河床飛沙揚塵觀察圖片	39
圖 3-2	利吉層鬆散泥岩照片	40
圖 3-3	卑南溪河床不同類型區塊飛沙揚塵觀察圖片	40
圖 3-4	可能影響臺東市區風吹沙災害主要河段	41
圖 3-5	沙塵隨氣流漂散情形	41
圖 3-6	風吹沙地形因素分析圖	46
圖 3-7	臺東市區 2007/10/4 日各定點落塵量濃度比例	47
圖 3-8	2007/10/4 日風沙影響臺東市區懸浮微粒濃度分佈圖	47
圖 3-9	臺東市區 2007/11/19-21 日各定點落塵量濃度比例	48
圖 3-10	2007/11/19-21 日風沙影響臺東市區懸浮微粒濃度分佈圖	48
圖 3-11	臺東市區 2008/5/5 日各定點落塵量濃度比例	49
圖 3-12	2008/5/5 日風沙影響臺東市區懸浮微粒濃度分佈圖	49
圖 3-13	風吹沙影響層面圖	51
圖 4-1	卑南溪河口段流路衛星影像圖	56
圖 4-2	卑南溪 2008 年水位與沙灘裸露地面積關聯	56
圖 4-3	卑南溪 2008 年月平均水位與市區懸浮微粒值比對關係圖	57

圖 4-4	卑南溪河口段風吹沙優勢風向	58
圖 4-5	卑南溪河口段風吹沙好發月份圖	59
圖 4-6	民國 88-97 年風吹沙天氣時空頻率	60
圖 4-7	颱風侵臺路徑圖	61
圖 4-8	河口段沙質礦物成份比例圖	62
圖 4-9	河口段泥質礦物成份比例圖	62
圖 4-10	臺東市區落塵微粒礦物成份比例圖	63
圖 4-11	卑南溪石山堤防高灘地生態復育	66
圖 4-12	卑南溪台東大堤前坡景觀與植栽	66
圖 4-13	卑南溪中華大橋下游水覆蓋	67
圖 4-14	卑南溪石山堤防高灘地生態渠道	67
圖 4-15	卑南溪石山堤防高灘地生態池	67
圖 4-16	卑南溪河口兩岸堤防高壓噴水幕裝置圖	69
圖 4-17	卑南溪右岸臺東大堤前坡綠化植生防風林牆	70
圖 4-18	河床蓆覆蓋及綠覆蓋風沙防治	71
圖 4-19	跳島式植生工法防風定砂場景	73
圖 4-20	澎湖地區的「蜂巢田」防風定砂工	73
圖 4-21	截砂溝防風定砂流場示意圖	74
圖 4-22	木製防風柵欄	74
圖 4-23	波浪式鋼板防風柵欄	74
圖 4-24	尼龍網防風定砂	75
圖 4-25	草方格防風定砂	75
圖 4-26	利用風力防風替代方案	76

辭彙或符號說明

Q：洪峰流量

cms：流量單位 (m^3/s 秒立方公尺)

N：曼寧粗糙係數

Cu：均勻係數

Cd：曲率係數

DTM：數值地形模型

U^* ：起動風速 (m/s)

Q_s ：輸砂速率 ($\text{m}^3/\text{m-hr}$)

g ：重力加速度 (m/s^2)

d ：沙粒直徑 (mm)

ρ ：密度 (g/cm^3)

ρ_s ：砂粒密度 (g/cm^3)

ρ_a ：空氣密度 ($1.226 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$)

Z_0 ：表面粗糙長度 (mm)

PM_{10} ：懸浮微粒濃度值 (ug/m^3)，指粒徑十微米以下的空氣中懸浮微粒



第一章 緒論

1-1 研究背景與動機

1-1-1 研究背景

卑南溪流域位於本省東南部臺東縣境內，北鄰秀姑巒溪流域，東界海岸山脈分水嶺，南接太平溪、利嘉溪，西至中央山脈與高屏溪流域分踞東西向。主流（大崙溪）發源於中央山脈與卑南主峰（3295 公尺），循天然山谷東流，於海端鄉新武村下游匯合來自南橫公路側之另一支流霧鹿溪（發源於關山主峰海拔 3668 公尺）後，更名為新武呂溪，於初來附近流出山谷。主流流至池上南方受海岸山脈之阻擋，轉向沿海岸山脈南走，於瑞源、鹿野東南郊分別納鹿寮溪及鹿野溪兩大支流，後經山里、利吉河谷、及卑南、岩灣，於臺東市北郊注入太平洋。卑南溪河口段河床平均坡降約 $1 / 171$ ，河口段河道曼寧粗糙數 n 值為 0.034，河口段（臺東大橋水文測量站）100 年重現期之水理分析洪峰流量 $Q = 19100 \text{ cms}$ （秒立方公尺），輸砂能力 34078 kg/sec ，河口段（中華大橋下）洪水位 9.98 公尺，水面計畫河寬 1128.4 公尺，平均流速 4.8 m/sec ，由卑南溪河口段 55 年至 76 年間河槽沖刷深度調查為 -0.56 m ，加上卑南溪因上游土石泥砂來源不豐，河道坡度陡峻，有許多河道斷面皆為超臨界流，為典型急流型河川、沖刷性河槽（經濟部水利署第八河川局 2006 年卑南溪治理規劃報告 p1—p6-3 頁）。

卑南溪河口段位於臺東縣臺東市東北方(如圖 1-1)，東臨臺東市富岡里、西臨臺東市區、南臨太平洋、北臨臺東海岸山脈（標高約 150 公尺），西北與中央山脈相鄰，卑南溪總面積約 110 平方公里，南北長約 20 公里。卑南溪穿越海端鄉中央山脈後，沿臺東縱谷海岸山脈順流至卑南鄉利吉斷層帶，該斷層帶組成巨厚泥岩地質，質地鬆散，每遇豪大雨，土壤沖刷流失嚴重，河床上散佈著相當多的砂、礫石及細塵土。卑南溪流域屬成長型荒溪河道，洪水流路變化不穩定、排水迅速，雨季及洪水發生時能立即將洪水即時疏導，原有河道隨即變乾竭，因此使河床擁有極大的裸露沙灘地面積。

位於卑南溪西南方之臺東市，總人口數約 110,000 人，佔全臺東縣全部人口 45% 比例，是臺東縣十六個鄉鎮市之地理、人口、政治、經濟及文化中心。而臺東市素有沙城之稱，於每年秋冬季或颱風侵襲前，強勁東北季風與颱風環流共伴影響，造成臺東市區嚴重之「風吹沙」災害。當風吹沙發生時，大小砂粒與灰塵隨風揚起四處飄散，使整個臺東市區猶如海市蜃樓，籠罩在一片灰濛濛的沙塵中，戶外能見度相當低，空氣品質因此十分惡劣，對臺東地區居民交通安全與生活品質及農工商業均造成相當大之影響，附近居民為躲避風沙進入室內緊閉門窗，家庭環境衛生及生活品質降低，在農作生產方面受到沙塵影響生長停滯，市區店家飲食生意也大受影響，甚至關門暫停營業等現象。由此可見卑南溪河口段風吹沙的發生，

已嚴重造成臺東市區居民生活上的一大困擾。

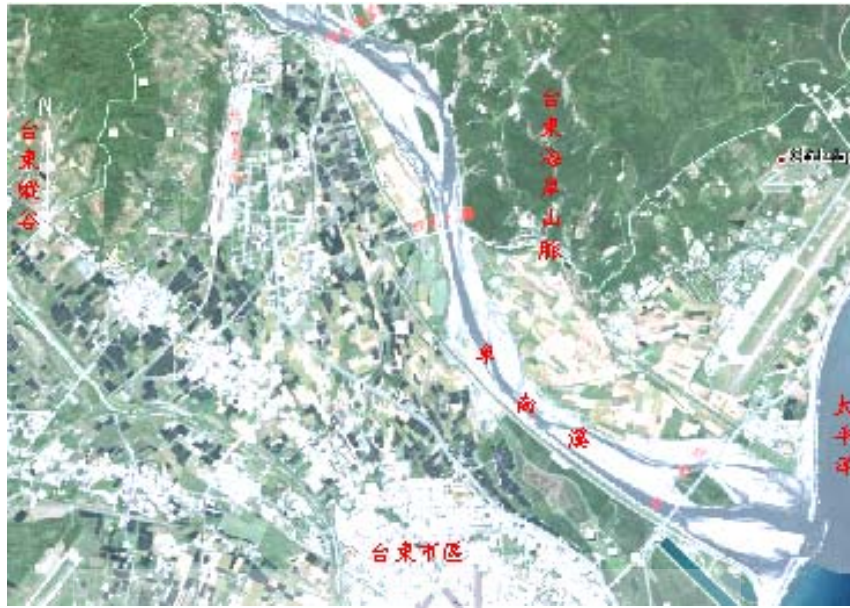


圖 1-1 卑南溪河口段相關地理位置圖（影像摘自 google earth）

1-1-2 研究動機

臺東市風吹沙災害由來已久，發生過程及防治方法尚有許多值得研究及探討的地方，本研究動機主要為：

一、 風吹沙發生的時空因素

每年臺東市區發生風吹沙現象最嚴重的地點為鄰近卑南溪河口段地區，風吹沙常發生於夏末春初，東北季風盛行或颱風來臨前，加上河床連日乾旱無雨，河床沙灘地因陣陣強風或龍捲風，氣流將河床裸露沙灘地鬆散細塵土揚起沉降至鄰近之臺東市市區。河床細塵土來源可能為雨季或豪大雨將上游大量泥質沙塵沖刷至下游河口段高低灘地淤積而成，經連日乾旱曝曬變成為風吹沙的主要來源，在強風的吹襲下引發臺東市區嚴重風吹沙現象。截至目前為止，全省有關風吹沙的資訊僅止於風吹沙發生事件的報導，有關風吹沙系統性的研究，如發生的時間與空間及防治策略仍不清楚，河床裸露沙灘地吹起的風吹沙現象，國內外相關研究不多，尤其是針對特定河川沙灘地風吹沙發生的案例分析回顧更是稀少，有賴對環境問題的深入瞭解與對策研擬改善因應。

二、 河口段風吹沙起動條件蒐集探討及分析

搜集歷年以風吹沙災害起動原因包括氣象（風力工程、乾濕度、降雨量）、水文狀況（水覆蓋範圍面積）、地理環境（氣流導引、上升梯度）、沙灘地土壤力學（膠結、剪應力）等各項綜合因子，分析各因子與風吹沙起動機制，探討風與砂間關係、環境條件因素及風蝕現象減低方法，以提供研判有效防治方法。

三、 綜合研擬河口段風吹沙治理之策略

風吹沙防治對臺東市推展好山好水樂活村觀光事業及本市居民而言，是刻不容緩重要事務。綜觀國內外風吹沙相關防治研究，多有著墨於沙漠地區、乾旱地區、半乾旱地區或濱海地區沙灘裸露地研究防治工作，也已開發多種防治工法，減緩揚塵發生效度，成效可說良好。但對河川沙灘裸露地防治揚塵等工作研究卻很罕見，主要是防治技術層面遭遇天災等無法預知瓶頸，包括 1. 河川裸露沙灘地會受到雨季洪水淹沒破壞的影響； 2. 河川區內植物生長環境嚴苛，復育定砂減塵不易。因此如何尋求有效防治河川沙灘地風吹沙策略，為本研究重要動機。

1-2 研究問題性質與定義

卑南溪源自中央山脈東側海端鄉境，穿越延平鄉和卑南鄉後，沿臺東縱谷花東鐵路順流至卑南鄉利吉村斷層惡地，此河段之河川地質為鬆散易流失的泥岩地層，草木難生、土壤流失嚴重，遇豪大雨極易崩坍，造成河道淤積，而卑南鄉利吉村對岸，是卑南溪切割卑南山脈小有盛名之臺東縣「小黃山」岩壁，屬岩礫石層。卑南溪繼續往南跨越過臺東大橋與中華大橋後即至出海口；此段之河川水流走勢平緩，河幅寬廣約 2200 公尺，河床上散佈相當廣泛之砂礫及細土表層。

位於卑南溪河口段南岸之臺東市，每年秋、冬季或颱風侵襲前，低壓氣流強勁，狂襲之東北季風或颱風外圍環流影響，均會造成臺東市區嚴重之風吹沙災害，如圖 1-2 影像。



圖 1-2 臺東市風吹沙災害照片

當風吹沙發生時，大小沙粒與微塵隨風揚起四處飄散，整個臺東市區就如海市蜃樓，籠罩在一片灰濛濛的沙塵當中，戶外能見度相當低，且空氣品質懸浮微粒值高升，對臺東地區居民之交通安全與生活品質均造成相當大之影響。

歷年影響臺東市區之風沙問題，多源自於卑南溪下游段河口堆積之細塵土，受強烈東北季風或颱風過境所形成之風場影響，將其挾帶至臺東市區，而造成市區風吹沙災害。

為解決臺東市風吹沙災害，政府單位各相關機關每年均耗費相當大經費資源，進行風吹沙防治改善工作，然而其防治成效均相當有限，最長也僅維持約一年左右。例如 2004 年臺東縣政府農業局接授臺東縣環境保護局委託於卑南溪出海口沿岸護坡前後種植大量喬灌木，並在河床沙灘裸露地種植甜根仔草、馬鞍藤，進行風吹沙防治；但於 2005 年夏季期間，因受海棠、馬莎與泰利等颱風侵襲，卑南溪上游颱風洪水將全數之種植沖失，且上游挾帶下之大量沙石同時淤積於卑南溪出海口段河床。又如 2005 年臺東縣政府風沙防治聯合小組於行政院環保署爭取得經費，在臺東市中華大橋下，施以稻草蓆覆蓋方式進行風吹沙防治試驗，雖已發揮抑制飛沙揚塵效果，但遇豪大雨或溪水暴漲時，覆蓋於河床上之稻草即為急流洪水所沖走，損失有效覆蓋面積。政府年年花費預算治理，但每年僅採行一種工法進行風吹沙防治，未能有效針對河道特性、風場揚塵起動機制、風吹沙分佈區域進行整合性調查分析研判，每年均施作防風沙工作，但風吹沙狀況還時不斷發生，非常苦惱著臺東市民生活，並妨礙都市健全發展。

1-3 研究範圍及目的

本研究範圍計畫涵蓋卑南溪利吉橋上游側至出海口河段(約 7.0km)及臺東市區，如圖 1-3，防治策略計畫由環境基本資料調查、風沙防治資料蒐集，河口段裸露沙灘地質特性蒐集，河口段風場與溫濕度、地形資料蒐集，並檢討以往防治工法和策略，研擬出適合卑南溪河口段風吹沙防治策略，提供實質定沙減塵治理佈設方案參考。

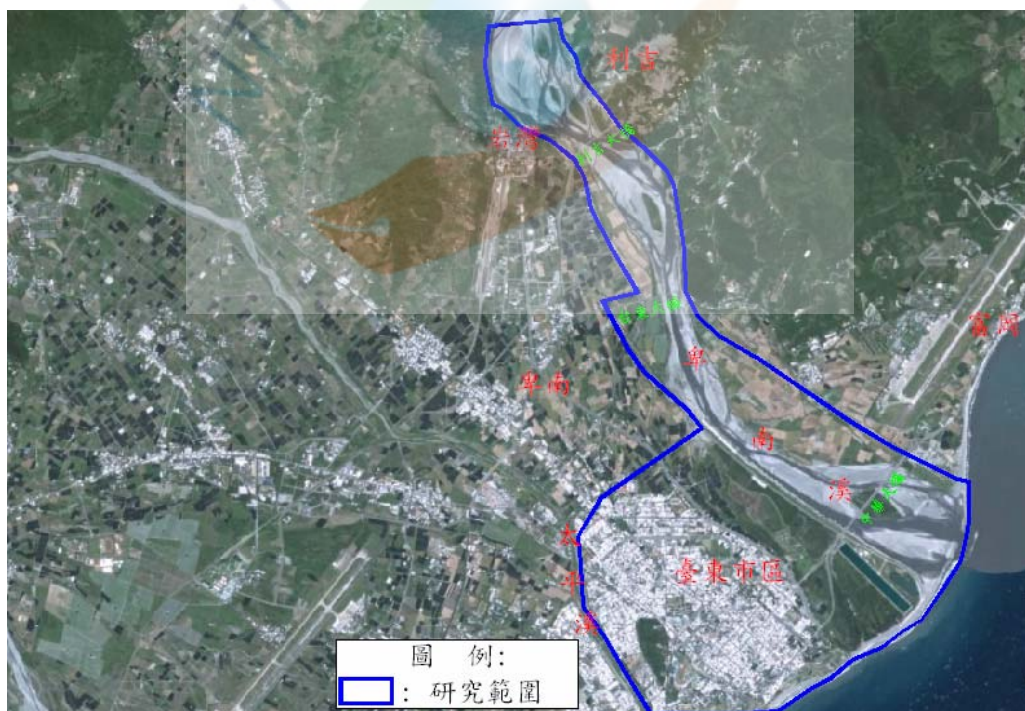


圖 1-3 研究計畫範圍圖 (影像摘自 google earth)

1-4 研究內容

卑南溪河口段每年秋冬季至春初或颱風侵襲前劇烈氣候影響，河床上狂襲之東北季風或颱風外圍環流，均造成卑南溪河口段及臺東市區嚴重之風吹沙災害，風場對河床裸露高低灘地懸浮微粒，發生風吹沙揚塵情形。本研究計畫借由歷史資料比對臺東卑南溪河口段風吹沙特徵、河道變遷、河床裸露沙灘地面積變化與風吹沙關聯性分析、現地勘察河床環境生態及土壤特性比對風沙起動機制、搜集河口段風場含水量及沙泥質微粒質性與臺東市區揚塵總量關連分析，歷年防治工法執行及成效評估，並蒐集國內外有關裸露沙灘地之揚塵抑制措施相關資料，研究卑南溪河口段河床沙灘地防制風沙方案之策略及建議。

1-5 研究流程

風吹沙現象本身是一種複雜多變，且運動尺度範圍極大的自然現象，其運動型態受粒徑大小之影響，砂粒運動分為滾動、跳躍、懸浮等類型，而風吹沙現象多發生於沙漠地區與沙灘發達之海岸、河口地區，其運動物理現象差異大且觀察掌握不易，因此理論描述都有其侷限，需要詳細蒐集調查研究卑南溪河口段基本資料、區域之完整地形地貌、水文、溫濕度風速風向等氣象條件、沙塵懸浮微粒分佈、河床沙源質性與現地風吹沙觀測資料，分析風吹沙粒徑分佈與成分性質，配合水文氣候等監測資料，歸納研判風沙源與發生機制，再配合歷年風沙防治工法成效分析與評估，風吹沙預警系統之建置，結論出風沙防治有效方案與管理建議，研擬出最適合卑南溪河口段之飛沙、揚塵之防治策略；本研究流程如圖 1-4：

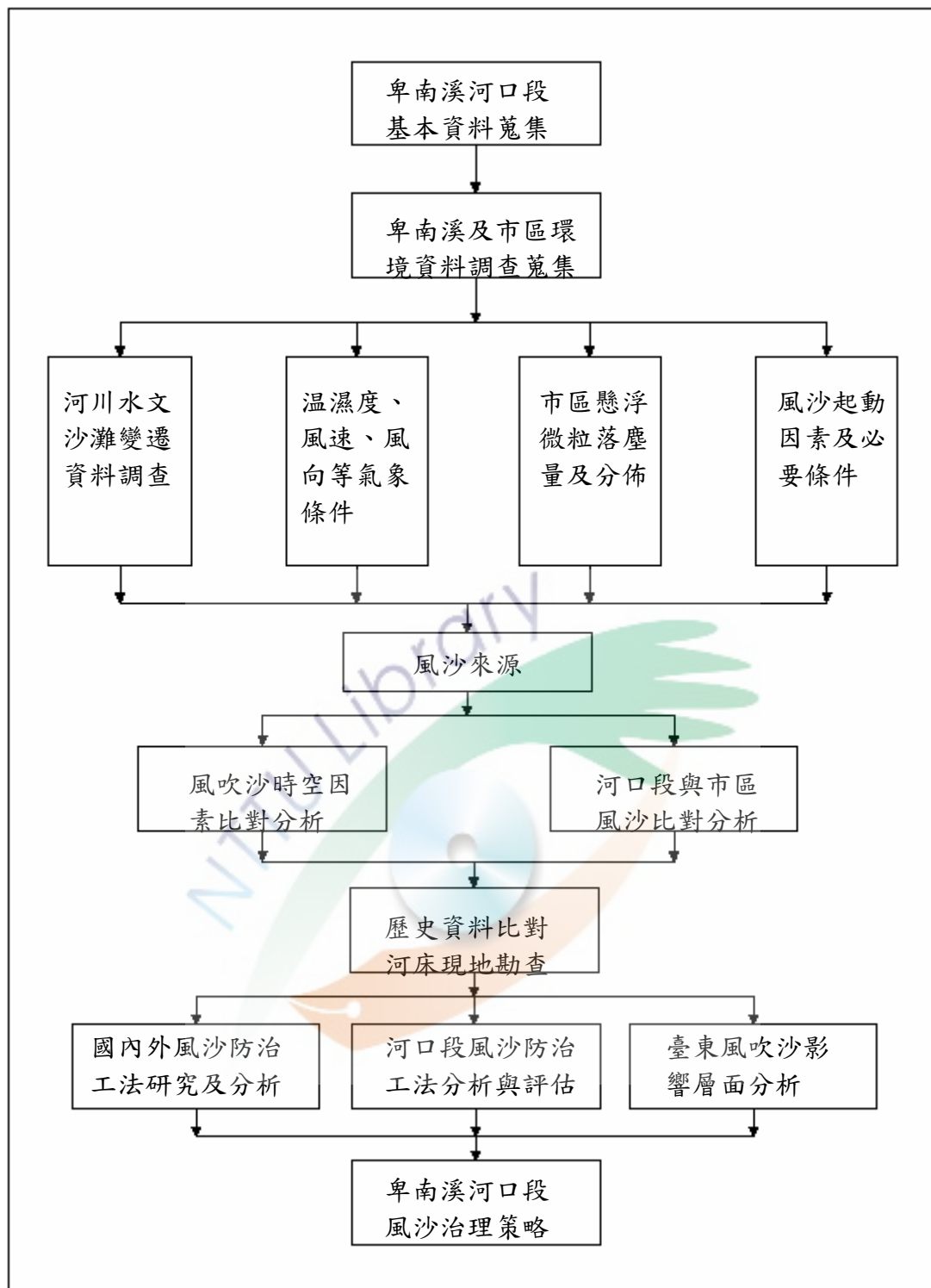


圖 1-4 研究流程圖

第二章 文獻回顧

2-1 風吹沙與沙塵暴相關定義

2-1-1 沙塵暴定義

錢正安等（1996）中國大陸學者根據西北地區實際情形，參考國內外現有標準，將中國西北地區沙塵暴天氣強度劃分四種標準（如表 2-1），其中單點沙塵暴天氣以發生瞬間極大風速、水平最小能見度作為劃分標準。

所謂「沙塵暴」是沙暴和塵暴的總稱，指強風將地面大量的沙和土粒捲揚起來，沙塵的製造及運輸過程（如圖 2-1），沙塵暴是使空氣變得混濁，能見度大為減小的一種災害性天氣現象，基本上是乾旱與沙漠化氣候環境的產物，其中「沙暴」係指八級以上的強風把大量沙粒吹至近地面所形成的攜沙風暴；「塵暴」則是指強風把大量微細塵粒捲揚至高空所形成的強風暴，其前緣大概有高而寬之沙牆，推進頗為迅速，此沙暴或塵暴後面常伴有積雨雲，偶而與冷氣團相偕，其前緣通常並無任何雲層。氣象學家把地面能見度低於 1 公里者或氣象測計中水平方向能見度小於 1000 公尺的風沙現象稱「沙塵暴」，如果風力加到 8-9 級，被刮起的沙塵增多，天空變得越來越混濁，能見度小於 200 公尺，這種稱為「強沙塵暴」，如果風力再加大到超過 10 級，能見度小於 50 公尺，這種稱為「特強沙塵暴」。強烈的沙塵暴可能使能見度小於 50 公尺，俗稱黑風或稱為黑風暴。在不同地區沙塵暴有不同的名稱，例如：非洲和阿拉伯地區，將沙塵暴稱為哈布（Haboob），印度則稱其為安德海（Andhi），另外有些地區稱之為混沌（Phantom），即「鬼怪」的意思（柳中明等，2001）。

表 2-1 沙塵暴天氣強度劃分標準

強度	瞬間極大風	最小能見度
特強	>25m/s	0 級 <50m
強	>20m/s	1 級 <200m
中	>17m/s	2 級 200m-500m
弱	>10m/s	3 級 500m-1000m

資料來源：錢正安等（1996）



圖 2-1 沙塵製造及運輸過程圖（柳中明等，2001）

2-1-2 風吹沙定義

風吹沙是指因為大氣對流運動所產生的風力，對地表土壤的侵蝕因而帶動土壤的顆粒，產生移動搬移的現象，風吹沙現象一般發生在地表風速強、沙源充足和日照強的地區。按交通部中央氣象局風沙資訊歸類，風吹沙於氣象分類屬於塵象（Lithometeors）中的吹塵或吹沙（Drifting and blowing），其定義為地面之塵、沙吹揚上飄之現象。氣象學在陸上應用之蒲福風級速（如表 2-2），在氣象測報上依風速、揚塵高度，將塵、沙被風吹揚高度小於 2 公尺，且不足以蔽障視線高度之能見度者，稱為「低吹塵或低吹沙」；沙塵揚起高度超過 2 公尺而造成視障，導致水平能見度不足 10 公里時，為「高吹塵或高吹沙」。若使水平能見度不足 1 公里者，則稱之為「塵暴或沙暴」，行政院環境保護署也依據臺灣地區沙塵天氣特性訂定沙塵觀測標準，觀測措施與管制作為，依監測站懸浮微粒濃度值，採行密集觀測、密集觀測及發布新聞稿、發布新聞稿及人車管制等三大措施（如表 2-3）。

表2-2 陸上應用之蒲福風級速表

風級速	風之稱謂	一般敘述	風速(m/s)
0	無風	煙直上	< 0.3
1	軟風	煙能表示風向	0.3-1.5
2	輕風	人面感覺有風及樹葉搖動	1.6-3.3
3	微風	樹葉及小枝搖動不息	3.4-5.4
4	和風	塵土及碎紙被風揚起	5.5-7.9
5	清風	有葉之小樹開始搖擺	8.0-10.7
6	強風	樹之大枝搖動，電線有呼嘯聲	10.8-13.8
7	疾風	全樹搖動，行走困難	13.9-17.1
8	大風	小樹枝吹折	17.2-20.7
9	烈風		20.8-24.4
10	狂風		24.5-28.4
11	暴風		28.5-32.6
12	颶風		32.7-36.9

資料來源：戚啟勳，普通氣象學，台北:正中書局，1966

表 2-3 行政院環境保護署臺灣地區沙塵天氣觀測標準

監測三站平均懸浮微粒濃度值 (PM_{10})	等級劃分	觀測措施與管制作為
$< 150 \mu g/m^3$	0 級	密集觀測
$151-200 \mu g/m^3$	1 級 (不良)	密集觀測及發布新聞稿
$201-300 \mu g/m^3$	2 級 (不良)	密集觀測及發布新聞稿
$301-400 \mu g/m^3$	3 級 (有害)	發布新聞稿及人車管制
$401-500 \mu g/m^3$	4 級 (有害)	發布新聞稿及人車管制
$\geq 501 \mu g/m^3$	5 級 (有害)	發布新聞稿及人車管制

本研究資料整理自：行政院環境保護署

2-2 國內風沙治理研究

2-2-1 臺北縣福隆至澳底海灘風吹沙

臺北縣東北角福隆至澳底一帶海灘因地理位置，氣候受大陸及海洋氣團影響，每年 10 月到翌年 4 月間東北季風盛行，6 月到 9 月間又有颱風入侵，故地形平坦之沙質海岸風吹沙現象相當明顯。風吹沙造成海邊沙丘地形的變動和沙灘面（體）積的增減，風吹沙之研究有助於海岸沙丘地形變動之預測或評估。從事風吹沙與地形變化之探討，研究福隆至澳底一帶海灘，規劃試驗沙灘物性試驗、風沙試驗及地形量測。沙灘物性試驗希望了解此地沙的粒徑分佈和沙的物理特性，以便了解沙灘風沙來源的特性。風沙試驗是以自製風沙計架設於現場用以捕捉風沙，再由收集到的風沙資料來分析和討論風吹沙的相關物理現象，了解當地風沙之運移情形，並推估當地風沙的輸沙速率和輸沙量，歸納出適合當地的風沙經驗公式。地形量測是利用 GPS RTK 的測量方式，每隔一段時間來測量試驗區之沙丘地形，藉以得到最新的地貌，進而比較求得地形變化量，並用同一時段內的風沙輸沙量和地形變化量比對，評估風沙與地形變化是否有其相關。該研究試驗得知，福隆、澳底一帶海灘沙粒粒徑的範圍在 2 mm 到 0.075 mm 間，其均勻係數 $C_u = 2.1$ ，曲率係數 $C_d = 0.933$ ，因此該處沙灘為均勻級配，另由比重瓶法求得海灘沙粒密度為 $2.51 g/cm^3$ ，礦物成分則以石英及赤鐵礦的含量為最高。而由風沙試驗中得知，80% 以上的風沙粒徑是在 0.297 mm 以下，風沙計內沙粒之密度為 $2.61 g/cm^3$ （與海灘沙粒密度 $2.51 g/cm^3$ 相近），風沙計各層高度與風沙運移量約成指數函數關係，各測站推估的風沙主風向在東北偏北 5 到 20 度間，推估的輸沙速率，在 0.00024—0.00104 間。再由 RTK GPS 方式測量地形得到最新地形 DTM 資料，用同一時段內的風沙輸沙量和地形變化量比對，得到相當一致的結果，比對誤差量約為 17.08%，顯見利用風沙計量測所得之淨

風沙量和主要風沙輸沙風向，可大致推估海邊活動沙丘帶地形之變化量。研究結果可提供卑南溪沙灘地沙粒逸散潛勢、河川與海灘沙灘地質性比較及輸沙率模式、河川沙灘地增減與海灘沙丘地形變化量比較參考（林雅谷，2004）。

2-2-2 花蓮縣花蓮溪風吹沙

花蓮溪屬荒溪型河道，排水迅速，雨季及洪水發生能立即將洪水即時疏導，原有河道乾竭，使河床擁有極大的裸露河灘地。鄰近出海口地區，雨季時從上游帶來大量泥沙淤積，經連日乾旱變成風吹沙的主要來源，在強風的吹襲下引發風吹沙現象，造成當地居民相當多的困擾，能見度降低交通受影響、居家環境衛生品質降低，甚至節慶活動停止辦理。風吹沙常發生於夏季連日乾旱無雨，或是颱風來臨前，外圍環流也會由河床捲起陣陣狂沙，吹入臨近的村落，研究風吹沙的時空特性結果：1. 裸露河灘地變遷及植被消長受洪水及土地開發利用影響； 2. 風吹沙發生時間點與河床乾旱、東北季風及颱風來臨前有極大關係； 3. 風吹沙發生空間關係受地形及風向影響； 4. 河灘地微氣候變化受到水域寬廣，風阻較小，風速加強，風吹沙有加乘效果； 5. 風吹沙影響範圍受風吹沙規模影響，主要原因為起沙地點的沙源粒徑大小、強風的風速及風向因子（蔡崇憲，2007）。

2-2-3 新竹縣頭前溪風吹沙

新竹縣以東北季風名聞，素有台灣風城稱號，這美麗的風城一到十月份，頭前溪含沙旱地（總面積約為450000 平方公尺），河床上的沙被強勁的季風吹入新竹市，讓新竹壟罩在宛如小型沙塵暴的漫天風沙景象中。經研究以吸管束成風洞裝置，風扇為風源模擬河邊自然風的實驗發現2 cm 長的吸管便可達到風洞效果使風保持平穩，在控制風角度的實驗中以40度的風向最符合溪邊的沙丘角度。在沙量的實驗發現地表風速在2.5 m/s 以上，其高空2.5m 處風速約為7.5~10.0 m/s，此時表層0.7 cm 厚的沙子在3分半鐘左右會幾乎全部飛進城市中。定沙實驗以覆蓋織網的效果最佳，能定住92.2%。防風牆1 / 2圓弧具較佳的定沙效果，一層則可定住88%的沙，3層即可達到幾乎百分之百定沙。另外一層柵欄與風向的角度約60度與沙面的角度約135 度可定住54.5%的沙。在撒水的實驗中只要0.5%的水就可以定住70%的沙子，推測水的定沙原理不是靠水的重量，是因水的存在增加沙粒間的吸引力。觀察測量後提出沙塵暴的防治可分三方面進行： 1. 頭前溪左岸應以定沙管理為主；高灘地或民眾休憩的河濱公園的開發應設在右岸； 2. 定沙管理分兩部份：一是有條件開放農民種植低污染的農業如牧草，一是計畫性的設置定沙柵及定沙牆與覆蓋沙面； 3. 採砂與運送要利用科學方法：加裝噴霧器噴水或密閉式運送，可節省可觀的砂石與降低環境的汙染（李抒敏等，1957）。

2-2-4 臺東縣卑南溪風吹沙

臺東縣卑南溪出海口段風吹沙，常使臺東市市區籠罩在漫天沙塵之中。這不單造成空氣品質惡化，影響人體健康，風沙的低能度甚至曾肇致交通死亡車禍，更可使臺東空軍志航基地戰鬥機停止飛航訓練。多年來臺東縣政府與中央單位（行政院環境保護署、經濟部水利署第八河川局）雖然多方努力，投入相當的人力與物力，進行卑南溪沙塵災害研究與防治，但改善成效似乎有限，臺東市區風吹沙情況仍非常嚴重。

氣象資料顯示，卑南溪風吹沙以西南風、東北風等風向最易引發風沙狀況；而影響之東北風天氣系統可由東北季風及颱風或熱帶低壓環流所引發；西南風則可來自鋒面及颱風或熱帶低壓等引起；而西風、西北風、東風主要來自颱風環流氣流的影響。風沙發生時間以中午時段最為劇烈，溫度對此地區風吹沙的形成有一定相關連性。

有關飛沙沙粒之物理性質探討，除沙粒粒徑與成分與形狀係數分析外，沙粒含水率與飛沙量關係與沙粒起動風速，均係影響飛沙相當重要的物理機制。

風沙問題的防治策略，可從風沙的發生原因來思考。一是破壞強風的風場，例如利用防風林、攔沙柵等設施來降低風速，以減少風砂搬運作用的起動和風砂的搬運量。另一方面的作法是減少沙源的裸露，譬如以植物生長的自然覆蓋、稻草席的覆蓋等，以減少砂、塵被風捲揚的機會（曾俊傑等，2008）。

2-2-5 國內風沙治理研究成果

盛志澄（1961）、甘偉航（1962）在早期對研究木麻黃防風林對防制風吹沙的功效研究，有相當的成果，卑南溪臺東大堤沿岸早期遍植木麻黃，對臺東市區風吹沙防制，發揮一定功效。

林信輝、江永哲（1979）利用風洞試驗，發現台灣西部的風吹沙輸沙量和日本學者河村先生或英國學者 Bagnold R. A 的風沙公式所推估的風沙量值為小，但與 Havikawa 的試驗較相近，且認為當沙體含水率達 2.1% 以上時，則風沙量很少，也就是說風吹沙現象不明顯。

游繁結（1986, 1988）以實地測量的方法，認為 Bagnold 的風沙經驗公式不太適用於臺灣西海岸各區的風沙推估，並據其推估認為西部的風沙量約為 13m/m/year。黃金山（1987）也在彰化雲林交接的濁水溪河口，做過風吹沙的現場調查實驗。

林宗儀（1998）在雲林海岸做風吹沙研究，他利用補沙器補抓風沙，並收集當地附近氣象局的風速，帶入前人的經驗公式，來探討公式估算和實際搬運量的差異，並找出一更合理的風沙推估值。

周湘俊（2002）以風洞實驗結合高速攝影技術，在不同風速下量測躍移的顆粒之運動軌跡，運動速度及旋轉速度等特性，並探討物理現象及統計之特性，並且由他發現在模擬顆粒

的躍移運動時，上舉力為不可忽略的重要因素。

林宗儀（2003）在溼沙對風沙搬運的影響中，利用自行研發製作之攜式簡易風洞設備，在天然沙灘上進行溼沙效應的實驗和觀察，發現一旦沙面含有水分，將造成表面沙粒完全失去其可移動性，和乾沙狀況時之搬運相差頗大。

許泰文（2004）在台中港做過風沙的調查，推估台中港北側淤沙區每年風沙的搬運速率為 14.3m/m/year，淨輸沙方向由東北向西南，主要風沙搬運發生在冬季。

黃偉柏（2004）利用風沙的經驗公式，對福隆海岸 1999 年到 2003 年的風吹沙趨勢與輸沙量進行計算，以了解風吹沙對地形變遷的影響，另外發現颱風侵襲前後及東北季風強風時期，風吹沙現象較為明顯。

吳正（2003）風沙地貌與治沙工程學，針對風沙揚塵災害研究，列舉出沙塵災害防治措施及相關佈置建議如圖 2-2 所示。

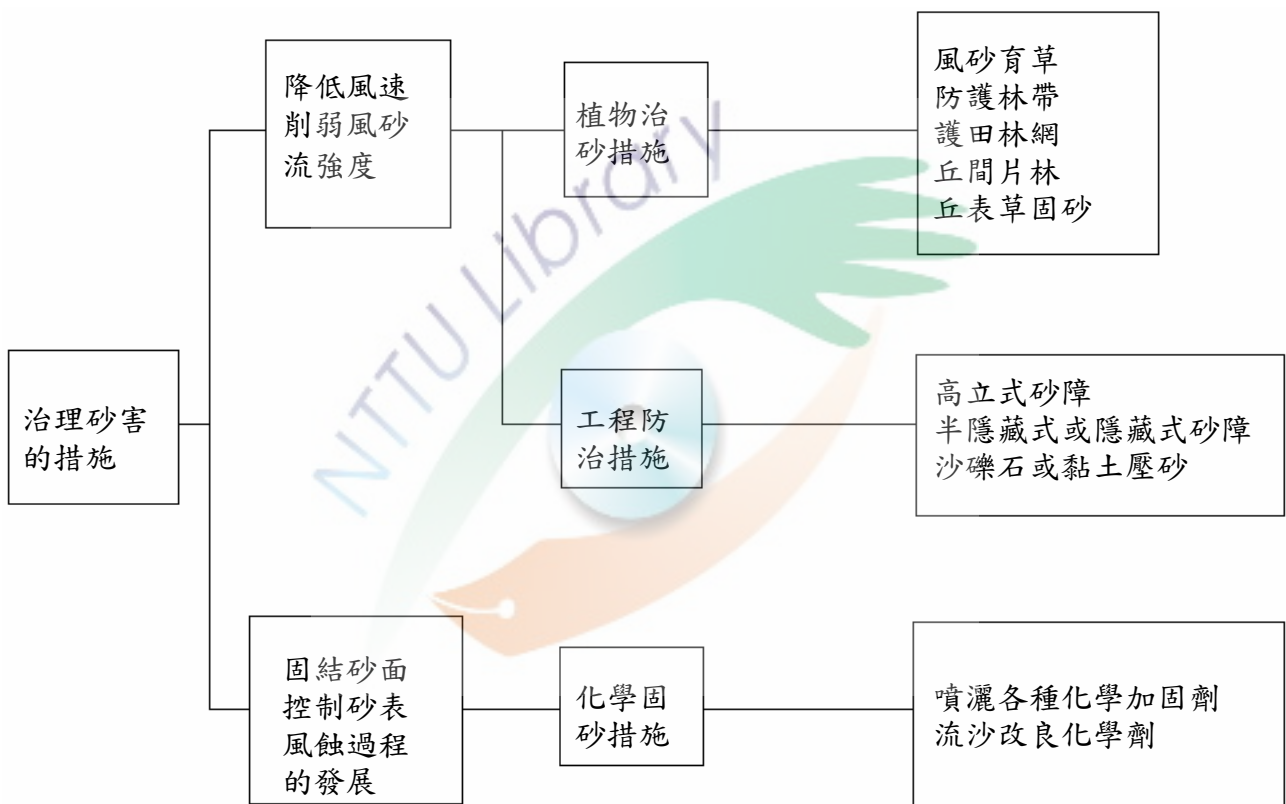


圖 2-2 沙塵災害治理措施分類體系圖（吳正，2003）

2-3 國外風沙治理研究

2-3-1 中國大陸沙塵治理研究

近年來中國大陸的沙塵天氣頻率有增加、間隔減短、強度增強的趨勢。據中國科學院蘭

州高原大氣物理所的資料顯示，1950-1990 年代，每 10 年沙塵暴出現的次數為 5、8、10、14、17 次，2000 年春季北京也經歷 12 次強沙塵天氣。跨入 21 世紀，2001 年大陸遭受 32 次沙塵暴侵襲，其中 18 次源自蒙古；2002 年 11 次、2003 年 13 次，綜觀 1994-2003 年，共有 42 次沙塵事件及 54 個沙塵日。沙塵暴有關之視障天氣，中國大陸氣象單位編製代表符號如表 2-4。2002 年 3 月 19 日，北京更出現了十幾年來最大的沙塵暴天氣，空氣中懸浮微粒濃度高達 $10000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。沙塵暴幾乎席捲中國北方的 8 個省分、自治區、直轄市共 140 萬平方公里，影響人口達 1.3 億。沙塵暴也波及了鄰國，南韓全國均籠罩在棕黃色的塵雲下，空氣中懸浮微粒濃度高達 $3000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。沙塵暴並迫使數百所小學停課、電子產業停工，並擾亂了空中交通，導致機場關閉、班機停飛。中亞沙漠的沙塵可影響到日本、韓國，甚至太平洋彼端的美國西岸，非洲撒哈拉沙漠生成的沙塵也可以長程輸送，跨越大西洋抵達美國佛羅里達州。「長程輸送」跨越了人為的行政疆域、挑戰了傳統的管理觀念，地區性的污染物不再只是國內污染防治的標的，也是國際環境規範的範疇。沙塵對公共衛生的影響已經確定發生，據美國地質調查所(USGS)研究顯示：非洲撒哈拉沙漠的沙塵，從一萬呎高空的大氣層中，夾帶著有害細菌跨洋長程輸送到美洲大陸，在 1973-1996 年間造成大西洋西岸 Barbados 群島居民氣喘病例增加 17 倍之多。沙塵伴隨著各處捲入的細菌、酸性粒子、污染物質、海鹽、塵霾，越界跨海長程輸送，凸顯了沙塵暴全球化的衝擊。

表 2-4 沙塵暴有關之視障天氣現象符號

天氣符號						
說明	塵(沙)像	揚塵(沙)	沙塵暴	嚴重沙塵暴	吹煙	霾

資料來源：錢正安等 (1996)

大陸沙塵影響台灣空氣品質的現象，最早可見於 1988 年 4 月 12 日至 15 日，在嘉義以北、包括花蓮之空氣品質監測站，均測得空氣中懸浮微粒 (PM_{10}) 急速升高之現象，最高值可達 $201\sim 422 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。在 1995 年 3 月北台灣地區發生泥雨現象時，萬里測站之 PM_{10} 小時濃度曾高達 $586 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，經分析基隆及汐止測站所採集之微粒樣品結果，其化學成分特徵與大陸沙塵相近，提供判斷懸浮微粒來源之有利佐證。在影響衝擊方面，台北地區的大型醫院如台大和新光醫院，沙塵事件日後三、四天，心、肺和眼方面疾病急診人數明顯增加。

沙塵天氣發生需有三個必要條件：第一、有利於強風的大氣環流形勢。第二、大氣邊界層處於不穩定狀態。第三、有利的沙源條件，大風經過的區域內必須下界面植被稀疏，以及土質乾燥疏鬆。同時滿足上述三條件，即是沙塵暴的多發區域。條件細述如下：1. 有利於強風的大氣環流形勢：前期一般有三天以上的持續高溫天氣，促使地面輻合上升運動增強，當冷鋒過境時，氣壓梯度和溫度梯度明顯增大，加速地面擾動，捲起地面沙塵，加上地面輻合上升運動將地面沙塵帶入高空，使空氣變的越來越混濁不清，能見度減小，就可能導致沙塵暴天氣的產生；2. 大氣邊界層處於不穩定狀態：冷暖空氣活動頻繁，加上太陽的輻射增

強，使得近地層，特別是沙漠地區白天熱力增溫幅度很大，大氣層趨向不穩定狀態，一但出現有利的大尺度環流背景就利於中小尺度天氣系統發生及發展或引發上下層的冷暖空氣交換。例如：天氣晴朗，地面受熱快，近地層空氣很不穩定，當午後熱對流很旺盛的時候，這種動力和熱力的不穩定，會使熱對流猛烈的發展； 3. 有利的沙源條件：主要源區為沙漠或是沙地，植被稀少，前期有長期的乾旱少雨，地表沙化嚴重，土壤裸露，地表土質疏鬆，甚至是人為的開發礦產，如此一來，沙塵極可能被強風吹起帶到下游地區。 其他相關因子：1. 地形作用：特殊的地形對於沙塵暴天氣的形成有額外的加強作用； 2. 都市”熱島效應作用”：由於西北地區部分新型工業城市的迅速發展，工業化程度的提高，城市規模擴大，人口增多，使該地區與周遭地區之間的溫差日趨加大，形成相對的熱島。當冷空氣進入該區域時，使氣壓梯度和變壓梯度明顯增大，地面輻合上升運動增強，使冷鋒進入該地區後，強度進一步加強，也是該地區形成沙塵暴天氣的一個不可忽視的因素（柳中明，2001）。

2-3-2 非洲利比亞沙漠沙塵研究

有許多關於沙漠沙丘的研究，其中沃恩科尼博士近期對沙波現象研究總結，大家對沙丘的外型描述沒有異議，但仍有一些不確定的要素，如我們無法完全解釋許多關於揚沙(風吹沙)的奇怪現象。有兩組問題待解決：1. 沙為何不是隨意散佈，而是累積再捲起； 2. 它是如何累積成沙丘，沙與風的作用機制，沙之形狀、尺寸等重要穩定平衡條件。沙粒以何種模式穿越國家，以及它們累積在特定地方的原因；有一個容易混淆的想法是，沙和灰塵之分辨。當強風吹起，越過乾旱岩石、黏土和腐壤、體質鬆散、暴露表層，細粒子可由暴風帶上好幾千英尺高度，製造出沙暴或者塵暴。同時沙雲也讓高處的空氣中的粒子飛到靠近地面的高度，累積在地面，堆積在岩石，灌木叢等迎風面的後面。在開放廣大的沙漠中形成沙丘，單獨存在時則叫做沙。在高處雲中非常小的粒子則叫灰塵。當風速減低後沙塵平緩降落堆積在其他國家。穿過空氣中之砂粒石英球體，依粒徑大小受風力與地心¹³引力影響，有不同沉降速率，Bagnold (1935) 研究石英類小球體之感受性曲線如圖 2-3。

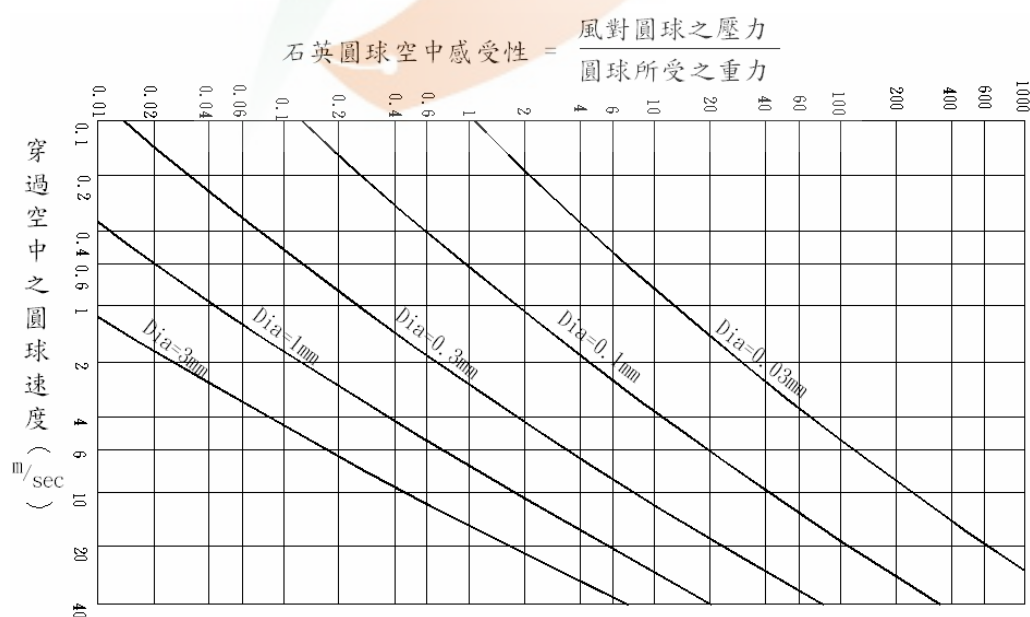


圖 2-3 石英類小球體之感受性曲線（Bagnold, 1935）

沙粒是由堅硬的石頭裂解所形成。分析各種利比亞沙漠中沙丘、大片的沙堆，沙粒尺寸範圍平均約在0.8-0.008 mm 左右，而最大的直徑2 mm，抽樣樣品按重量分級發現，沙組成很少小於到0.04mm 直徑；太細小者已近灰塵，無關沙粒運動，所以已無關緊要。

要注意圖中另一個要點，是小沙粒透過捲揚取得巨大飛行能量。例如：一個0.03 mm 直徑沙粒突然投入氣流中在以15 m/sec 或54 km/hr 速度流動，將是500次它自己的重量的動能。這些極小的灰塵沙粒對他們碰巧被帶到氣流中的運動非常一致。在利比亞沙漠，沙沒有明確的定義灰塵和沙的分野。沙丘中不僅沒被植物，鹽，灰塵，或者水分所污染(極為純淨的沙漠)，觀察沙的飛行與傳播路徑時，作用力只有風和沙的單純交互作用。在(利比亞沙漠)除了強烈風暴之外，移動的沙雲很少超過肩膀，且天空幾乎都是非常晴朗。當沙雲很濃厚時，沙丘的頂端會轉換成另一型態，整個表面從圓形轉變為沉積型態。然而，雲頂依舊在一公尺以內，如同一個飛天毛毯。而風暴之中的沙粒子相當大，經常會被打到臉，而且會打得很痛。一開始好像很容易發現沙子移動以及它是如何沉積的，但其實不容易看清楚，現在運用高速相機攝影，發現一般大小沙粒在風中移動速率約時速30公里。

當平滑的沙粒球體表面透過空氣移動，有兩種力量對它作用：一是重力和向下力量作用，以及空氣中的風阻力，風阻力主要依賴基本的球體的大小和空氣中移動的速率，同時也依賴空氣的狀況，包括空氣的溫度、壓力和濕度。球體表面的風阻力的大小能夠算出相關的沙粒相對移動速率。低層雲中的純淨沙粒上升和維持在空中的作用為何。目前接受的說法是，藉由沙風暴的作用來維持，也就是混亂上升氣流所造成的。當空氣作水平和垂直等量移動時，上升氣流為必要支撐。直徑1 mm 的沙粒的終極速率是每秒7公尺，或每小時25公里，如此強度的向上氣流才能提供沙塵粒子支撐。在地面上1公尺左右存在激烈向上氣流。我們觀察2-70公尺範圍地面上的沙雲，挾著向上氣流的漩渦，會發現這些雲，外觀呈現高層的、連續，但參差不齊，像羽毛般的雲，有一段隔閡。而雲中流動的沙粒，很少超過2公尺以上，大部分距離地面不到1公尺，藉由強風帶著移動，像毛毯般的滑行（Bagnold, 1935）。

2-3-3 灰塵和沙塵暴：逼近的災難—早期的警告

吉布茲（1978）於乾旱的環境雜誌中「灰塵和沙塵暴：逼近的災難—早期的警告」報導，指出灰塵與沙塵暴產生的一些物理過程，資料同時說明風吹沙和沙塵暴的產生過程領域及報告，在許多風洞實驗室研究中已經得到許多的解釋，乾旱大陸土壤沙化及沙的運動物理過程，借助自然界風的力量，在全世界大陸乾旱和半乾旱的區域裡移動，全球乾旱陸地分佈圖（如圖2-4）。當乾旱大陸風力達到一定強度，沙和塵粒就將從地表面開始搬移運動。在風蝕運動過程中有沙塵的運輸態樣和累積態樣等情形發生。在風吹沙和沙塵暴研究項目中，探討可分為兩個重要方面，一是沙塵暴所造成之損害模式？二是土地沙漠化所衍生的諸多問題？

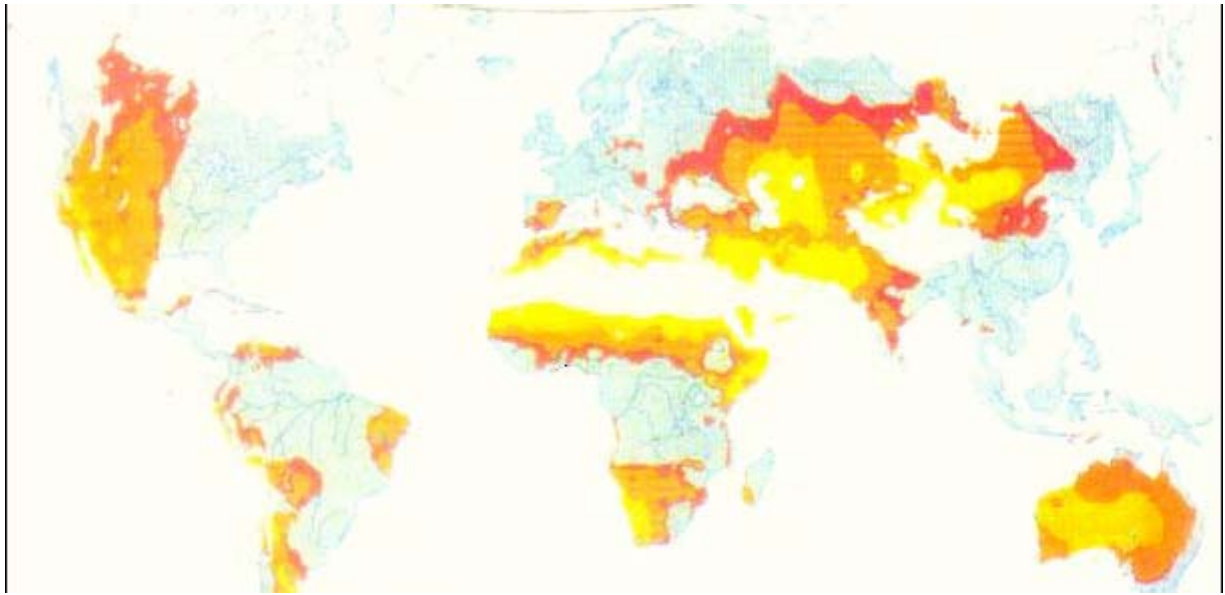


圖 2-4 全球乾旱陸地分佈區塊圖 （吉布茲和馬厄，1978）

在地球乾旱陸地上，乾燥無水的陸地約佔全地球面積超過 40% 的世界地表。在這區域內，有大約 10 億人在此乾旱大地上生存活動。灰塵和沙塵暴就實際層面來說，本身就是一種人類不良的土地管理所產生，在人與土地之間一直交互作用著，又由當地政府不當之政策支配，或是政府人員能力不足，人民強索土地資源，改變了大地與氣候，造成土地風蝕情況加劇，而引發了灰塵或沙塵暴等危害人類生活的災害現象，由乾旱大陸所引發之沙塵可漂洋過海至鄰近國家，舉例如圖 2-5，由紅海上方的灰塵的衛星圖象顯示，圖右邊沙烏地阿拉伯沙漠所引發之沙塵就漂過紅海至鄰近非洲大陸國家，造成鄰近非洲大陸國家嚴重沙塵災害。

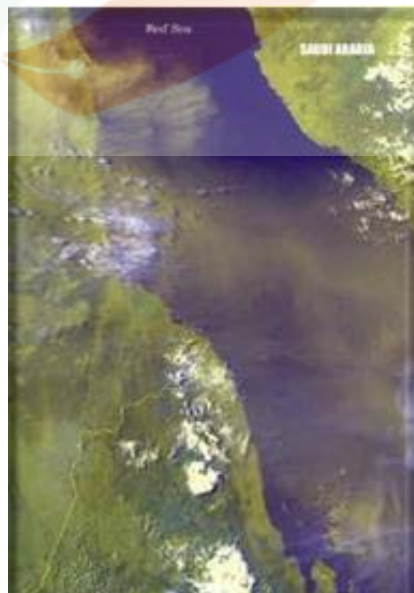


圖 2-5 在紅海上方的灰塵的衛星圖象（圖右邊為沙烏地阿拉伯）
（吉布茲和馬厄，1978）

在傳統土壤分類上，沙在0.6-1 mm 範圍稱為土壤粒子，灰塵一般描述粒子<0.6 mm，實際上那些塵粒低於0.1 mm，可被懸浮傳播到非常遠處，並且已在沙塵暴裡得到證明，如圖2-6示。因此沙塵暴本身是一種土壤的群眾運輸產物，透過風的媒介傳送。塵暴通常是一個乾燥形式，塵粒經常附有礦物質等營養物和有機物，在高空中塵粒並可成為雲及雨水的凝結核。



圖2-6 石英沙 (吉布茲和馬厄, 1978) 食鹽立方體)
 Quartz sand grains compared with cubical crystals of ordinary table salt (NaCl). Left: Angular sand grains from the Algodones Dunes; Middle: Rounded, highly polished sand grains from Sand Mountain, a booming dune; Right: Cubical crystals of ordinary table salt.

0.1 mm 至0.001 mm 等微小灰塵粒子，於強風環流帶動下，視粒徑大小可隨氣流在大氣中懸浮數秒至數年之久，研究資料顯示，0.001 mm 等微小塵粒可在大氣中懸浮長達0.95年至9.5年之久，懸浮高度可達77公里高，如表2-5。

表2-5 在15 m/sec風速時土壤粒子的懸浮運動時間

Particle size (mm)	Period of suspension (time)	Comment/description
0.1	0.3-3.0 seconds	Fine sand
0.01	0.83-8.3 seconds	Dust. Can go up to 700 m high
0.001	0.95-9.5 years	Fine clay can go up to 77 km high

資料來源：吉布茲和馬厄 (1978)

懸浮微粒可透過雨水或者下雪而可能被沈澱到地球表面上。微小塵粒也可能被以6公里的高度運送並且懸浮移動長達6000公里的距離。0.1 mm 塵粒懸浮在高空中，一般能導致能見度的損失，影響交通及飛航安全。在乾旱陸地上如沙漠，風蝕現象也將於陸地表造成風刮表面，如圖2-7，風蝕搬移動現象加劇同時，也造就沙漠中沙丘起伏造山運動，如圖2-8沙丘態樣。

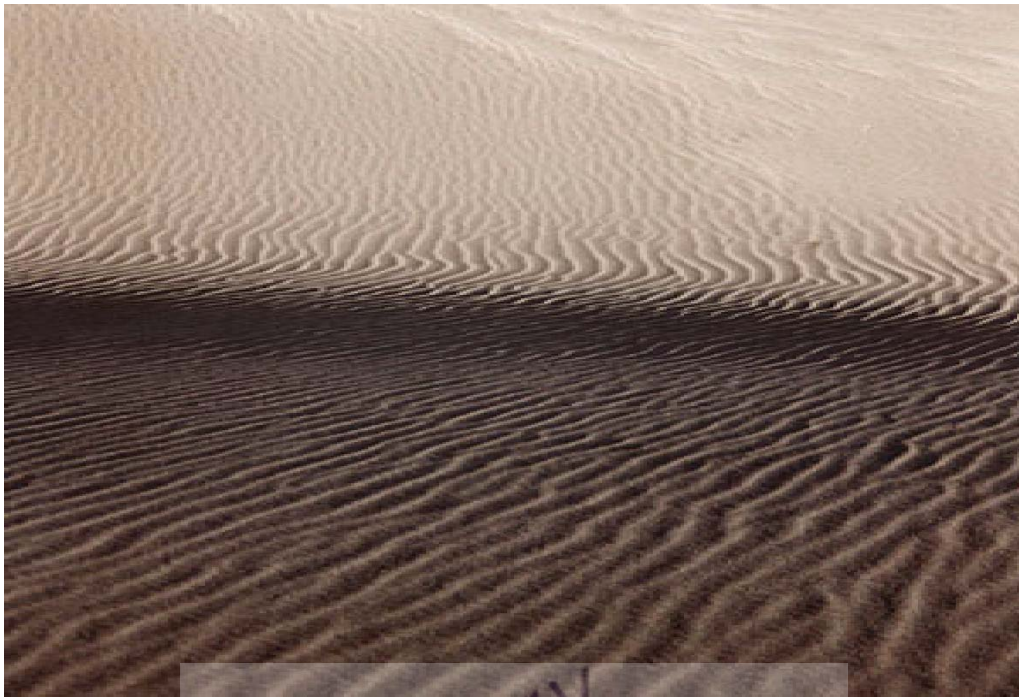


圖2-7 風蝕後留下風刮表面，沉積保留砂和小礫石。（吉布茲和馬厄，1978）



圖2-8 當沙透過風運輸時，沙丘巖然形成（吉布茲和馬厄，1978）

英國牛津大學地質學系的研究結果顯示英國遭受沙塵暴侵襲，從1900年起，發生17起大災難。大約有1000萬公噸沙塵粒子已經被運送並且在一陣沙塵暴期間從撒哈拉大沙漠帶到英

國來。

乾旱氣候被氣象學家定義為低於年平均雨量的十分之一(吉布茲和馬厄, 1978), 在乾燥大陸, 乾旱有相同的頻率在全球氣候地區發生, 發生機率10%。很多人把沙漠化與乾旱聯繫在一起。可以確信土地惡化通常在乾旱期間更迅速的進行。土地沙漠化的真正的原因有: 1. 發生乾旱又在乾旱期間作不適當的土地管理; 2. 未認識及結合正常的氣候變化管理土地; 3. 對土地的固有能力和限制不瞭解; 人類又嚴重地惡化他們的影響力, 但是乾旱是氣候變化的正常組成部分原素, 例如人口增長和成群地移動慣例, 迫使人進入更乾燥和更乾燥的地區作更不適當的土地開墾播種。人口增加使乾旱的影響變得很可能越來越嚴厲。

自然資源土地的惡化對人類直接影響包括: 1. 在沙塵影響範圍內全年家畜飼料減少; 2. 可得到的燃料木頭材料減少; 3. 降低生物的多樣性; 4. 由於地下水位的下降, 取水困難度增加; 5. 生產土地、人類住宅區和基礎設施遭沙塵侵佔; 6. 農業生產力削減。

2-3-4 國外風沙治理研究成果

國外風沙現象研究, 近代從 Bagnold 始, 已超過五十年, 在 1930 年代, 奧布萊恩及林德勞布就曾跟據美國哥倫比亞河口的實測資料, 推得風沙運動的輸沙量, 發現輸沙率與摩擦速度大約有三次方比例的關係。

英國的物理學家 Bagnold (1941) 為近代風沙研究始者, 他首先利用風洞試驗, 觀察沙粒在模擬風速下運動的情形, 並利用力學的觀點描述風沙運動的各種狀態, 其中發現風吹沙的運動現象分為地面滾動、跳躍和懸浮三種方式的運動, 如圖 2-9, 又根據跳躍運動的特性軌跡和動量守恆的原理, 導出風沙的輸沙量。

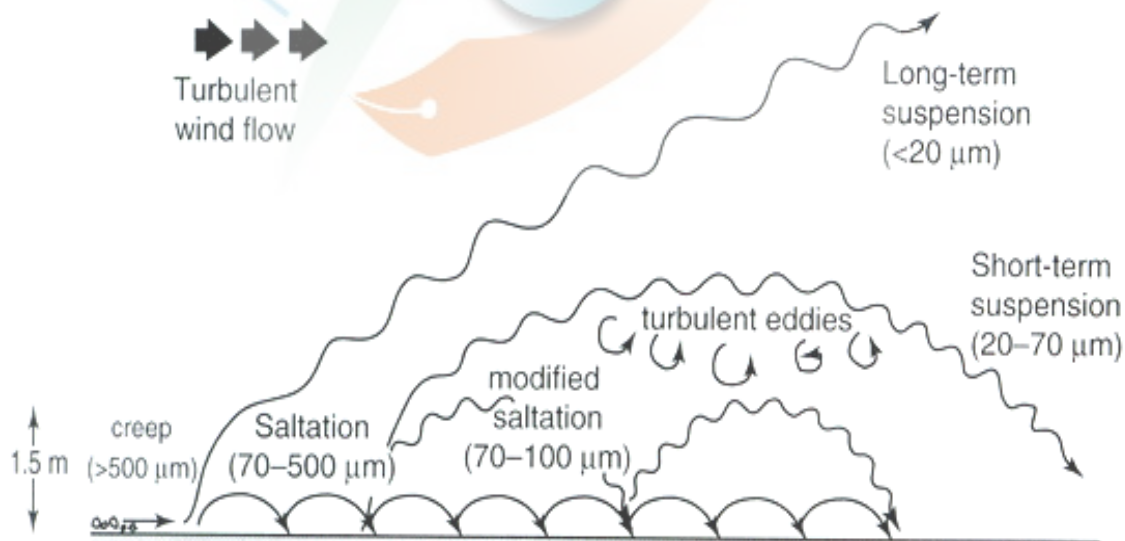


圖 2-9 風吹沙運動型態示意圖 (Bagnold, 1941)

日本學者河村龍馬 (Karamura, 1951) 對風沙運動力學也有相當研究，河村以現場調查和風洞實驗，應用統計方法對輸沙量隨高度分佈及風沙運動位移…等諸多特性加以研究和分析。河村 (Karamura) 認為風沙躍移運動作用在地表剪應力 τ 等於顆粒所造成的磨擦力 T 和起動剪應力 τ_c 之總和，最後也推導出若干輸沙的經驗公式。

S. A. Hsu (1971) 測量風剪力與沙粒運動間的關係，推導出風剪力與灘面的粗度有正比的相關連性。

Y. D. Shuiky (1986) 利用捕沙器在蘇聯黑海、波羅的海、鄂霍次克海三個濱海地區進行研究，發現黑海盛行風由陸地向海邊吹襲，故沙量的堆積不如波羅的海與鄂霍次克海，且在黑海的實驗中發現風速超過 4m/s 時沙粒才會移動。

B. O. Bauer (1991) 分析設在不同地點的補沙器所補得的粒徑，發現較粗的沙粒搬運常限於前丘的前面區域一帶，而較細的沙粒則能被風吹帶到沙丘的後坡，他發現此原因與風的流動能力有密切相關。

2-4 卑南溪河口段風吹沙與國外沙塵暴比較

沙塵暴天氣的必要條件：(1) 大氣環流形勢有利於強風的發生；(2) 強風吹過的區域內，沙源區的土質乾燥疏鬆且植被稀疏；(3) 大氣邊界層處於不穩定狀態。同時滿足上述三項條件，即是沙塵暴的好發區域，與臺東風吹沙前氣候乾旱無雨，河床沙灘地裸露面積增加，沙質表層鬆，加上東北季風或伴隨颱風環流強風等氣象因子相類似。

沙塵暴發生原因諸多，除上述三項要件外包括沙源來源提供、地形條件影響、全球氣候變遷、都市熱島效應作用及人為不當開發等因素。人為開發所造成的土地沙漠化快速擴張，為沙塵暴提供充足的沙源；過度開墾、濫砍林木，區域內河流水量銳減，地下水位也急遽下降，破壞了大面積草原，植被每年以十多萬畝速度遞減，植被退化覆蓋率低、地下水下降、地表水驟減、降雨少蒸發快，與臺東風吹沙懷疑河川上游山林濫墾、濫伐、水土保持不佳、河床礦石開採過度等有相同不當人為開發管制不良情形。

由中央氣象局及大陸氣象定義上述的揚塵標準，在臺東地區所發生的風吹沙揚塵情況，某些程度已可稱為「沙塵暴」。在臺東歷史記載發現風吹沙發生的時間點主要在每年 9 月至隔年 2 月間，強勁東北季風狂襲卑南溪河床所刮起之風吹沙，或颱風來臨前 (每年 5 月~10 月間) 強烈大氣環流侵襲或東北季風與颱風環流共伴所致，此結果與大陸沙塵暴好發於每年 3 月至 5 月間有所差異，但每年 9 月至隔年 2 月間，為臺東地區全年降雨量及相對濕度最低期，容易引發沙塵暴之乾旱條件背景則相類似。大氣邊界層處於不穩定狀態，強大氣流及持續高溫天氣，促使地面輻合上升運動增強，氣壓梯度和溫度梯度明顯增大，加速地面擾動，熱對流旺盛，引起風吹沙或沙塵暴氣候，某種程度有相同氣候條件，惟沙漠區域尚無颱風劇烈氣候共伴效應產生，與臺東風吹沙好發季節常伴隨颱風環流或熱帶低壓氣候等有所不同。

2-5 台灣主要風沙危害區域及治理

台灣風沙危害區域非常普遍，如表 2-6 所示，沙源有來自海沙或溪沙，影響範圍因地而異，可能造成之氣象因素主要為強烈季風或颱風環流所引起，另外發生風吹沙嚴重區域，現地普遍存在有充足的鬆散沙源，並且植被綠覆蓋稀少，可能形成之原因有許多，包括當地山林水土保持不理想、氣候乾燥、及人為不當開發利用等等，所造成之之災害有道路及公墓淤沙、漁港淤積、減少當地親水性及當地觀光事業價值、產生風害及鹽害威脅沿海居民生存空間、飛沙侵入防風林內或淹沒村莊道路及房舍、海岸地帶防風林也逐漸遭砂塵淹沒、風沙嚴重影響農漁業生產及農作物種植、工商業也受風吹沙影響，生意大減，發展困難，年輕人力謀生不易人口外流、居民生活品質也大受影響。當地主要防治作為整理如表 2-7，主要方式有：攔砂籬、防風網、種植防風定砂植物、石滬、引農田排水方式保水定砂、防風柵欄、砂障減低風速、以卵礫石覆蓋砂面並在其間種植匍匐類草種、種植水生植物、噴灑泥漿提高泥質比例等。

表 2-6 台灣主要風沙危害區域

區域	災害位置	砂源	災害情況	可能成因
苗栗苑裡地區	苑裡漁港至苑港漁港間之海灘	海沙	1. 道路及公墓淤沙。 2. 漁港淤積。 3. 行成高大前沙丘。 4. 減少親水性及觀光價值	寬廣潮間帶於東北季風時迅速乾燥形成飛沙。
桃園草漯砂丘	桃園縣觀音鄉的老街溪和大堀溪之間的濱海地區	海沙	1. 道路淤沙。 2. 進而產生風害及鹽害 3. 威脅沿海居民生存空間。	潮間帶沙源豐富，加上東北季風與海岸線呈近 30 度夾角，使沙丘規模擴大。
台中港	北防沙堤北側的淤積灘地漂飛沙整治區 II 區西方的淺灘區	海沙	1. 飛沙侵入防風林內，或淹沒道路、房舍。 2. 風沙飛入港持造成淤塞。	台中港區潮差大，潮汐灘地寬闊，便成陸域飛沙的主要沙源。
濁水溪河口	濁水溪河口兩岸	河沙	1. 海岸地帶防風林逐漸遭風砂淹沒。 2. 影響漁塭、農作物種植、工商業發展及居民生活品質。	濁水溪帶來豐富的沙源，所以沙灘非常發達，遇有強風則飛沙四處飛走，造成本地區嚴重沙害問題。

資料來源：經濟部水利署「苗栗海岸復育研究」

表2-7 台灣主要風沙危害區域與治理方法

區域	災害位置	砂源	治理方案
苗栗苑裡地區	苑裡漁港至苑港漁港間之海灘	海砂	1. 目前為攔砂籬配合防風網定砂，並種植防風定砂植物。 2. 設計以石滬及引農田排水方式保水定砂，部份地區以防風柵欄及砂障減低風速，防治風沙。
桃園草漯砂丘	桃園縣觀音鄉的老街溪和大堀溪之間的濱海地區	海砂	施工設計採攔砂籬定砂，並已形成高大的前砂丘，且砂灘後方種植大量防風林防治。
桃園縣新屋鄉	笨港村南岸堤防	海砂	地方經費拮据有限，簡易設置不能從根本解決問題，目前尚無有效防治計劃。
桃園縣新屋鄉	後湖溪流經諸村落	海砂	計畫在河川入海口處，設置一些塑膠桶阻擋風沙，仍無法發生效果，致使淤積愈加嚴重。 已取得縣府、國有財產局同意堆置於北岸新生地。
台中港	1. 北防砂堤北側的淤積灘地 2. 漂飛砂整治區Ⅱ區西方的淺灘區	海砂	1. 以卵礫石覆蓋砂面，並在其間種植匍匐類草種。 2. 種植水生植物，以增加懸浮質細粒沈積物的聚集。 3. 噴灑泥漿，提高泥質比例。 4. 攔砂籬、防風柵欄及防風林。
彰化縣	彰濱工業區肉粽角	海砂	1. 治本方案計畫徹底解決飛沙來源的方法是恢復肉粽角灘地的樣貌，讓海水重新覆蓋灘地，溼潤的灘地自然不會再吹起風沙。 2. 短期治標方案，預防肉粽角繼續被吹起飛沙的輔助策略，可以將鄰近的牡蠣殼蒐集後壓碎，平均散鋪在肉粽角裸露的沙灘上，使得乾沙不會直接暴露在外，也可以吸引水鳥來此繁殖、棲息。除了利用牡蠣殼碎片之外，還可以在肉粽角沙丘種植馬鞍藤、濱刺麥、海馬齒等耐旱、耐風的海岸植物。馬鞍藤可以散佈生長在肉粽角沙灘上，是定砂最佳的植物
濁水溪河口	濁水溪河口兩岸	河砂	目前主要以防風林加以防風定砂，特定區域(如麥寮工業區)則以防風柵欄防風。
臺東卑南溪河口	河口及臺東市區	河砂	1. 北岸建置防風牆。 2. 高灘地植生。 3. 引河水覆蓋高灘地。

資料來源：經濟部水利署「苗栗海岸復育研究」。

2-6 卑南溪風吹沙環境資料蒐集

2-6-1 氣象

經濟部水利署富岡氣象站鄰近本研究卑南溪河口區域，由經濟部水利署臺東富岡氣象站 97 年度風速資料統計分析（如表 2-8），臺東市全年平均風速約 3.4 m/sec，最大平均風速在 5 月份，達 30 m/sec，應與颱風外圍強烈氣流所造成、全年平均最大風速約在 10-11 m/sec 間，最大陣風同樣於 5 月份發生，達 32.9 m/sec，全年除 6 月至 7 月間吹西南風、及 8-9 月間主要風向東北東風向外，臺東市全年有 8 個月主要風向為東北風。

表 2-8 經濟部水利署富岡氣象站 97 年度風速資料統計表

月份	平均風速(m/sec)	最大平均風速(m/sec)	最大陣風(m/sec)	主要風向
1	3.5	10.5	15.7	NE
2	3.4	11.7	17.1	NE
3	3.4	11.6	17.8	NE
4	3.3	12.4	19.6	NE
5	3.2	30.0	32.9	NE
6	3.2	10.4	14.7	SW
7	2.3	7.6	10.9	SW
8	2.7	8.3	12.4	ENE
9	2.9	10.6	15.5	ENE
10	4.0	12.3	17.8	NE
11	3.8	11.2	16.9	NE
12	3.7	11.2	17.0	NE
平均	3.4	30.0	32.9	NE

卑南溪河口段鄰近經濟部水利署臺東富岡氣象站，依據該站97年度各月份之風速、風向監測資料，統計繪製臺東市富岡里鄰近區域全年之各月份風速風向風發圖，如圖2-10所示，分析本研究範圍之臺東市卑南溪河口段鄰近範圍，全年主要強勢風向為東北風，西南風及西北風均占較少數。

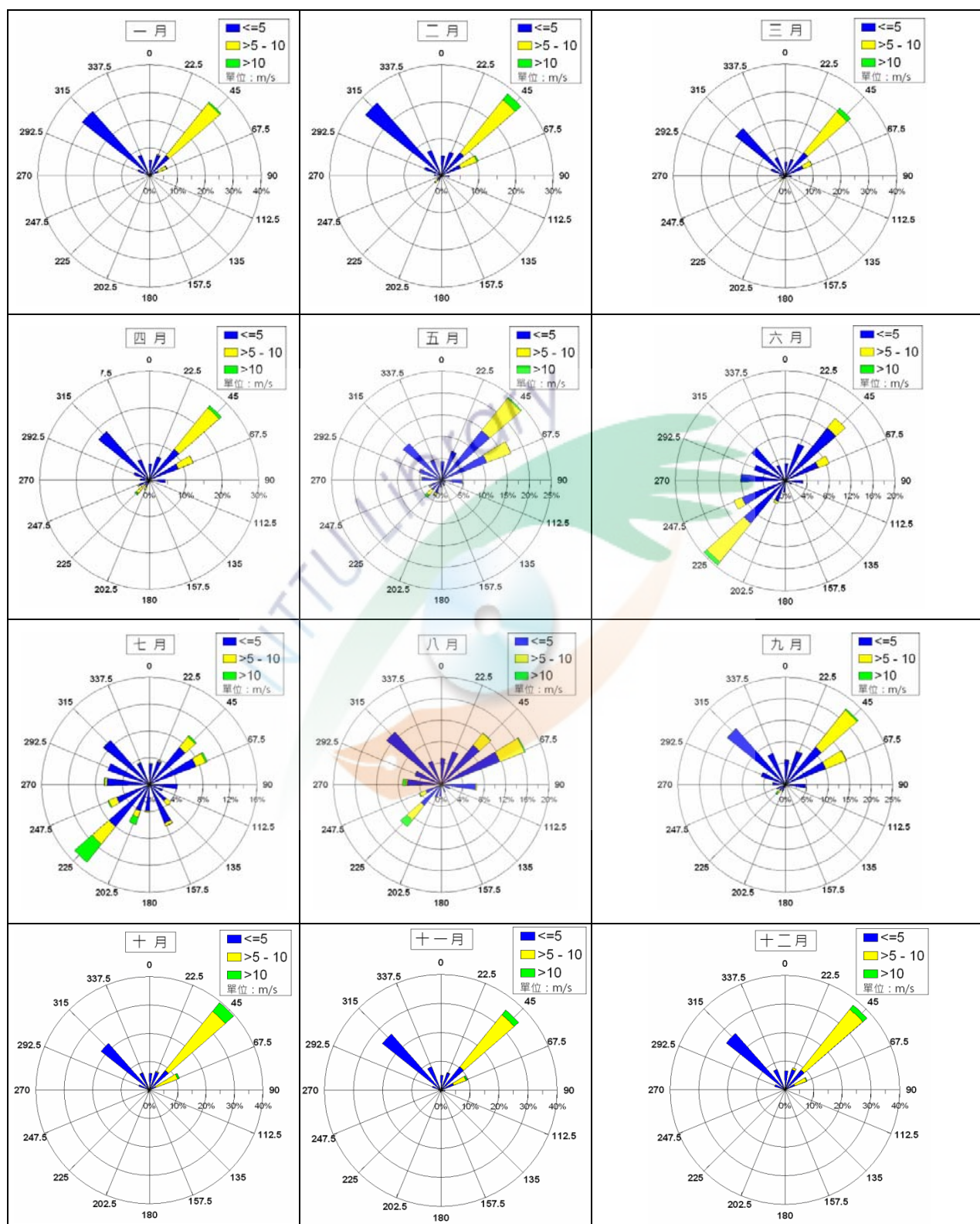


圖 2-10 經濟部水利署臺東富岡氣象站各月份風速風向分佈風發圖

中央氣象局臺東氣象站位於臺東市都會中心，鄰近卑南溪河口段，依據臺東氣象站 1993 年至 2008 年風速、風向、雨量、氣溫及相對濕度監測資料分析如表 2-9 及表 2-10 所示，全年平均風速約 3.2m/sec，主要風向為北北東風，全年降雨量為 1856mm、平均氣溫 24.3 度、相對濕度 75%。

表2-9 中央氣象局臺東氣象站1993—2008年風速風向分析表

月份	平均風速(m/sec)	最大平均風速(m/sec)	最大陣風(m/sec)	主要風向
1	3.8	10.3	21.1	NNE
2	2.6	10.5	19.3	NNE
3	3.2	12.0	20.5	NNE
4	2.9	13.9	24.6	NNE
5	2.6	12.0	23.7	NNE
6	2.3	10.2	23.9	NNW
7	2.5	30.0	60.1	NNW
8	2.5	26.0	78.4	NNW
9	3.1	21.0	31.9	NNE
10	4.1	18.7	32.0	NNE
11	4.2	10.3	23.7	NNE
12	4.2	21.0	22.9	NNE
平均	3.2	16.3	22.9	NNE

資料來源：中央氣象局臺東氣象站

表 2-10 中央氣象局臺東氣象站 97 年度降雨、氣溫與相對濕度資料統計表

項目	降雨量	降雨日數	平均氣溫	最高氣溫	最低氣溫	相對濕度
單位	毫米	天	攝氏度	攝氏度	攝氏度	百分比
1 月	43.2	10	19.2	22.9	16.5	73
2 月	47.5	11	19.6	23.2	16.9	75
3 月	43.1	10	21.7	25.2	18.8	75
4 月	73.8	12	24.0	27.6	21.1	77
5 月	156.9	15	26.0	29.5	23.2	79
6 月	247.8	13	27.7	31.1	24.9	79
7 月	280.5	10	28.7	32.1	25.7	77
8 月	308.2	12	28.4	31.9	25.5	78
9 月	299.4	14	27.3	30.9	24.5	77
10 月	236.0	11	25.6	29.2	22.9	74
11 月	78.0	9	23.0	26.5	20.4	72
12 月	41.7	8	20.4	23.9	17.7	71
合計	1856.1	135	24.3	27.8	21.5	75

資料來源：中央氣象局臺東氣象站

由中央氣象局臺東氣象站97年度風速風向繪製之風發圖（如圖2-11）分析，臺東市全年平均風速約3.2 m/sec，最大平均風速在7月份，達30 m/sec（研判應為颱風環流所造成）、全年平均最大風速約落在10-11 m/sec 間，最大陣風發生於8月份，達78.4 m/sec，全年除6—8月間吹北北西風，全年有9個月主要風向為北北東風。

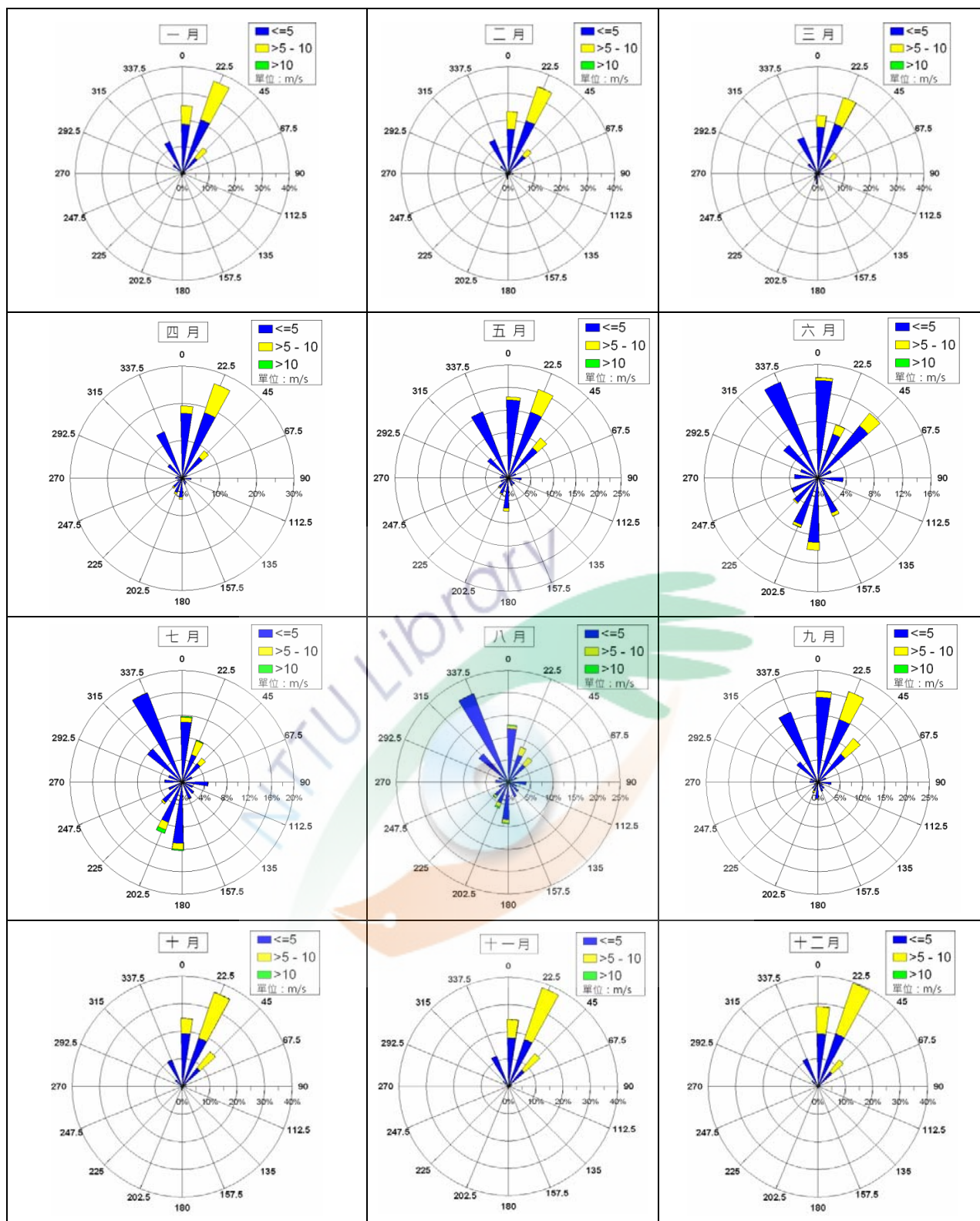


圖 2-11 中央氣象局臺東氣象站各月份風速風向分佈風發圖

2-6-2 河川水文

卑南溪水文動態變化，影響卑南溪河口段裸露沙灘地面積增減數量、河床水位高低亦影響沙灘地含水量之變化，進而影響卑南溪河口段風吹沙起動條件及分佈範圍，由經濟部水利

署第八河川局臺東大橋水文觀測站資料彙整分析如表 2-11，全年平均水位為 21.35 公尺。

表 2-11 97 年卑南溪河口段日平均水位（單位：公尺）

月 日	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月
1	23.64	23.36	23.01	23.01	23.01	22.94	20.59	20.14	20.67	20.71	19.54	20.56
2	23.63	23.36	23.01	23.01	23.01	22.92	20.49	20.02	20.57	20.52	19.49	20.4
3	23.59	23.36	23.01	23.05	23.01	22.92	20.41	19.98	20.49	20.4	19.43	20.29
4	23.58	23.38	23.01	23.16	23.01	22.93	20.3	20.21	20.39	20.31	19.42	20.21
5	23.56	23.37	23.01	23.17	23.01	22.97	20.26	20.13	20.37	20.29	19.46	20.12
6	23.56	23.37	23.01	23.17	23.01	22.96	20.21	20.02	20.27	20.55	19.55	20.04
7	23.56	23.37	23.04	23.18	23.01	22.98	20.18	20.14	20.31	23.6	19.59	19.97
8	23.55	23.36	23.09	23.18	23.01	22.99	20.14	22.68	20.33	22.26	19.51	19.91
9	23.54	23.37	23.14	23.27	23.01	23.34	20.12	22.76	20.37	21.39	19.49	19.87
10	23.53	23.37	23.12	23.26	23.01	23.17	20.07	22.3	20.33	21.04	19.49	19.85
11	23.51	23.36	23.1	23.25	23.01	23.11	19.96	22.05	20.23	20.78	19.46	19.8
12	23.49	23.35	23.08	23.25	23.01	23.08	19.89	22.09	20.17	20.84	19.43	19.76
13	23.47	23.28	23.05	23.05	23.01	23.1	19.86	23.08	20.11	20.67	19.39	19.73
14	23.45	23.1	23.03	23	23.01	23.06	19.84	22.89	20.02	20.5	19.39	19.7
15	23.42	23.07	23.01	23.01	23.01	23.04	19.84	22.5	19.87	20.4	19.38	19.69
16	23.41	23.06	23	23.01	23.01	23	19.85	22.19	19.84	20.3	19.37	19.69
17	23.42	23.07	23.02	23.02	23	22.95	19.85	21.98	19.8	20.22	19.36	19.68
18	23.39	23.07	23.01	23.3	23.01	22.98	19.84	23.75	19.79	20.14	19.36	19.69
19	23.42	23.07	23	23.68	23.05	23.07	19.85	23.89	20.22	20.05	19.36	19.68
20	23.46	23.07	23.01	23.53	23.42	23.04	19.84	22.99	20.15	19.99	19.36	19.66
21	23.44	23.07	23	23.47	23.53	23.02	19.83	22.58	20.13	19.94	19.36	19.66
22	23.42	23.07	23	23.46	23.32	22.95	19.83	22.11	20.93	19.89	19.36	19.64
23	23.4	23.09	23	23.34	23.12	22.93	19.83	21.86	23.93	19.83	19.35	19.63
24	23.4	23.12	23	23.17	22.86	22.92	19.83	21.7	23.46	19.79	19.33	19.63
25	23.39	23.06	23.01	23.08	22.83	22.88	19.83	21.65	23.35	19.81	19.34	19.61
26	23.39	23.04	23.01	23.05	22.89	22.82	19.83	21.75	22.26	19.73	21.34	19.56
27	23.37	23.05	23	23.02	22.98	22.76	19.83	21.67	21.51	19.68	23.03	19.54
28	23.42	23.04	23	23.02	22.93	22.76	19.84	21.73	21.31	19.61	21.7	19.53
29	23.42		23	23.02	22.9	22.76	19.95	21.35	21.01	19.56	21.09	19.52
30	23.4		23.01	23.01	22.95	22.76	20.28	20.85	20.86	19.55	20.73	19.51
31	23.38		23		22.88		20.08	20.74		19.55		19.5
月合計	727.61	649.71	713.79	695.2	713.83	689.11	620.35	673.78	623.05	631.9	593.46	613.63
月平均	23.47	20.96	23.03	22.43	23.03	22.23	20.01	21.73	20.1	20.38	19.14	19.79

資料來源：水利署第八河川局

2-6-3 河灘地質及變遷

卑南溪流域地質組成與卑南溪河口段風沙源有相當密切關係，依卑南溪及其支流流經地

層及其組成特徵如圖 2-12，資料顯示卑南溪上游段流經中央山脈畢祿山層(良好的板岩和灰色石英砂岩)及大南澳片岩(變質片岩地層)等岩石區域，卑南溪中下游段則流經利吉斷層帶，該斷層係由巨厚泥岩所組成，地質乾旱鬆散，水土保持不易，土壤沖刷嚴重，常為河口段帶來豐富的懸浮泥質沈積物材料；這些泥岩層所產出的泥質沈積物在夏季洪水期高水位時被帶至卑南溪河口地區，漂浮在河床高低灘地上，並隨著洪水的消退而慢慢堆積下來，當水量逐漸消退、水位下降至一般正常水位時，這些在高灘地上的河床泥質微粒逐漸乾枯裸露，鬆散泥質微粒可能常成為冬季枯水期期間東北季風或夏秋季間颱風環流影響，造成臺東市區風吹沙的沙塵主要來源之一。

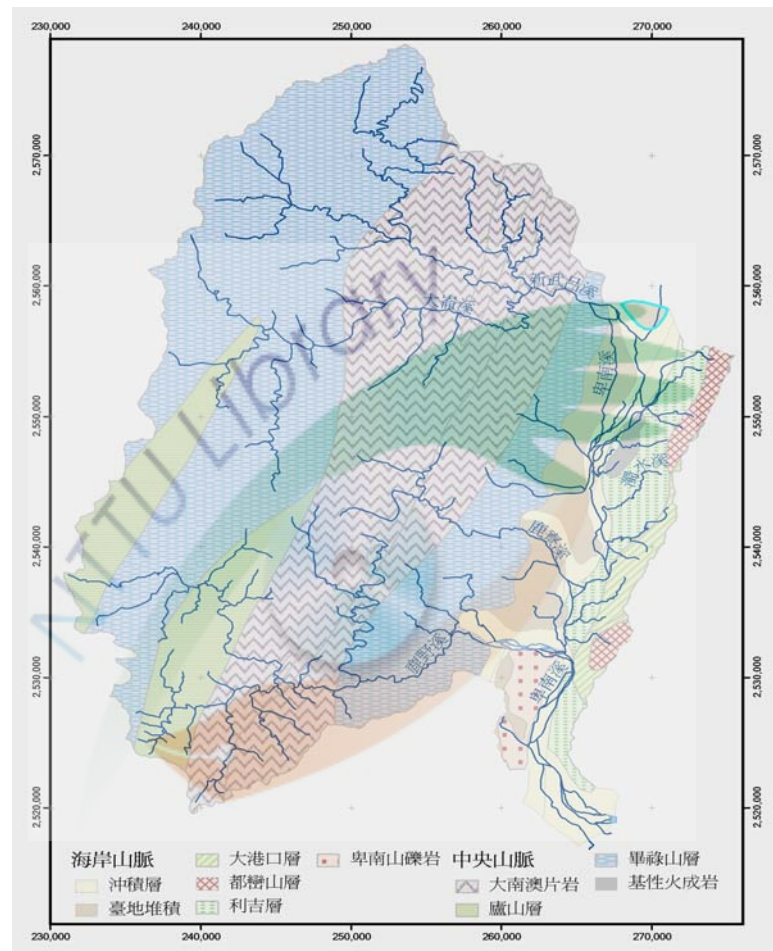


圖 2-12 卑南溪流域地層組成圖（摘自水利署卑南溪規劃報告 2006）

卑南溪河口段風吹沙之沙源與河口段河床砂塵粒徑、細度、含水量、含泥量等關係密切，由經濟部水利署第八河川局 2008 年 3 月河床砂質微粒採樣調查資料，分析顯示河口段裸露地砂泥含量差異懸殊，高灘地之砂質含 99%之中砂，低灘地則為含泥量達 50%之細砂，兩者飽和時的含水量相差不大，可能與砂質不易保持水份有關，砂質含量高者，含水量較低，含泥質較高者，因土粒電荷、凝聚力及毛細管現象，含水量較高。

卑南溪河口段河床底採樣粒徑資料分析，顯示河床底中值粒徑 D50 由利吉大橋往中華大橋呈遞增趨勢分佈，含泥量百分比則有往上游有遞增趨勢，可能與卑南溪流經利吉斷層巨厚泥岩區，上游冲刷大量泥塵浮游淤積沙灘地有關。

卑南溪河口段砂、泥質礦物成份，由經濟部水利署第八河川局 2008 年 3 月河床採樣結果，資料分析顯示河口段砂質礦物成分組成，最主要為板岩屑，平均約佔 53%比例、次要組成分為石英，平均約佔 37%，再其次為粉砂岩屑和方解石等。泥質成分中的主要成分是伊萊石，平均約佔 61%比例，其次是綠泥石平均約佔 27%，再其次是石英和長石等；其中伊萊石和綠泥石主要是化學風化的產物。由河床質礦物組成分調查資料，卑南溪河口段河床砂質及泥質礦物組成，最主要為板岩屑，由資料分析介於 9~50%，平均約 31%、次要成分是石英，平均約 26%，再其次是粉砂岩屑和伊來石、綠泥石，其餘的成分則均屬少量。

卑南溪流域屬成長型荒溪河道，洪水流路變化不穩定，卑南溪河口段裸露沙灘地位置也常因洪水冲刷產生極大變化。雨季及颱風洪水發生時，洪水能即時疏導宣洩，但原有河道隨即成乾竭狀態，也使河床裸露沙灘地裸露面積產生變化，民國 18 年至 89 年卑南溪流路變化如圖 2-13、圖 2-14。。加上台灣地區為颱風經常侵襲地帶，卑南溪上游段水土保持不佳，山坡地崩塌帶來大量沙塵礫石流入河床中，隨洪峯水流挾帶沖擊至卑南溪河口段，常會改變河床沙灘地淤積位置，甚至將河口段沙灘地被植物沖走或帶來大量泥沙將河口段地被植物覆蓋，改變河口段生態，使河口段沙灘地經常無法穩定固結保護，避免風蝕侵襲，為卑南溪河口段易引起風吹沙現象原因之一。

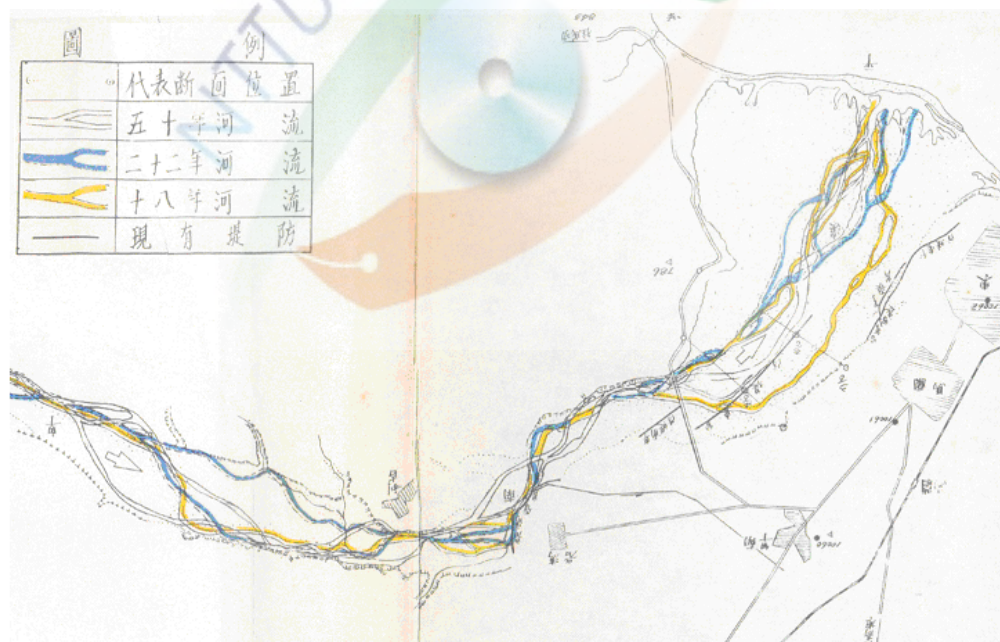


圖 2-13 卑南溪民國 18 年、22 年、50 年流路圖

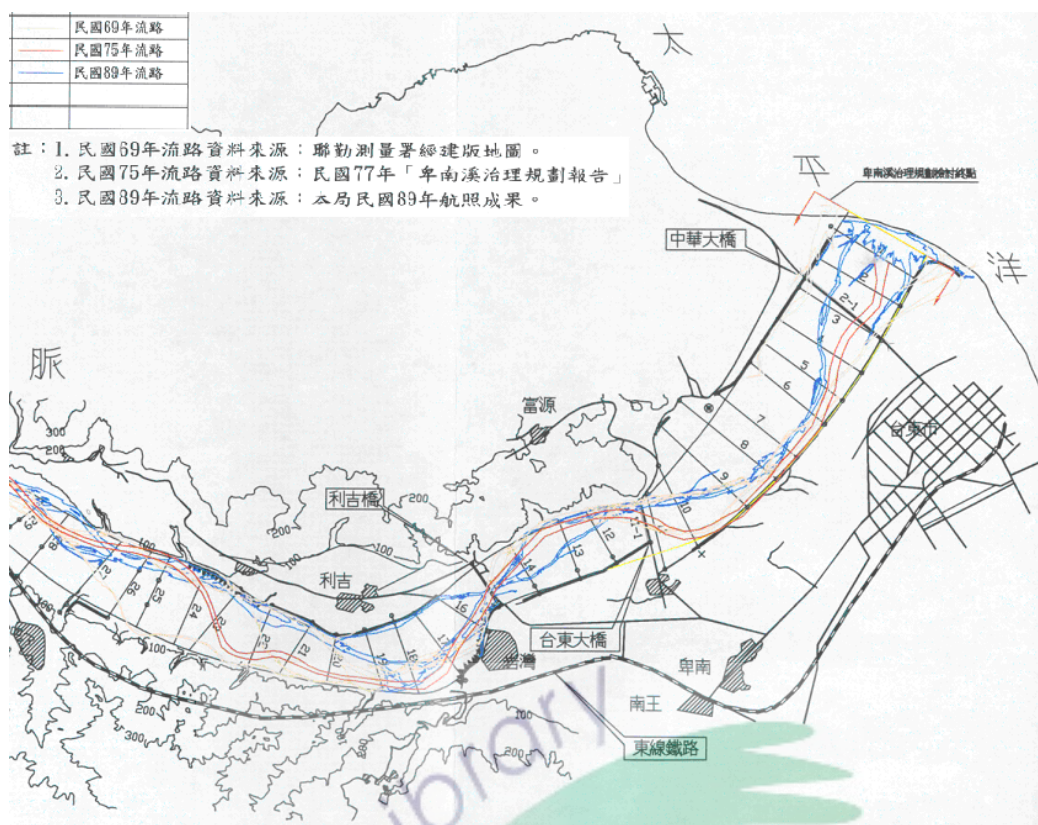


圖 2-14 卑南溪民國 69 年、75 年、89 年流路圖
(水利署卑南溪治理規劃報告 2006)

2-6-4 河灘地風沙起動風速

卑南溪河口段風吹沙天氣主要影響是風，風所造成的氣體動力流是河灘地鬆散沙粒開始移動的主要原動力，當風的剪應力大於沙粒本身的重力、摩擦力和凝聚力的總合時，沙粒即產生運動，摩擦風速計算公式如下：

$$U_* = C \sqrt{\frac{(\rho_s - \rho_a) \times g \times d}{\rho_a}}$$

式中 U_* 為摩擦風速(cm/sec)， ρ_s 為粒子密度(石英沙粒為 2.65g/cm^3)， ρ_a 為流體密度(空氣為 $1.22 \times 10^{-3}\text{g/cm}^3$)， g 為重力加速度(980cm/sec^2)， d 為平均粒徑(mm)， C 為常數(粒徑超過 0.2mm 的係數，在大氣中的數值=0.1)

卑南溪河口段各次風沙調查摩擦風速估算如表 2-12：

表2-12 各次風沙調查摩擦風速(U_*)估算結果表

日期	觀測時間		U_{10} (m/sec)	D_{50} (mm)	Z_0 (mm)	U_* (m/sec)
	開始	結束				
2007/10/4	16:01	16:10	18.8	0.261	0.025	0.582
	16:11	16:20	19.1	0.261	0.025	0.592
	16:21	16:30	18.4	0.261	0.025	0.569
	16:31	16:40	17.9	0.261	0.025	0.555
	16:41	16:50	17.8	0.261	0.025	0.553
	16:51	17:00	17.8	0.261	0.025	0.552
2007/11/19	14:20	16:30	12.0	0.284	0.027	0.376
2007/11/20	14:30	15:20	16.6	0.284	0.027	0.518
	15:30	16:30	15.9	0.284	0.027	0.498
2007/11/21	14:30	16:40	12.4	0.284	0.027	0.386
2007/11/22	15:10	17:10	12.7	0.284	0.027	0.397
2008/3/14	10:20	12:20	8.4	0.453	0.044	0.271
	13:30	17:10	12.4	0.453	0.044	0.402
2008/5/5	13:50	14:50	15.6	0.316	0.031	0.492
	15:10	16:10	15.2	0.316	0.031	0.479
2008/5/10	12:50	14:50	12.1	0.241	0.022	0.372

資料來源:水利署第八河川局

卑南溪河口段各次風沙調查飛沙揚塵總量及摩擦風速估算、飛砂揚塵總量、摩擦風速與河床表面含水量如表 2-13、表 2-14、圖 2-17，彙整各次風沙調查資料研究顯示，卑南溪河口段河床飛沙揚塵造成臺東市區懸浮微粒總量與河床表面含水量間之關係不明顯，如表 2-13 顯示各次風沙調查期間之河床表面含水量均大於 2%，有 7.8% 左右，但其單位時間寬度飛沙揚塵總量最高高達 0.93 g/cm/sec、最低則為 0.02 g/cm/sec，如表 2-14，分析原因可能是分析資料樣本不足所致，同時圖 2-13 顯示卑南溪河口段飛沙揚塵總量與河口段摩擦風速間有相當正比關係，河口段飛沙揚塵懸浮微粒濃度除了與河床表面含水量因子外，摩擦風速等氣象因子為十分重要之影響因素，顯示摩擦風速大於 0.27m/sec 時河床砂粒有起動現象。

表2-13 各季風沙調查飛沙揚塵總量、摩擦風速與河床表面含水量表

日期	觀測時間		單位時間寬度 飛砂總量估算 (g/cm /sec)	U_* (m/sec)	河床含水量 (%)
	開始	結束			
2007/11/19	14:20	16:30	0.0185	0.376	7.8
2007/11/20	14:30	15:20	0.9295	0.518	7.8
	15:30	16:30	0.4296	0.498	7.8
2007/11/21	14:30	16:40	0.0469	0.386	7.8
2007/11/22	15:10	17:10	0.0523	0.397	7.8
2008/3/14	10:20	12:20	0.0001	0.271	2.7
	13:30	17:10	0.0074	0.402	2.7
2008/5/5	13:50	14:50	0.3877	0.492	5.4
	15:10	16:10	0.4152	0.479	5.4
2008/5/10	12:50	14:50	0.0210	0.372	2.9

資料來源：經濟部水利署第八河川局

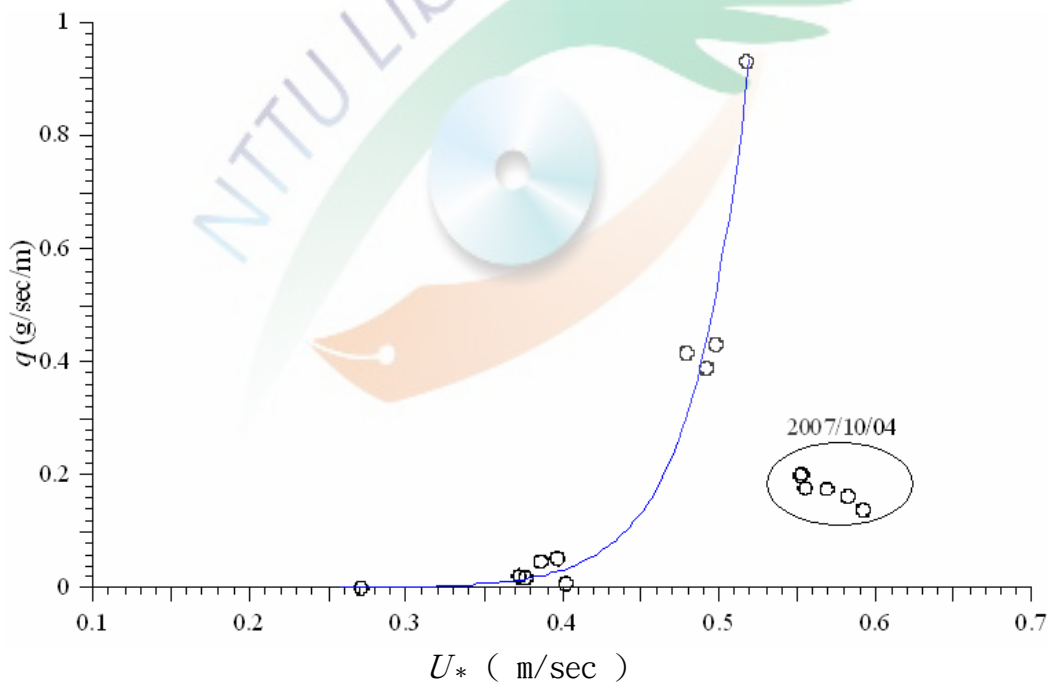


圖2-15 各次風沙調查飛沙揚塵總量與摩擦風速關係圖

各次風沙調查之飛砂揚塵剖面資料，整理分析各層飛砂揚塵量與高度關係如表2-14，經由回歸飛砂揚塵量與高度關係，再回歸推算各次風沙調查之單位時間寬度飛砂揚塵總量，提供卑南溪飛砂揚塵啟動關係分析參考，各次風沙調查之飛砂揚塵量與高度關係式、 R^2 值與單位時間寬度飛砂揚塵總量估算結果，回歸分析值，平均值達0.85以上。

表2-14 各次風沙調查飛沙揚塵量與高度關係和總量估算結果表

日期	觀測時間		飛砂量與高度關係式	R^2	單位時間寬度飛砂總量估算 (g/cm /sec)
	開始	結束			
2007/10/4	16:01	16:10	$q' = 18.49 \times \exp(-1.08 \times h)$	0.93	0.1617
	16:11	16:20	$q' = 12.84 \times \exp(-0.88 \times h)$	0.92	0.1374
	16:21	16:30	$q' = 13.39 \times \exp(-0.72 \times h)$	0.95	0.1741
	16:31	16:40	$q' = 18.03 \times \exp(-0.97 \times h)$	0.86	0.1764
	16:41	16:50	$q' = 14.42 \times \exp(-0.67 \times h)$	0.81	0.2015
	16:51	17:00	$q' = 13.43 \times \exp(-0.63 \times h)$	0.94	0.1989
2007/11/19	14:20	16:30	$q' = 6.23 \times \exp(-2.91 \times h)$	0.70	0.0185
2007/11/20	14:30	15:20	$q' = 627.27 \times \exp(-5.52 \times h)$	0.96	0.9295
	15:30	16:30	$q' = 206.38 \times \exp(-4.79 \times h)$	0.94	0.4296
2007/11/21	14:30	16:40	$q' = 27.45 \times \exp(-4.66 \times h)$	0.81	0.0469
2007/11/22	15:10	17:10	$q' = 32.89 \times \exp(-4.94 \times h)$	0.84	0.0523
2008/3/14	10:20	12:20	$q' = 0.01 \times \exp(-0.61 \times h)$	0.67	0.0001
	13:30	17:10	$q' = 4.11 \times \exp(-4.46 \times h)$	0.80	0.0074
2008/5/5	13:50	14:50	$q' = 138.11 \times \exp(-3.06 \times h)$	0.88	0.3877
	15:10	16:10	$q' = 138.13 \times \exp(-2.89 \times h)$	0.86	0.4152
2008/5/10	12:50	14:50	$q' = 5.07 \times \exp(-2.17 \times h)$	0.76	0.0210

資料來源：經濟部水利署第八河川局

2-6-5 臺東市區空氣品質

卑南溪河口段風吹沙影響空氣品質範圍，由水利署第八河川局 2007 年 10 月 4 日針對卑南溪鄰近區域仁愛國小等 10 處落塵蒐集站落塵量調查，臺東市區落塵收集結果如表 2-15，以復興國小鄰近區域之落塵量 1.148g 為最高。

表2-15 臺東市區2007年10月4日定點落塵調查結果

收集點	集塵器佈置時間				落塵量 (g)	平均落塵率 (μ g/hr)
	開始		結束			
	日期	時間	日期	時間		
仁愛國小	10/04	07:20	10/04	20:00	0.343	27093.21
第八河川局	10/04	11:47	10/04	18:30	0.444	66169.90
復興國小	10/04	07:20	10/04	17:40	1.148	111132.62
東海國中	10/04	10:58	10/04	19:30	0.070	8206.33
臺東女中	10/04	10:10	10/04	18:50	0.075	8660.51
臺東高商	10/04	09:45	10/05	15:10	0.160	5440.33
豐榮國小	10/04	06:40	10/04	18:00	0.036	3177.41
新生國小	10/04	08:05	10/05	07:30	0.044	1878.74
公東高工	10/04	08:35	10/05	08:00	0.028	1195.56
馬蘭國小	10/04	09:05	10/05	08:28	0.010	446.63

資料來源：經濟部水利署第八河川局

同期間臺東縣環保局設置於臺東縣政府監測站空氣品質監測資料，顯示空氣品質低劣時吹東北風，下午15時懸浮微粒濃度 PM_{10} 值最高達 $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，如圖2-16。

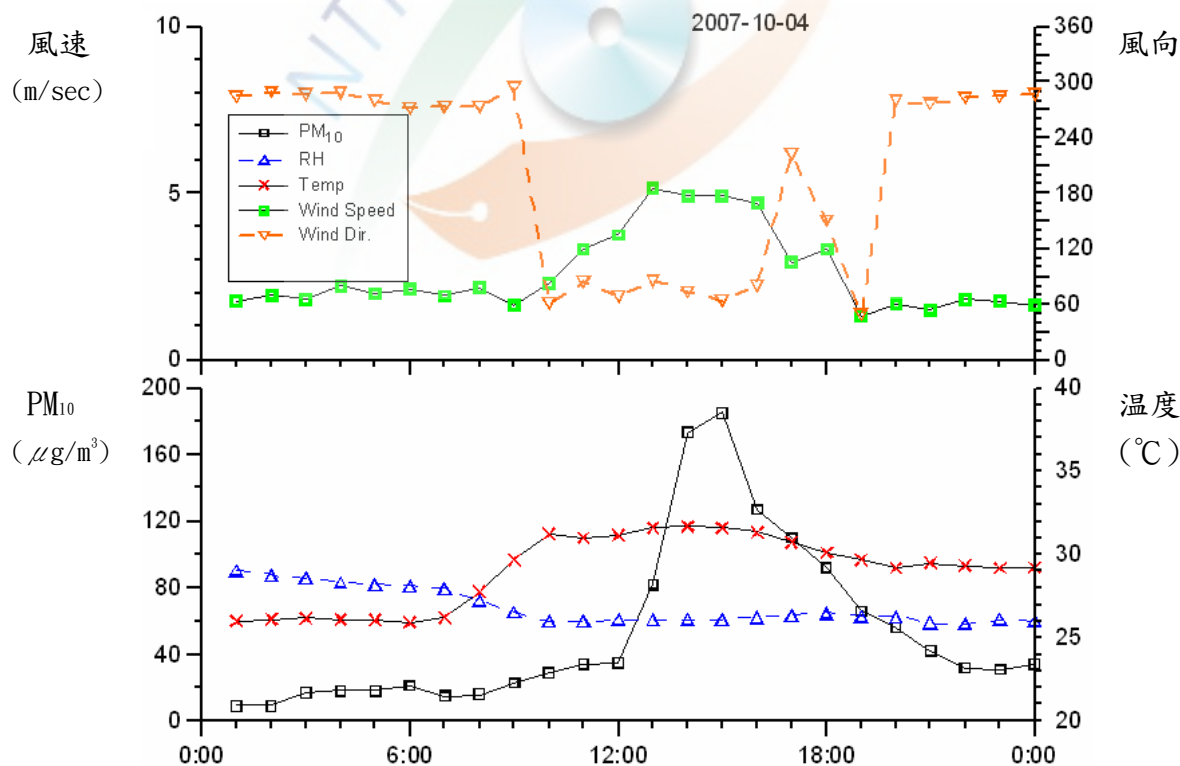


圖2-16 2007年10月4日臺東縣環保局空氣品質監測資料

臺東市區空氣品質監測，2007 年 11 月 19 日由卑南溪鄰近區域仁愛國小等 9 處落塵蒐集站落塵監測，卑南溪河口段風吹沙影響臺東市區落塵收集結果如表 2-16，以東海國中鄰近區域之落塵量 0.067g 為最高，其次為仁愛國小週邊區域。

表2-16 臺東市區2007年11月19日定點落塵調查結果

收集點	集塵器佈置時間				落塵量 (g)	平均落塵率 ($\mu\text{g/hr}$)
	開始		結束			
	日期	時間	日期	時間		
仁愛國小	11/19	09:25	11/20	09:30	0.026	1079.59
第八河川局	11/19	12:02	11/20	12:50	0.017	685.48
復興國小	11/19	11:15	11/20	11:40	0.010	409.56
東海國中	11/19	11:30	11/20	11:55	0.067	2762.89
臺東女中	11/19	09:50	11/20	10:10	0.011	452.06
豐榮國小	11/19	11:45	11/20	12:10	0.008	327.65
新生國小	11/19	10:18	11/20	10:30	0.006	247.93
公東高工	11/19	10:30	11/20	10:45	0.004	164.95
馬蘭國小	11/19	10:45	11/20	11:20	0.002	81.36

資料來源:水利署第八河川局

同期間臺東縣環保局設置於臺東縣政府監測站空氣品質監測資料，顯示空氣品質低劣時吹東北風，下午13時懸浮微粒濃度 PM_{10} 值最高達 $90 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，如圖2-17。

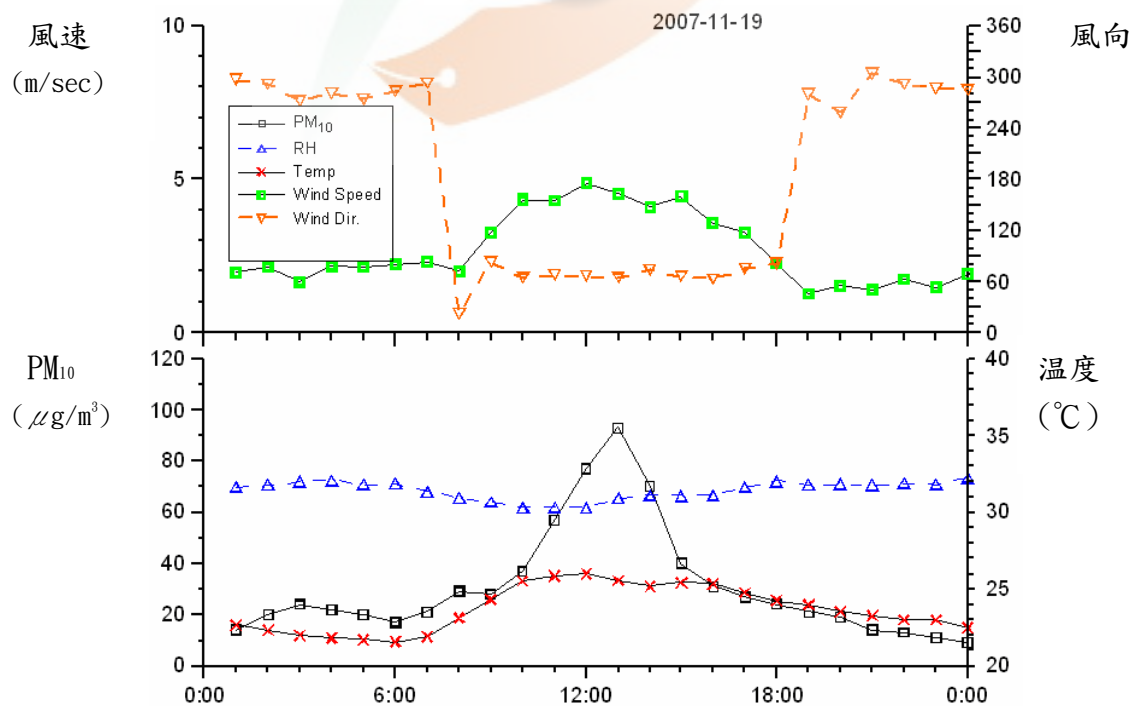


圖2-17 2007年11月19日臺東縣環保局空氣品質監測資料

臺東市區空氣品質監造，2008 年 5 月 5 日由卑南溪鄰近區域仁愛國小等 9 處落塵蒐集站落塵監測，卑南溪河口段風吹沙影響臺東市區落塵收集結果如表 2-17，以第八河川局鄰近區域之落塵量 0.031g 為最高，向臺東市區內擴散後遞減。

表 2-17 臺東市區 2008 年 5 月 5 日定點落塵調查結果

收集點	集塵器佈置時間				落塵量 (g)	平均落塵率 ($\mu\text{g/hr}$)
	開始		結束			
	日期	時間	日期	時間		
仁愛國小	05/05	10:00	05/06	08:30	0.005	222.22
第八河川局	05/05	11:45	05/06	10:30	0.031	1362.64
復興國小	05/05	11:12	05/06	09:33	0.004	178.97
東海國中	05/05	11:22	05/06	09:55	0.001	44.35
臺東女中	05/05	10:15	05/06	08:40	0.001	44.61
豐榮國小	05/05	11:35	05/06	10:15	0.001	44.12
新生國小	05/05	10:25	05/06	08:54	0.007	311.34
公東高工	05/05	10:38	05/06	09:10	0.001	44.38
馬蘭國小	05/05	10:56	05/06	09:20	0.001	44.64

資料來源：水利署第八河川局

同期間臺東縣環保局設置於臺東縣政府監測站空氣品質監測資料，顯示空氣品質低劣時吹東北風，下午13－14時懸浮微粒濃度 PM_{10} 值最高達 $95 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，如圖2-18。

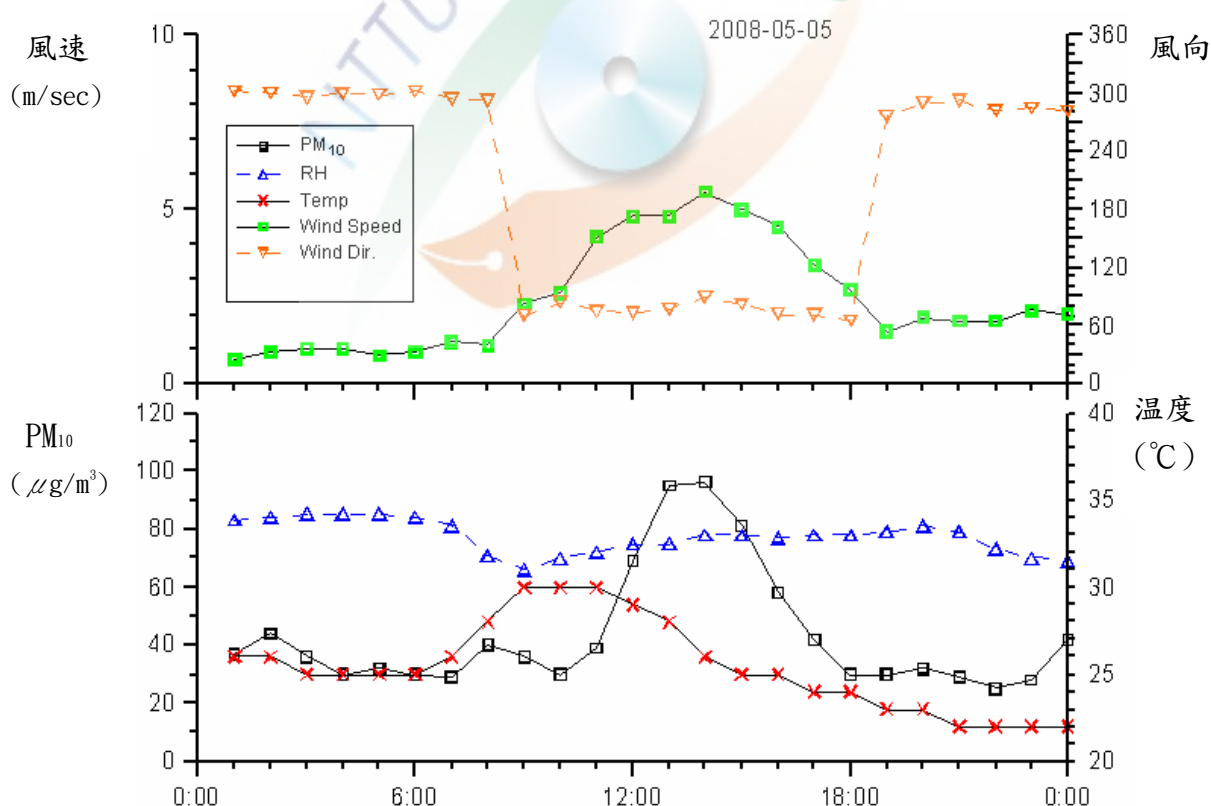


圖2-18 2008年5月5日臺東縣環保局空氣品質監測資料

臺東縣環保局空氣品質監測資料顯示，臺東市懸浮微粒值濃度高時，同期間風速有明顯增強趨勢，懸浮微粒濃度一般隨風速增強而逐漸升高，且普遍吹沙風向為東北方，發生時間在中午至下午 15 時間，懸浮微粒濃度值達到最高，之後懸浮微粒濃度隨風速減低而逐漸下降。

由經濟部水利署第八河川局臺東市區各定點落塵粒徑調查資料，研究分析臺東市區懸浮微粒落塵 D50 中值粒徑除了馬蘭國小週邊區域較大外，其餘各定點落塵懸浮微粒中值粒徑均在 0.1mm 以下之細微塵粒，含泥量調查百分比一般均在 50%以上，如表 2-18。

表 2-18 臺東市區各定點落塵粒徑分析

收集點	D ₁₀ (mm)	D ₃₀ (mm)	D ₅₀ (mm)	D ₆₀ (mm)	C _u	C _c	含砂量 (%)	含泥量 (%)
仁愛國小	0.031	0.054	0.074	0.085	2.76	1.11	49.45	50.55
第八河川局	0.033	0.050	0.066	0.077	2.35	1.01	41.88	58.12
復興國小	0.028	0.048	0.068	0.081	2.96	1.05	45.08	54.92
東海國中	0.018	0.040	0.064	0.079	4.35	1.09	42.77	57.23
台東女中	0.024	0.048	0.075	0.092	3.88	1.04	50.58	49.42
台東高商	0.027	0.048	0.067	0.079	2.97	1.08	43.79	56.21
豐榮國小	0.024	0.047	0.073	0.090	3.79	1.05	49.13	50.87
新生國小	0.034	0.064	0.096	0.115	3.37	1.05	63.25	36.75
公東高工	0.023	0.049	0.088	0.113	4.94	0.92	55.95	44.05
馬蘭國小	0.030	0.080	0.155	0.202	6.74	1.05	71.67	28.33

資料來源：水利署第八河川局

由經濟部水利署第八河川局臺東市區各定點落塵礦物成份調查資料，研究分析臺東市區懸浮微粒落塵之礦物成份以伊來石所佔比例最高，達 30%左右，其次為石英質，所佔比例約 23%左右，板岩約佔 21%、綠泥石約佔 16%，其它長石、粉砂岩等均佔少數，如表 2-19。

表 2-19 臺東市區各定點落塵礦物成份分析

收集點	板 岩	粉 砂 岩	石 英	長 石	方 解 石	伊 來 石	綠 泥 石	不 透 光 礦 物	其 它
仁愛國小	12.92	1.01	15.28	6.98	0.61	40.19	21.40	1.61	0.00
第八河川局	24.10	4.93	23.47	4.58	3.56	24.79	13.20	0.55	0.82
復興國小	16.32	1.45	14.28	6.75	1.62	38.87	20.70	0.00	0.00
東海國中	8.92	0.72	14.27	7.64	0.62	43.86	23.37	0.55	0.04
台東女中	13.16	0.38	13.58	7.31	0.19	42.05	22.39	0.94	0.00
豐榮國小	25.21	2.67	30.83	4.20	2.08	22.46	11.96	0.59	0.00
新生國小	31.77	0.47	41.61	2.23	1.87	12.86	6.85	2.34	0.00
公東高工	30.13	3.23	32.63	2.86	2.69	16.47	8.77	3.23	0.00
馬蘭國小	27.73	2.23	23.78	4.38	1.93	24.83	13.25	1.72	0.13
合計	190.26	17.09	209.73	46.93	15.17	266.38	141.89	11.53	0.99
百分比	21%	2%	23%	5%	2%	30%	16%	1%	0.1%

資料來源：水利署第八河川局

第三章 卑南溪河口段風吹沙特性 分析

本論文研究目的著重於卑南溪河口段風吹沙治理策略探討，計畫由卑南溪河口段基本資料蒐集，進而對河口段及臺東市區環境基本資料調查，分析風吹沙與河灘地水文關係、風吹沙與氣象因子關係、風吹沙影響臺東市區範圍、河床沙質微粒與臺東市區懸浮微粒關連，綜合分析風吹沙來源，進而對風吹沙起動與風吹沙影響層面作分析探討，整理國內外對風吹沙防治工法研究及分析，並對歷年河口段風沙防治成效綜合評估，建立風吹沙預警資訊，研擬出最適合卑南溪河口段風吹沙防治策略。

3-1 河床現地勘查與分析

3-1-1 河床風沙來源

由多方面影像數據資料顯示，位於卑南溪河口段附近河床裸露沙灘地鬆散地面是風吹沙發生的主要地點，由現地觀察結果（如圖 3-1、3-2、3-3）發現在此區域內，河床沙灘地類型十分多樣化，包括野生植被區、卵石灘區、稀鬆植被卵石混合區、及不會引起風吹沙的水稻田地表類型也鑲嵌於此區域。因此本研究計畫利用監督不同類型的地表，勘察比對容易引起風吹沙的主要位置，對此區域內土壤沙粒質性、高低灘地、裸露面積、水文資料等資料蒐集分析，確認風吹沙發生潛力最高的區域，作為河口段風吹沙治理策略研究重點區域。

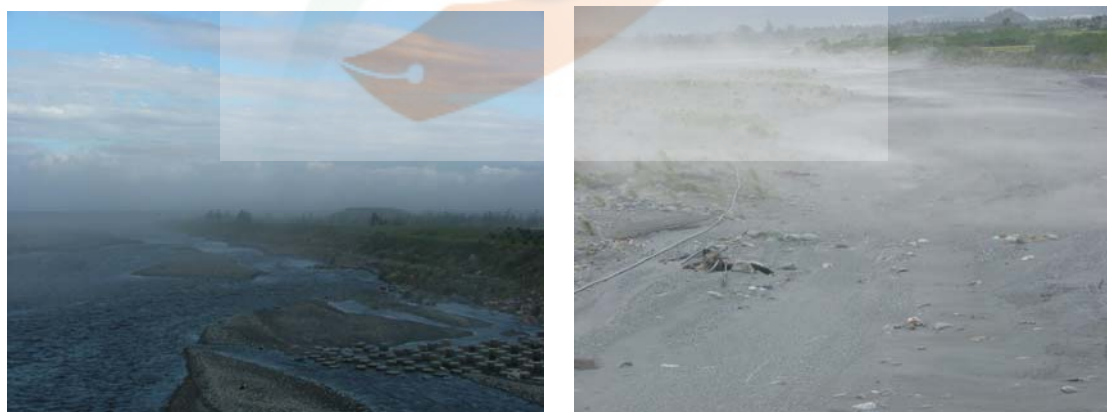


圖 3-1 卑南溪河床飛沙揚塵觀察圖片

卑南溪下游流經由巨厚泥岩組成、土壤沖刷嚴重之利吉層，為河口段帶來豐富的懸浮泥質沈積物材料，這些岩層所產出的泥質沈積物在夏季洪水期高水位時被帶至河口地區，漫淹在河灘地上，並隨著洪水的消退而慢慢堆積下來，當水量逐漸消退、水位下降至一般正常水

位時，這些高灘地上的河床泥質微粒逐漸乾枯裸露，常成為冬季枯水期期間東北季風或颱風期間風吹沙之沙塵的主要來源。



圖 3-2 利吉層鬆散泥岩照片

從現地實際觀察發現河床各種沙灘類型中，以鬆散細沙泥地為最容易引起風吹沙之潛勢區域，潮濕灘地、植被覆蓋、卵石覆蓋及水覆蓋區域則無引發風吹沙現象。



圖 3-3 卑南溪河床不同類型區塊飛沙揚塵觀察圖片

3-1-2 風吹沙主要河段

以往臺東市民咸信影響臺東市區之風吹沙問題，多來自於卑南溪下游河口段高低灘沙地堆積之河沙，如圖 3-4，因受東北季風或颱風環流所形成之強烈風場影響，將其吹入臺東市區，而造成臺東市區風吹沙災害，如圖 3-5。本研究計畫經由環境資料調查分析風沙來源與氣象關聯、探討風吹沙起動時空特性、研究風吹沙對環境經濟的影響層面、歷年風吹沙防治工法效益評估等分析研究風吹沙治理策略。

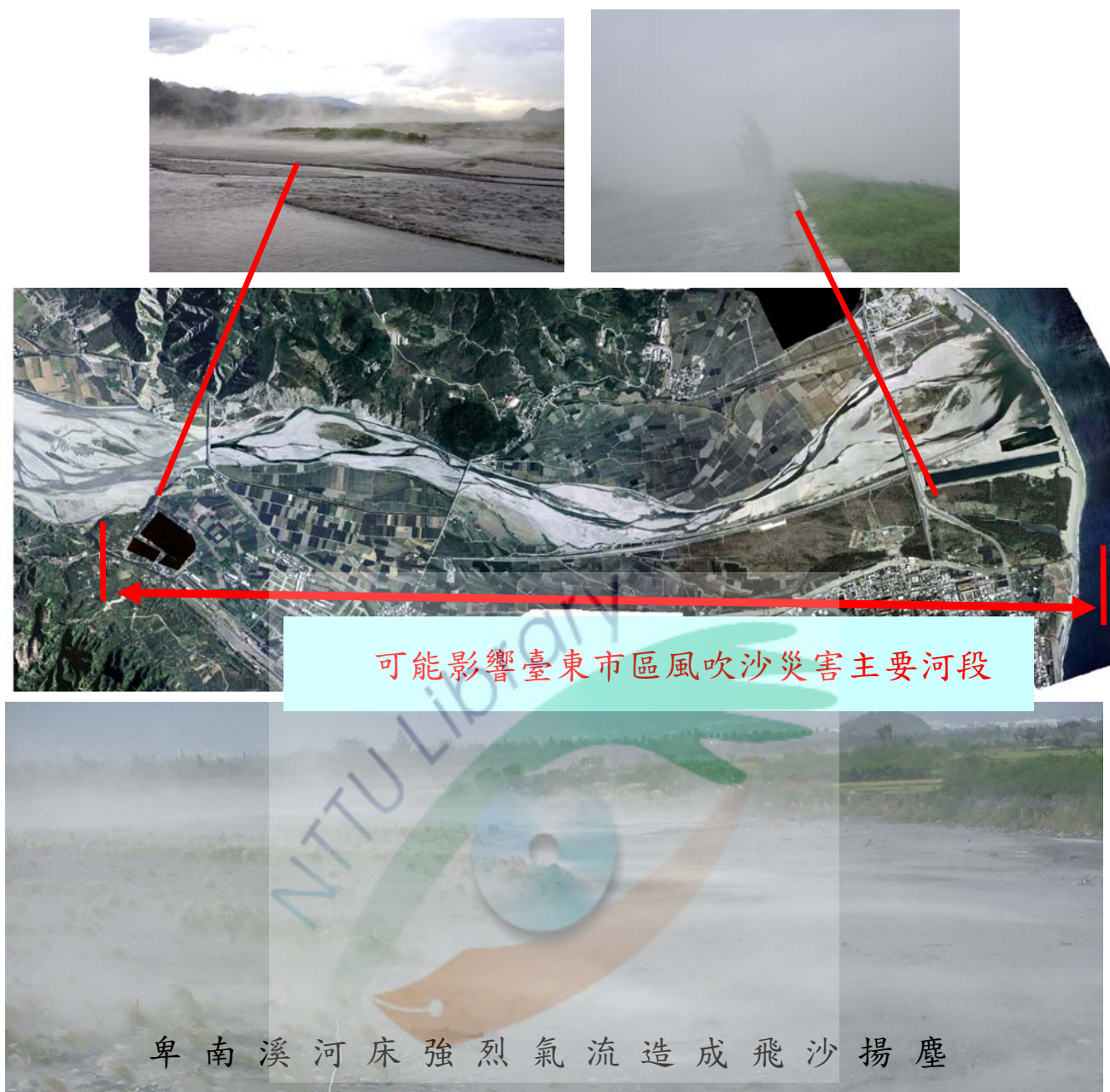


圖 3-4 可能影響臺東市區風吹沙災害主要河段



圖 3-5 沙塵隨氣流漂散情形

3-2 卑南溪河口段風吹沙發生之時空特性

3-2-1 風吹沙發生之空間特性

風吹沙發生的特殊地理空間，由本研究資料卑南溪河口段流經區域、地質、氣象及臺東市區風沙源等諸項資料分析，指出主要是東北季風與颱風前的強烈氣流影響，此結果與其他地區沙塵暴形成機制有相當類似。風沙天氣強風產生的原因，包括地球緯度、季節性、地形及山谷型態等。

在引起飛沙揚塵的物理機制上，共通特點均是為強風吹襲乾旱地表，使粒徑小的沙粒懸浮於空中，較粗粒子則就地滾動、跳躍運動，隨氣流向前移動。

水域方面，出海口地區水域流速普遍較遲緩，河道平坦，因河床表面摩擦力小，強風來臨時，風速快，地表粗糙度低，使風速變強，卑南溪出海口段河床平坦裸露，正屬於此種類型。

地理條件，隆起的山脈與盆地間相互配合容易造成風吹沙之沙塵天氣，另外臺東市緊鄰太平洋西岸，白天日照充足，海風吹向內陸，海陸風間交互作用下，引進旺盛氣流吹起狂風亦是不可忽略之因素。尤其當海風冷空氣進入內陸區域，氣壓梯度和變壓梯度明顯增大，地面輻合上升運動明顯增強，使冷鋒進入區域，強度進一步加強，也是該地區形成風吹沙天氣的一個不可忽視因素。

地質方面，資料蒐集調查結果顯示出海口地區下游淤積大量由上游沖刷而下之淤泥，是風吹沙主要的沙源，此現象與沙塵暴好發地區雨季時河流或湖泊沉積大量淤泥，旱季時被風吹起所形成的沙塵暴情形是一致的，也說明乾枯的湖泊或河川出海口一帶沉積物是最容易引起沙塵暴的場所。因此可知泥沙淤積的河段，經過乾燥後也是形成風吹沙的主要沙源。

沙源傳動方面，沙地植被稀少，若前期降雨量稀少，有長期的乾旱，地表就可能沙化嚴重，土壤裸露，地表土質疏鬆，甚至是人為的不當過度開發礦產破壞地表層穩定，如此一來，沙塵極可能經由強風或豪雨沖刷帶到下游地區，而造成下游河口段沉積大片微粒子沙塵。

3-2-2 風吹沙發生之時間特性

氣象方面，由卑南溪河口段鄰近之富岡及臺東市氣象站 1993 年至 2008 年歷史統計資料記載發現，風吹沙發生的時間點，主要在每年 9 月至隔年 2 月間，強勁東北季風狂襲卑南溪河床，所刮起之沙塵暴，或颱風來臨前(每年 5 月—10 月間)強烈大氣環流侵襲所致，同時每年 9 月至隔年 2 月間，為臺東地區全年降雨量及相對濕度最低期，容易引發飛沙揚塵之條件均相符。

風吹沙發生時段方面，綜合各項調查及分析，推論上午 10 時至下午 16 時為主要時間點，

此時段日照充足，紫外線強、地面熱氣上升，地表乾燥、氣壓沉降，導致強烈氣流產生陣陣強風，13-15 時達最盛隨後減弱，很少發生在晚上。而風吹沙持續時間一般在 4 小時以內，超過 4 小時以上的天氣系統，大都與颱風等異常氣候有關。

3-3 卑南溪河口段風吹沙起動條件探討

卑南溪風吹沙現象實地勘察發現，風沙揚塵除了風速、溫濕度、沙地含水量、中午日照紫外線充足等時空條件，尚有 1. 龍捲風、季風共伴捲揚情形； 2. 溪床高灘地形成沙塵跑道效應，機翼流速快，浮力上升，將沙塵帶至上層氣流等作用。

風吹沙形成要素，綜合條件複雜，風力、氣溫、降水等氣象因子外，與土壤表層植被、沙粒粗細等地質情況、相關區域的水文因素等，均具左右關係；從氣象資料分析探討，風吹沙發生時間以中午時段為最多，溫度對臺東地區風吹沙的形成之氣象因子較有相當關連性，中午時段一般為紫外線最強，熱度高及焚風，產生蒸發效應，地表相對濕度也急驟變化。

3-3-1 風吹沙起動之氣象條件

風吹沙的起動條件從本研究資料卑南溪河床含水量、摩擦風速等各項文獻資料探討，主要為氣象因子、水文因子及地面因子等，都是引起飛沙起動的關鍵因子，因此就上述三大因子分別探討。

懸浮微粒濃度值大時主要發生強風天氣，風速與懸浮微粒濃度值間成正向關係，在氣象冷鋒天氣型態，冷鋒前緣溫度較高，氣壓較低，空氣乾燥，天氣晴朗。冷鋒到達時，氣象條件會發生急遽變化，產生劇烈氣流。河床於揚起沙塵前，氣壓普遍持續降低，冷鋒到達時，氣壓突湧升而後降低，形成『氣壓鼻』現象。冷鋒來臨前，河床地區近地面大氣和地表溫度明顯上升，誘發河床沙塵捲揚，沙塵發生後氣溫又驟然下降。乾冷的空氣使得地表相對溼度也降低，風速一般可達每秒 4 公尺以上，足以滾動沙粒跳躍。此時河床上鬆散微粒沙塵開始捲揚，空氣中懸浮微粒濃度受沙塵影響而迅速上升，但臺東市區懸浮微粒檢視機動車輛或固定污染源排放的一氧化碳、氮氧化物等 RH 污染物濃度值則無明顯變化。

臺東市區沙塵懸浮微粒天氣是在特定的地理環境和天氣條件下，由特定的大尺度環流背景和各種不同尺度的天氣系統疊加所誘發的一種災害性天氣。氣象條件是其形成的必要條件，河床沖刷淤積鬆散沙塵則是其不可缺少的基礎。

白天地面受日照變熱，近地面的空氣也會因熱傳導而變熱。在氣壓相同時，熱空氣的密度要比冷空氣小，因此產生浮力而上升，而它周遭的空氣因較冷，因而較重，便可能下沉，或者因為暖空氣上升而被迫作出補償性的下沉運動，便產生「自然對流」運動。在一個對流中的空氣中，同一高度的空氣密度也不會均勻，有的部分密度大，有的密度小。由於大氣的

不穩定性，才能夠支持大量的懸浮塵埃。只要它們的大小粒徑能夠被空氣擾動中的上升氣流所支撐，便得以長久懸浮在空氣中。風吹沙的砂粒也是浮粒子，有的顆粒大，在1毫米上下，用肉眼便可以清楚分辨。粒子大的很難在空氣中長久停留，只要風力稍弱，它們便紛紛落回地面。真正能在空氣中長久懸浮的粒子要比1毫米小，通常都在10微米以下。大量的浮粒其實都在1微米以下，當它們的濃度相當大時，強光的照射下，肉眼能看到一層似煙似霧的東西。空氣中大量浮粒的話，能見度馬上降低，整個地區像似被一層煙霧的浮粒所遮蓋而使景物的輪廓變得模糊不清。即氣象學上的「霾」。大量微粒懸浮在大氣中，太陽光會被嚴重散射回太空中，導致地面所能接受到的總輻射量大減，使地表氣候轉冷。

風吹沙本身亦屬於一種氣象現象，而氣象因子也是風吹沙形成最直接的自然因子，由卑南溪河口段鄰近富岡及臺東市氣象站氣象資料分析結果可知強風、低濕高溫及低能見度是風吹沙發生的條件。透過風吹沙紀錄分析結果顯示，平均摩擦風速為最關鍵的氣象因子，由本研究調查蒐集之相關文獻資料，河口段風吹沙之平均風速達 4.0m/s 以上即可引起地表沙源傳動現象。

風沙起動前必需有利於強風形成的大氣環流及大氣邊界層處於不穩定狀態，是形成風沙的兩大氣象因素。強冷空氣所形成的強烈氣壓梯度，冷暖空氣活動頻繁，加上太陽的輻射增強，使冷空氣能夠推動暖空氣加速移動，使得近地層，特別是河床乾旱高灘地區白天熱力增溫幅度很大，地面受熱快，近地層空氣很不穩定，特別是午後熱對流旺盛，大氣層趨向不穩定狀態，一但出現有利的大尺度環流背景就有利於中小尺度天氣系統發生及發展或引發上下層的冷暖空氣交換，形成緊貼河床的強風，但是強風在任何季節都有可能發生，而風吹沙的天氣則不同，不但需要足夠強的冷空氣產生強風，而且發生前一般要有二至三天以上的持續高溫天氣，促使河床面空氣輻合上升運動增強，當冷鋒過境時，氣壓梯度和溫度梯度明顯變大，加速地面擾動，捲起河床高灘地沙塵，形成沙塵團，地面輻合上升運動將河床面沙塵帶入高空，使臺東市區能見度變得越來越低，導致類似沙塵暴氣象的產生。正因為如此，風吹沙天氣較容易出現在冷暖空氣交接最頻繁的秋、冬及春初季節，其中又以10月到隔年2月間發生之頻率最高，約佔全年之60%。

3-3-2 風吹沙起動之水文條件

出海口地區沉積物的堆積主要來自於雨季時的洪水將上游沙塵沖刷而下形成。由卑南溪歷年水位及流量變化發現，夏季颱風洪水發生時水位急驟上升，災後水位又急速降低，由現場調查結果顯示風吹沙的主要沙源為洪水挾帶而來。

卑南溪河口段為沖積扇，上游利吉斷層之風化泥岩集水區，坡度陡峭且地質鬆散脆弱，每逢颱風豪大雨沖刷，必將大量泥塵挾帶流入河床，是形成風吹沙沙源條件之一。

3-3-3 風吹沙起動之地面條件

一、有利於強風的大氣環流形勢

卑南溪河口段風吹沙天氣最主要的陸上影響力是風，風所造成的氣體動力流系統是河川高灘地鬆散沙粒開始移動的主要原動力，當風的剪應力大於沙粒本身的重力、摩擦力和凝聚力的總合時，沙粒即產生運動，因此當沙粒受到氣流作用時，能合乎上述的條件，則風帶動沙粒開始運動，其沙粒運動情形大致可分為三種：地面滾動(traction)、跳躍(saltation)和懸移(suspension)。另由沙塵暴天氣資料分析，風沙天氣一般有三天以上的持續高溫天氣，促使地面輻合上升運動增強，當冷鋒過境時，氣壓梯度和溫度梯度明顯增大，加速地面擾動，捲起河川高低灘地沙塵，導致風吹沙天氣的產生。

二、有利的沙源條件

卑南溪河口段上游利吉層巨厚泥岩、臺東海岸山脈斷層帶破碎岩層，山林水土保持欠佳時，大量砂土沖刷淤積於河床高低灘地，加上河床植被遭洪水沖刷毀損稀少，遇有長期的乾旱少雨，河床表面沙化嚴重，土壤粘結表層破壞，土壤裸露，地表土質疏鬆，甚至是人為的礦產開發，影響河床原有穩定固結狀態，就有利於風吹沙的沙源條件產生。

三、地形作用

特殊的地形對於沙塵天氣的形成有額外的加強作用，根據歷年典型沙塵天氣的個案分析，發現隆起的山脈與盆地間相互配合，容易造成風吹沙天氣。形成飛沙揚塵地點，通常發生於山脈間呈“Y”字形的狹窄區域中。而本研究計畫卑南溪河口段恰處於中央山脈與海岸山脈間 Y 字型區域中，東北季風來臨時形成風道，起沙點正好位於風口處，因而產生風吹沙現象，如圖 3-6。當夏季颱風來臨前，北半球颱風逆時鐘特性，河口段東北勁風狂襲，翻越海岸山脈後氣流急速下沉，形成焚風效應，繼續加重卑南溪河口段高灘地沙塵乾燥，並破壞沙塵間凝結力，抗風蝕能力，因而在強風侵襲下引起強烈吹沙揚塵現象。

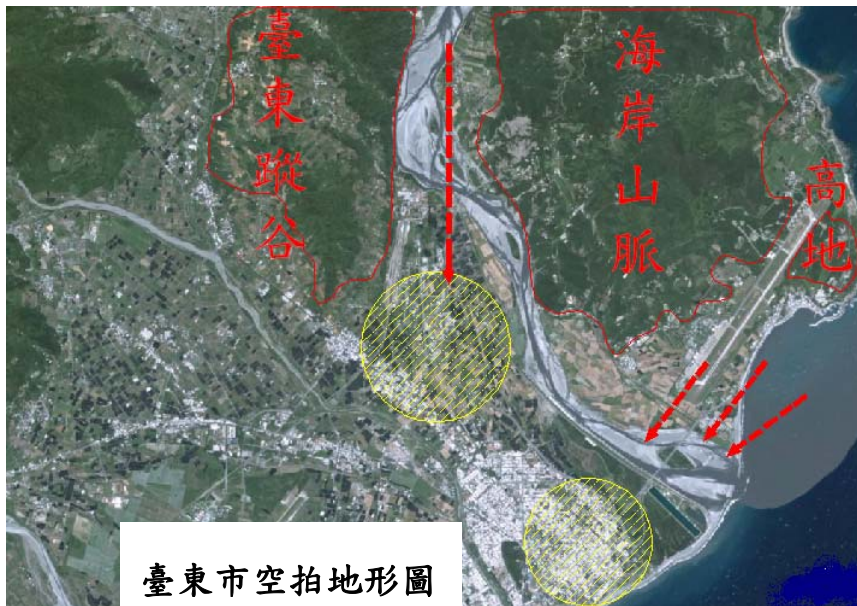


圖 3-6 風吹沙地形因素分析圖（影像摘自 google earth）

3-4 卑南溪河口段風吹沙影響層面

臺東市素來以好山好水好空氣為標榜著稱，但臺東風吹沙現況十分嚴重，直接扼殺了臺東適合旅遊居住生活之形像。卑南溪河口段河床吹沙揚塵，嚴重影響臺東市區空氣品質，沙塵濃度高時甚至影響道路交通安全及機場飛機起降，且干擾臺東市民眾日常生活正常作息，對民眾之身體健康影響亦非常顯著；對臺東縣計畫發展觀光農業等經濟事業也造成一大阻礙，研究分析如下：

3-4-1 對臺東市區空氣品質影響

卑南溪河口段風吹沙，氣象因子為一重要因素，本研究結果發現臺東市主要風向為東北風方向，卑南溪河口段正好位於臺東市東北郊，東北風對卑南溪河口段裸露沙灘地鬆散泥塵，直接長驅直入吹進臺東市區，造作臺東市區嚴重沙塵災害，根據本研究結果發現，摩擦風速與臺東市區空氣品質之懸浮微粒濃度值成正比關係，風速大小直接影響臺東市區空氣品質。

根據本研究發現臺東市風吹沙與卑南溪河口段風速風向有一定關連，風沙落塵分佈直接受季節風向、颱風、及大陸高氣壓出海等影響，所以臺東市區定點落塵量濃度調查結果，各定點累計結果不盡相同，但可歸納出風吹沙落塵量最大受災區域範圍。2007 年 10 月 4 日臺東市區各定點落塵研究，主要分佈在復興國小週邊區域如圖 3-7，影響臺東市區空氣品質範圍如圖 3-8：

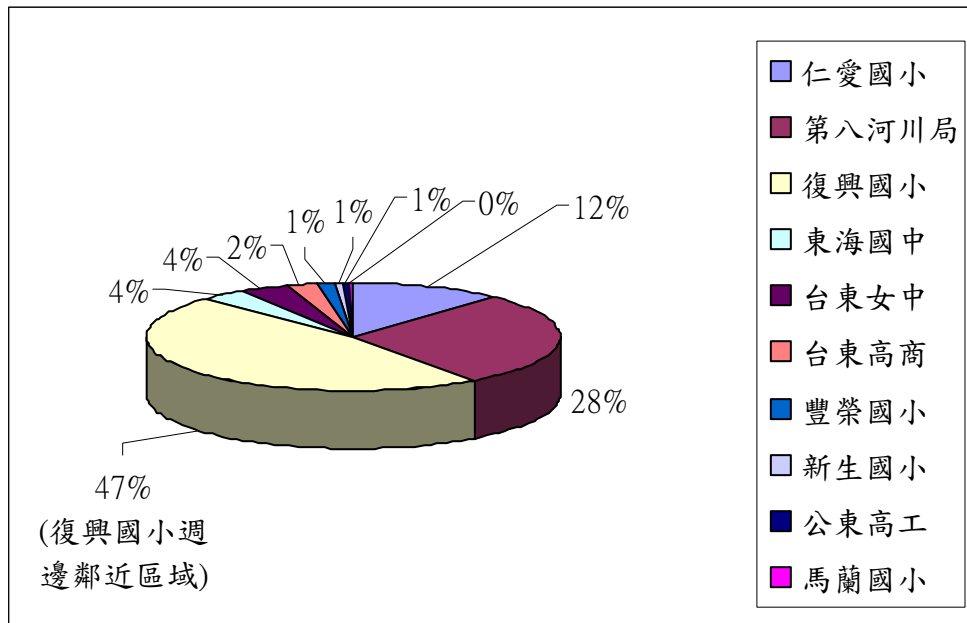


圖 3-7 臺東市區 2007/10/4 日各定點落塵量濃度比例



圖 3-8 2007/10/4 風沙影響臺東市區懸浮微粒濃度分佈圖

臺東市區 11 月 19-21 日定點集塵資料研究分析顯示，以東海國中及仁愛國小附近之落塵量最大。落塵分佈大致呈南南東方往北北西方向遞減，落塵分佈在臺東市中華路一段以南一

帶、臺東女中附近，如圖 3-9，對臺東市區空氣品質影響範圍如圖 3-10。

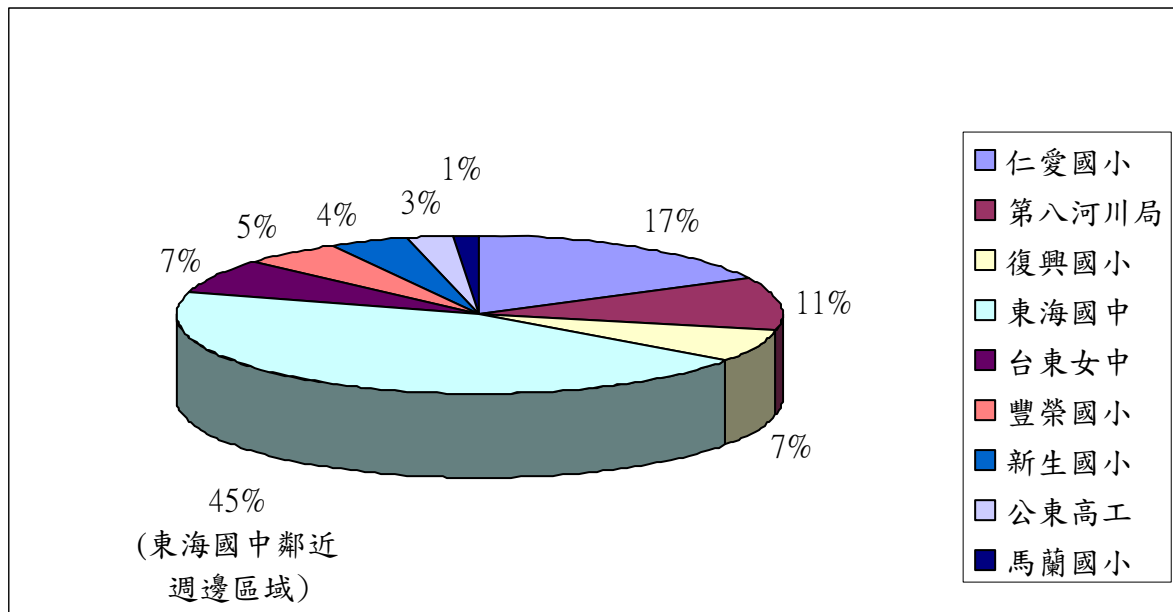


圖 3-9 臺東市區 2007/11/19-2007/11/21 各定點落塵量濃度比例

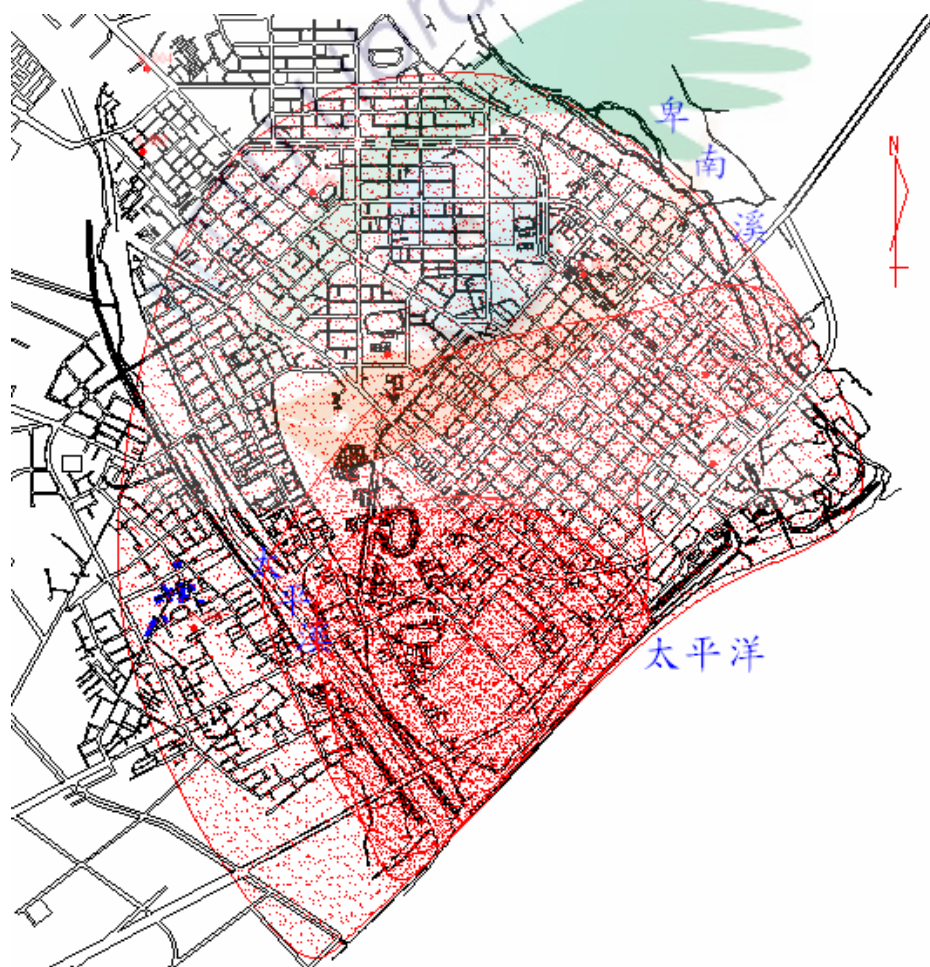


圖 3-10 2007/11/19-2007/11/21 風沙影響臺東市區懸浮微粒濃度分佈圖

臺東市區 2008 年 5 月市區定點集塵資料，研究分析顯示，落塵量由臺東市區靠海側逐漸向公東高工一帶擴散，大致呈東南方往西北方向遞減，主要分佈在臺東女中及中華路以南區域，與東北風作用明顯，對臺東市區空氣品質主要影響範圍繪製如圖 3-11、3-12。

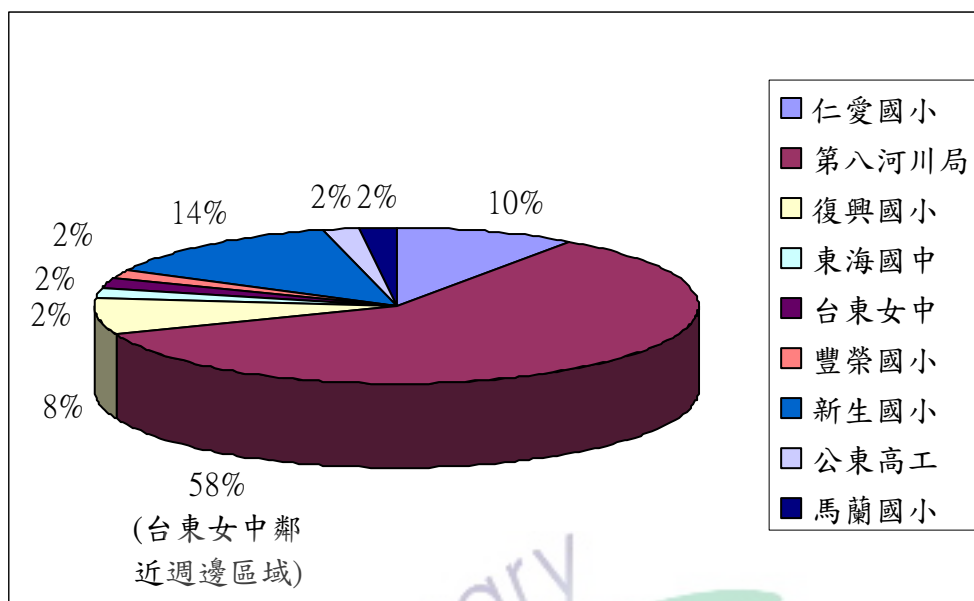


圖3-11 臺東市區2008/5/5日各定點落塵量濃度比例

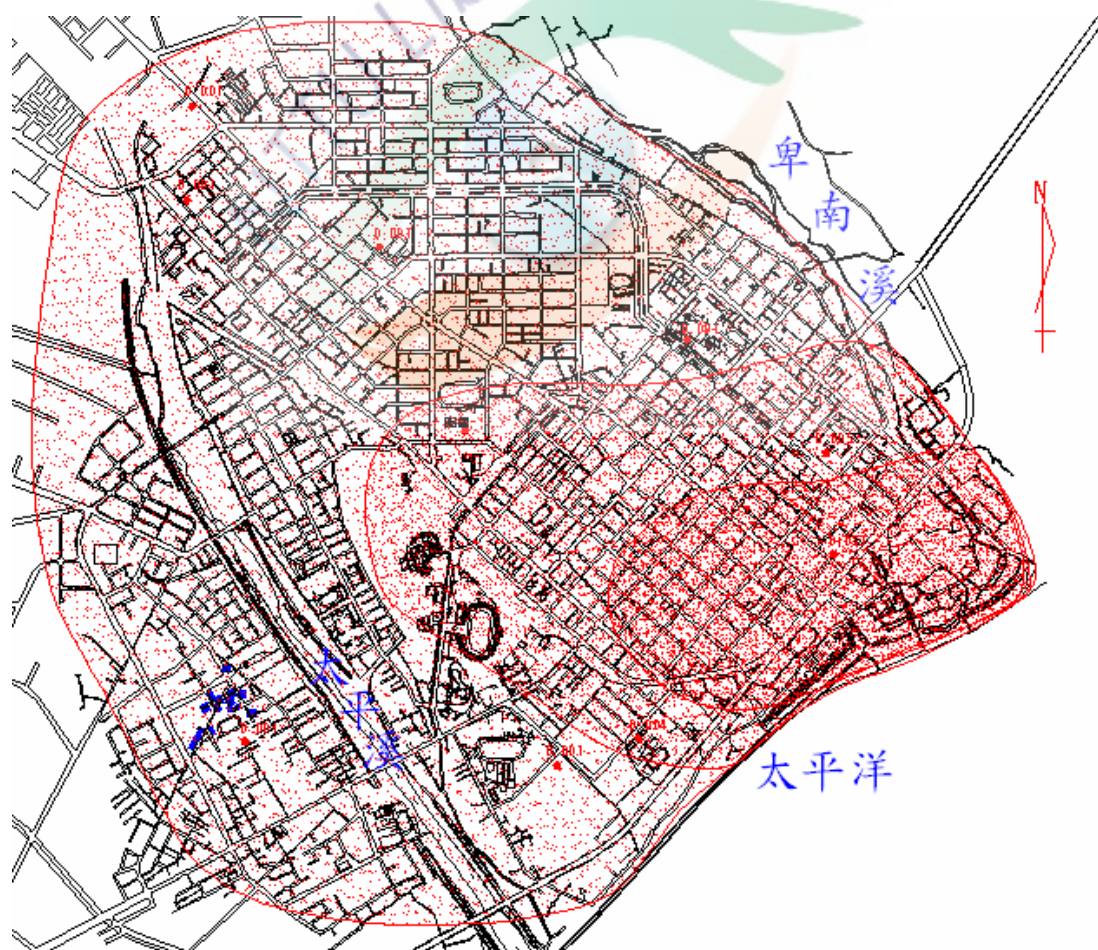


圖 3-12 2008/5/5 日風沙影響臺東市區懸浮微粒濃度分佈圖

表3-1 臺東市區懸浮微粒氣象因子與卑南溪口氣象因子比對彙整表

日期	臺東縣環保局測值					水利署卑南溪監測值	
	懸浮微粒值 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	風速 (m/s)	風向	氣溫 ($^{\circ}\text{C}$)	雨量 (mm)	風速 (m/s)	風向
2007/10/4	65	4.9	東北東	31.4	0	13.6	北北東
	125	5.4	東北東	31.7	0	14.3	北北東
2007/11/19	65	4.8	東北東	25.9	0	13.5	北風
2007/11/20	65	4.8	東北東	26.1	0	13.5	東北風
	125	5.3	東北東	26.2	0	14.2	東北風
2007/11/21	65	4.9	東北東	24.8	0	13.6	東北風
2007/11/22	65	4.6	東北東	26.1	0	13.2	東北風
2008/05/05	65	5.1	東北東	29.1	0	13.9	北北西

本研究整理自水利署第八河川局氣象資料及臺東縣環保局空氣監測資料

由圖 2-18、圖 2-19、圖 2-20 等臺東縣環保局臺東市區懸浮微粒氣象因子監測資料，比對同期間水利署卑南溪口氣象條件表 2-15、表 2-16、表 2-17 顯示，臺東縣環保局空氣品質監測站，懸浮微粒達年平均値($65 \mu\text{g}/\text{m}^3$)門檻以上時，其風速條件大多分佈在 4.6m/s—5.1 m/s 風速間，風向則為東北東方向，氣溫監測值顯示為攝氏 25.9 度—31.4 度間、雨量條件均為 0mm。另卑南溪口監測資料顯示，風速達懸浮微粒年平均値($65 \mu\text{g}/\text{m}^3$)門檻以上時之風速條件約在 12.5m/s—13.9m/s 間，比對資料顯示，卑南溪口相同懸浮微粒門檻值摩擦風速值較高，可能與卑南溪河口段環境條件不同有關，同時由彙整表資料顯示臺東縣環保局氣象監測站檢測到之臺東市區懸浮微粒濃度相對市區最大風速，大致均成正比之關係，風速與臺東市區懸浮微粒值間有顯著關連。

卑南溪風吹沙影響臺東市區風沙分佈情形，則因調查蒐集資料顯示，與季節風向、劇烈氣候及海岸山脈地理因素等影響，市區落塵量及嚴重位置有所差異，2007 年 10 月 4 日臺東市區風沙落塵調查分佈狀況顯示，位於復興國小與臺東女中一帶懸浮微粒濃度最大，研究顯示臺東市區秋季風沙落塵災害可能來自東北風向與西南氣流風向等兩種輸送源，造成復興國小鄰近區域落塵量比值偏高，可能原因為鄰近臺東海岸沙丘，日間海岸風吹向內陸因素造成。

臺東市區 2007 年 11 月 19 日至 22 日落塵量調查資料分析，由中華大橋往西南至臺東女中、東海國中、復興國小週邊區域，懸浮微粒濃度值較大，其中又以海岸公路（台九線）至東海國中一帶最嚴重，其懸浮微粒濃度值最高。由臺東市區懸浮微粒落塵量分佈趨勢分析，造成臺東市區懸浮微粒濃度偏高區域，風沙來源除了與卑南溪河口段沙灘地沙源影響外，臺東海岸沿岸沙灘地沙源也可能是影響臺東市區風沙主要來源。

臺東市區 2008 年 5 月 5 日針對市區各定點落塵收集顯示，臺東市區懸浮微粒濃度分佈在

公東高工、新生國小、臺東女中、至復興國小一帶落塵量為大，其中又以博愛路以東地區，臺東女中週邊區域之落塵量最大。依分佈區域地理環境分析顯示，東北風仍為主要風向，沿卑南溪河口段週邊區域均遭受河口段風吹沙災害的影響，越往臺東市區，落塵量則大致呈現逐漸遞減情況。

臺東市區整體落塵量分佈區塊套疊比對後分析如圖 3-13，臺東市區因風吹沙災害平均由東南方向西北方向呈現逐漸遞減情況，研判與圖 3-6 所示，因臺東市東北郊海岸山脈與臺東縱谷間特殊的地形對風吹沙天氣起特殊作用，根據歷年典型沙塵天氣分析，隆起的山脈與盆地間相互配合，也容易造成風吹沙天氣。而本研究計畫卑南溪出海口段恰處於中央山脈與海岸山脈間 Y 字型區域中，東北風來臨時形成彙集風道，引發卑南溪河口段河床強勁風吹沙現象，又因北半球颱風逆時鐘特性，河口段東北勁風翻越海岸山脈後氣流急速下沉，形成焚風效應，加重卑南溪河口段高灘地沙塵烘乾效應，破壞沙塵凝結力，引起強烈吹沙揚塵。

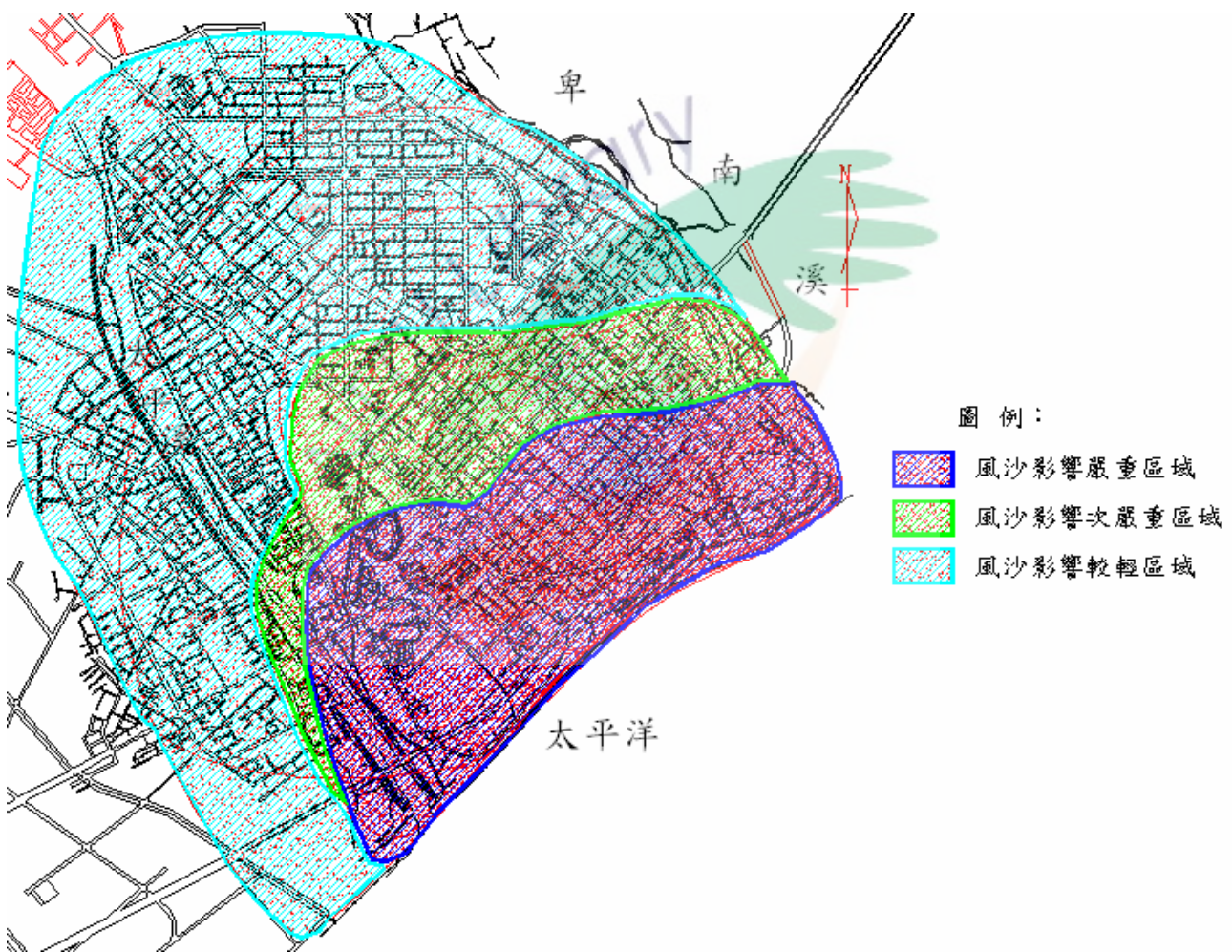


圖 3-13 風吹沙影響層面圖

3-4-2 對民眾日常生活及健康影響

風沙對於空氣之污染即是懸浮微粒之增加，對人類呼吸系統造成危害。研究指出，當沙塵侵襲時，大氣中的霉菌數量較平日增加兩至三倍以上，且此菌種會造成小麥的死亡。所以不僅是沙塵本身會對環境造成影響，附著於沙塵上之化合物或是生物體亦有可能藉此傳送方式而影響數千公里外的生態環境。而沙塵來源所攜帶大量的鈣、鉀、鎂離子，會直接影響雨水之化學組成，例如發生泥雨或酸雨等現象，雨水之 pH 值會高達 7.0 以上。而懸浮微粒也會堵塞植物氣孔，妨礙光合作用進行。另外沙塵含有大量之懸浮微粒，這些粒子會直接反射太陽光，影響到海洋表面吸收陽光蒸發水汽的功能，同時也會改變雲內物理及化學組成，因為沙塵雲團會吸收熱量，會反射照射到地面的陽光，其總體效果是使地球表面有降溫變冷效果。

風沙影響，除了空氣品質惡化及能見度降低之外，對民眾健康及生態的影響，雖無直接的科學證據，目前只能以臨床醫學上之病例來推論沙塵對人體的影響。由研究指出，在沙塵引發期間，民眾至醫院急診次數增加。又以過敏性疾病、肺部及心臟部位案例最多，浮塵藉由呼吸系統進入肺部，直徑 10 微米者沉積在肺部氣管中，造成支氣管堵塞、直徑 4.0 微米以下者可以進入到肺部氣體交換區，影響肺部的正常工作、直徑 2.5 微米以下者(又稱為細懸浮微粒)，可將病毒攜入肺部組織，直接對人體健康危害。由於空氣中懸浮微粒增加，容易造成過敏性鼻炎，引發咳嗽、氣喘、眼睛不適、皮膚過敏、皮膚癢等症狀，研究發現，呼吸道症狀會因此盛行，發病率增加，學童也會因呼吸道症狀引起之不適，請假人數增加，一般民眾會因呼吸道疾病，就診率增加等，對民眾健康有明顯之影響。沙塵對健康危害情形包括有：

(一) 敏感性疾病

飛揚之塵土會導致眼疾、呼吸道疾病之發病率大為提高，如易導致咳嗽、眼澀或喉嚨癢等過敏症狀，尤其是沙塵發生頻繁的季節是在春季，也正是過敏症狀好發的季節，臨床上最常見的病症就是眼科疾病。

(二) 塵肺症

沙塵中許多超微細顆粒，經呼吸作用或循環系統進入人體，對眼、耳、口、鼻的黏膜造成刺激作用，輕則影響視線，若是長期性的職業或環境暴露，則沈積於支氣管或肺泡，造成呼吸道疾病，這類沙塵病歷以塵肺症最為常見。

(三) 流行病

沙塵天氣帶來的細微粉塵若過多過密，極有可能使患有呼吸道過敏性疾病的人群舊病復發。季節交替加上沙塵來襲，氣喘患者症狀容易誘發，所以也會出現如哮鳴聲，甚至併發眼睛結膜發紅與鼻黏膜腫脹等問題。沙塵形成呼吸道疾病有的會氣喘合併感冒，有的則是造成氣管發炎。

(四) 傳染病

大風跨越處，將沿途的病菌吹到下風向地區，其中可能包括一些傳染病菌傳輸。

(五) 流行性出血熱病毒

一種由浮塵攜帶的病毒。人類主要是吸入空氣中的老鼠糞便患上流行性出血熱，當空氣足夠乾燥且風力足夠的情況下，病毒就可以懸浮在空氣中，使人吸入並感染。儘管該病可以治愈，但由於該病毒會造成患者肺部迅速積水，往往還未等到患者就醫，就已被奪去了生命。

3-4-3 對耕作土壤及作物之危害

風沙對土壤表面如經長時間之吹蝕，首先侵蝕土壤表面細小土粒，飛揚於空中，原有土壤之混合比率漸次改變，成為砂料百分比相對提高之土壤，原為壤土者變成沙壤土或沙土，含水能力及蓄肥力隨之減退，產量因而減少；臨海地區因鹽鹼上昇帶入，會直接影響雨水之化學組成，土壤PH值提高，形成高鹼性表土，對作物滋生影響極大；沙塵侵襲時，大氣中的霉菌數量較平日增加兩至三倍以上，此菌種會造成小麥等農作物的死亡；強大風力亦助長表土水份蒸發，減低土壤水份含量，使作物生長不易，風吹沙打擊作物，吹折莖幹撕裂葉片，破壞作物生長機能，風沙亦妨礙花粉傳播，影響作物受精機會，風沙濃度高時懸浮微粒也會堵塞植物氣孔並影響作物行光合作用。



第 4 章 卑南溪河口段風沙防治策略

4-1 風沙防治原理

防風定沙理論有封閉、固定、阻滯、輸導、改向和消散等六種類型；若依力學作用原理分為隔斷、抑制、增阻、減阻、轉向和消形等六種，詳細作用原理如表4-1。但就一般風吹沙防治策略是綜合性的，需作整體環境資料調查分析研判，治理工法也需因地制宜，使用某一策略或多種策略類型一併來擬定防風定砂，所以在設計時也應綜合多方面考慮。主要作法上一般是以破壞強風的風場，例如利用防風林、攔沙柵、防風網、風力發電等設施來降低風速、提高風場，以減少風蝕搬運量；另一方面的作法是減少沙源的產出及裸露，例如以植物生長的自然綠覆蓋法、稻草蓆覆蓋法、生物化學黏劑噴灑裸露表層等；三是使裸露沙塵保持一定含水量，增加沙塵抗風蝕力學性質，以抵抗風蝕及搬移；四是減少河川人為破壞干擾，加強河川環境保育及上游水土保持等四項作為。防治作為都是為減少沙塵被風捲揚的機會，卑南溪河口段風吹沙有效防治作為，同樣必須依據風沙發生地區的基本環境條件，深入探討臺東地區地風沙揚塵發生的機制之後來加以擬定，也就是針對源頭來進行治理。

表4-1 風沙防治策略、原理及作法

防治策略	作用原理	防治作為
封閉隔斷	封閉切割氣體與固體兩相界面上的接觸	粘質泥土塗抹、噴灑乳膠劑等封閉沙灘表面，改變沙丘表面性質
固定抑制	抑制氣體與固體兩相界面互動作用，固定活動面	噴灑水、鋪設草蓆、草方格、粘土砂障固定活動砂面
阻滯增阻	增大風沙流運動摩擦阻力，減速沉降，阻擋攔截	攔砂柵、防風林帶、擋砂牆等設置，迫使增加運動阻力，阻截過境風沙流
輸導減阻	減少風沙流運動阻力，阻止分離發生	導風工程、輸砂橋等促進與加速風沙流順利通過保護區
改向轉向	增大迎面阻力，迫其側向繞道	設導風柵欄，迫使風沙流改變運動方向
消散消形	減少沙丘形狀阻力，增大輸砂能力強度	設揚砂堤等，改變沙丘整體推移輸送

本研究整理自周恆（1978）防風定砂

4-2 卑南溪河口段風吹沙防治策略比對及驗證

4-2-1 沙灘、水文變遷與卑南溪河口段風吹沙關係

卑南溪河口段沙灘地，每年雨季豪大雨或颱風所帶來之超大豪雨都會自上游段帶來大量

泥沙，洪水通常會把河口段沙灘地被植物沖走或帶來大量泥沙將地被植物覆蓋，使沙灘地原有地被植物沖毀消失，以致於河口段沙灘地常無法穩定固結。隨著豪雨過後河川沙灘裸露地連日曝曬，地表乾燥、氣壓沉降，吸引強烈氣流灌入，就容易使河床裸露沙灘地鬆散泥沙被風吹起，引起卑南溪河口段風吹沙現象。河口段沙灘裸露地植被與沙灘地沖刷變動過程影響河口段風吹沙起動之重要地表因素。

以往河川內沙灘地變遷情形，利用航照圖等影像作為河道歷年變遷分析已有相當多的研究，利用不同年代的航照圖對河道及周圍的土地，分析探討週遭土地的影響。

國內外利用影像分析發現河床區域風吹沙與沙灘裸露面積增加因素關係密切，此現象與美國加州流域周圍土地的利用範圍擴大情況相似，植被逐年消失，裸露河灘地逐增加，受都市化等人為影響，河床裸露增加、逕流水被攔截供農業灌溉，導致河道乾竭，風吹沙情況愈形嚴重，有連帶關係。為瞭解造成臺東市區風吹沙問題，裸露河床所佔面積，本研究擬針對風吹沙好發之河床沙灘裸露地，以影像紀錄的方式分析評估季節性氣候對沙灘裸露地變化、河道礫石採取及鄰近土地開墾的變遷過程，進行河川橫斷面沙灘地消長情形調查研究，分析歷年影像監測資料，對水文地勢變化與風吹沙地點沙源的消長變化過程進行瞭解，藉由卑南溪利吉至河口段之空拍影像，如圖 4-1，經由影像正射處理及 autocad 計算卑南溪利吉至河口段裸露河床面積，計算出各分區之裸露河床面積如表 4-2。

表4-2 2008年11月卑南溪河道沙洲面積計算表

編號	位置	面積(m ²)	合計(m ²)
1	中華大橋下游	72624	908,008
2	中華大橋上游	474574	
3	中華大橋下游右岸	86,837	
4	出海口左側沙洲	175,624	
5	出海口右側沙洲	98,349	
6	臺東大橋與中華大橋間左岸	795,224	938,023
7	臺東大橋與中華大橋間右岸	142,799	
8	臺東大橋與利吉大橋間左岸	477,275	516,475
9	臺東大橋與利吉大橋間右岸	39,200	
10	利吉橋上游左岸	1,144,825	1,849,138
11	利吉橋上游右岸	704,313	
	總計		4,211,644

本研究整理自水利署第八河川局卑南溪衛星影像圖

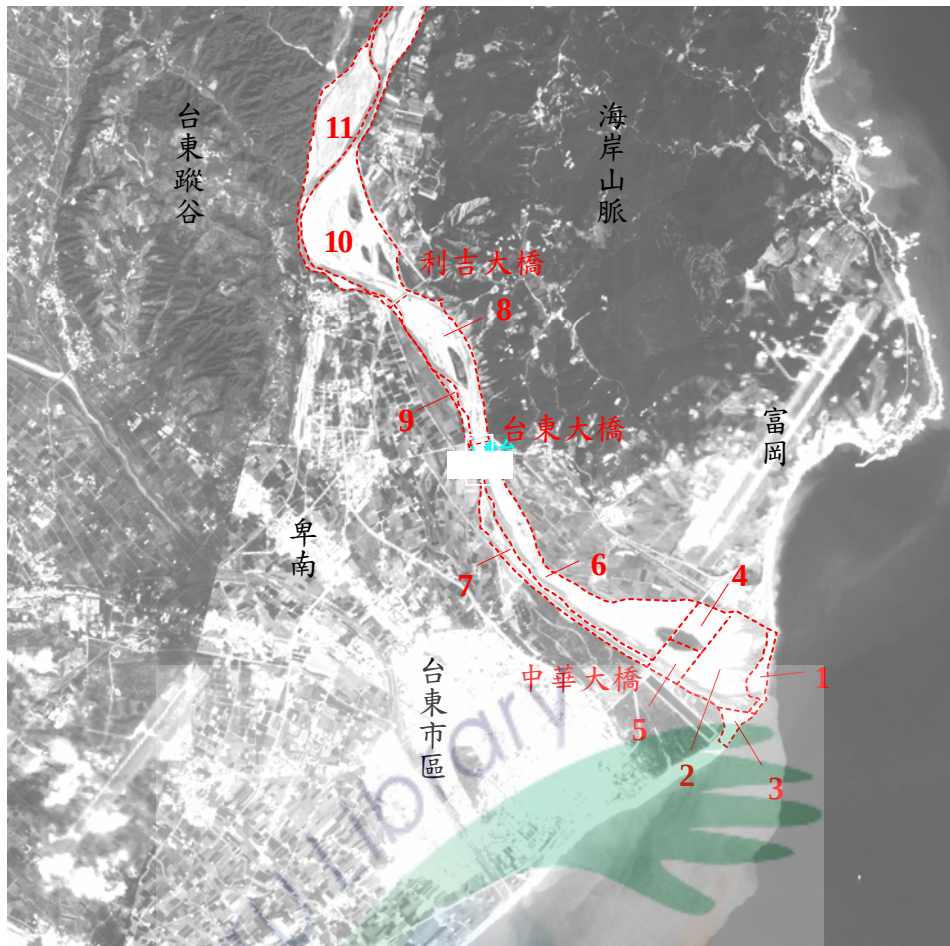


圖 4-1 卑南溪河口段流路衛星影像圖（影像來源:第八河川局）

另經由經濟部水利署第八河川局臺東大橋水文監站水文調查資料，比對河川水位資料與河床裸露沙灘地面積，與臺東市區懸浮微粒值關係，如圖 4-3。

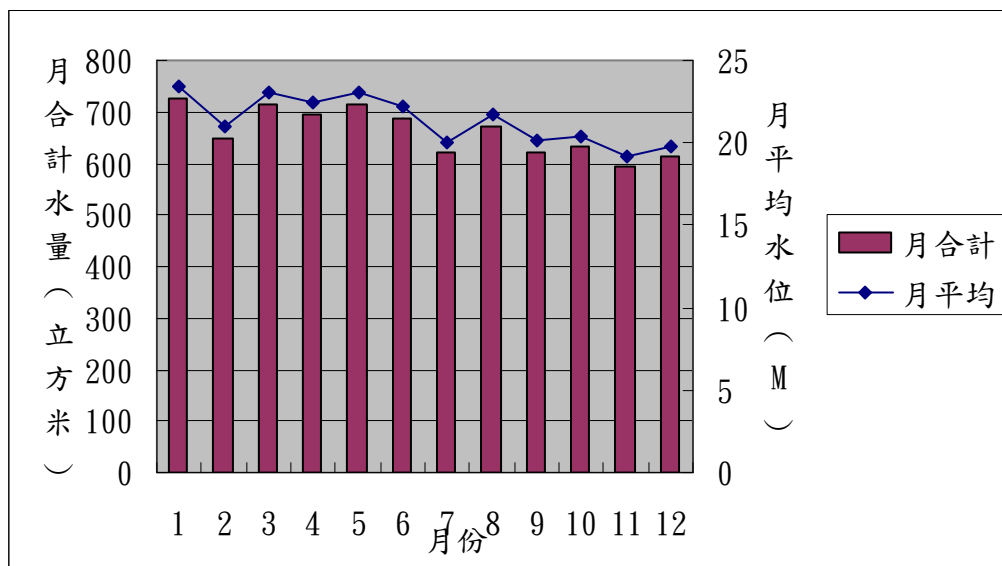


圖 4-2 卑南溪 2008 年水位與沙灘裸露地面積關聯

表 4-3 2008 年月平均水位、沙灘裸露面積與懸浮微粒值關係表

項目 \ 月份	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月
月平均水位 (公尺)	23.47	20.96	23.03	22.43	23.03	22.23	20.01	21.73	20.1	20.38	19.14	19.79
推估裸露面 積 (公頃)	516	461	506	493	506	489	440	478	442	448	421	435
吹沙次數	0	0	2	1	0	1	1	1	4	6	6	1
臺東市博愛 路懸浮微粒 檢測值 (東檢站 tsp)	53	37	26	51	87	39	23	25	25	50	52	66

本研究整理自水利署第八河川局卑南溪水文調查資料及臺東縣環保局空氣監測資料

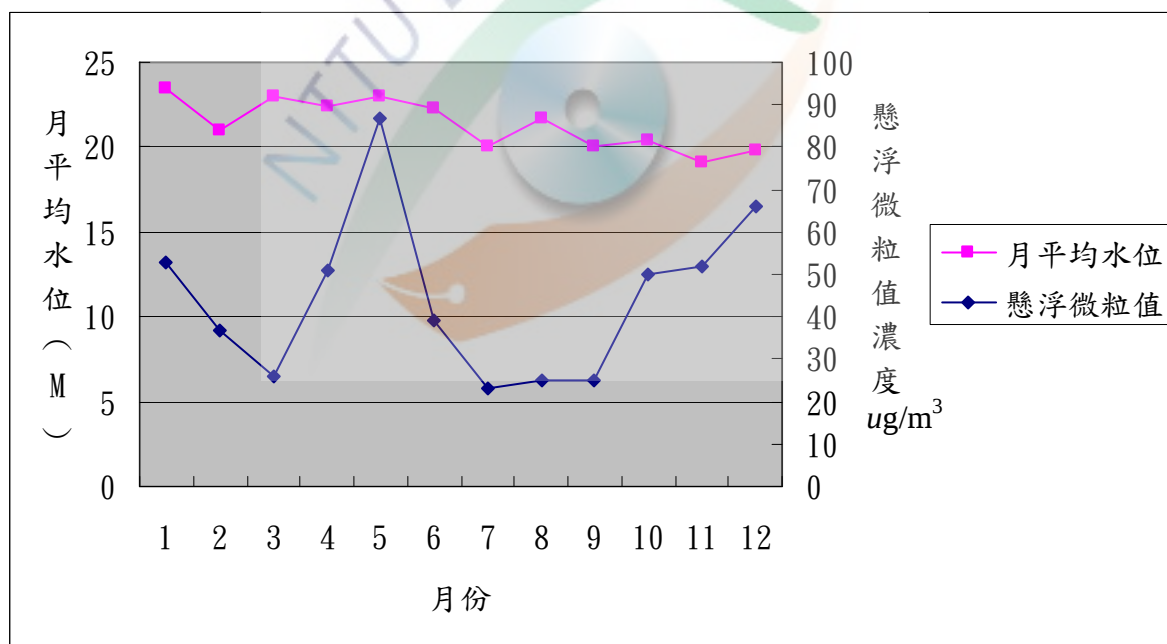


圖 4-3 卑南溪 2008 年月平均水位與市區懸浮微粒值比對關係圖

分析卑南溪河床飛沙揚塵造成臺東市區懸浮微粒總量與河床水位及裸露灘地面積及表面含水量間之關係並不明顯。另根據水利署第八河川局卑南溪河床調查資料(如表 2-20)各次河床表面含水量有 7.8%，但其單位時間寬度飛沙揚塵總量最高達 0.93 g/cm/sec、最低為 0.02 g/cm/sec，顯示河床表面含水量與臺東市區懸浮微粒總量之關係亦不明顯，推測與沙塵天氣

發生必需有的三個必要條件：有利於強風的大氣環流形勢、有利的沙源條件、大風經過區域持續高溫植被稀疏土質乾燥疏鬆等條件不足有關。但飛沙揚塵總量資料研究發現，同期間與摩擦風速 U^* 有著非常正比關聯，顯示卑南溪河口段飛沙揚塵懸浮微粒濃度除了與河床表面含水量因子關係密切外，摩擦風速等氣象因子為飛沙揚塵起動重要影響因素。

4-2-2 風速風向氣象因子與卑南溪河口段風吹沙關係

統計卑南溪河口段 89 年至 97 年風吹沙發生次數，分析河口段主要優勢風向為東北風。

表 4-4 民國 89 年至 97 年風吹沙次數統計表

風場 \ 年度 次數	89	90	91	92	93	94	95	96	97	合計
北風 (337.5 — 22.5)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
東北風 (22.5 — 65.5)	1	0	6	0	3	6	9	12	16	53
東風 (65.5 — 112.5)	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
東南風 (112.5 — 157.5)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
南風 (157.5 — 202.5)	3	1	0	0	0	0	1	1	2	8
西南風 (202.5 — 247.5)	0	0	2	0	0	3	7	5	4	21
西風 (247.5 — 292.5)	0	0	0	0	0	0	3	0	0	3
西北風 (292.5 — 337.5)	0	0	0	0	0	1	1	0	2	4
合計	4	1	8	0	3	11	21	18	24	90

本研究整理自中央氣象局臺東氣象站、水利署富岡氣象站及志航氣象站氣象資料



圖 4-4 卑南溪河口段風吹沙優勢風向

由卑南溪河口段 89 年至 97 年風吹沙月份統計，全年風吹沙月份分析，十月分為卑南溪河口段風吹沙主要好發月份，往前及向後月份則呈逐月遞減趨勢，如表 4-5、圖 4-5。

表 4-5 民國 89 年至 97 年風吹沙月份統計表

風場 \ 月份 次數	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	合計
北風	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
東北風	1	1	2	1	0	0	4	2	9	18	12	3	53
東風	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
東南風	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
南風	0	0	0	1	2	2	2	1	0	0	0	0	8
西南風	0	0	1	3	1	8	1	6	0	1	0	0	21
西風	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	3
西北風	0	0	0	0	0	0	0	2	1	1	0	0	4
合計	1	1	3	5	3	10	8	13	11	20	12	3	90

本研究整理自中央氣象局臺東氣象站、水利署富岡氣象站及志航氣象站氣象資料

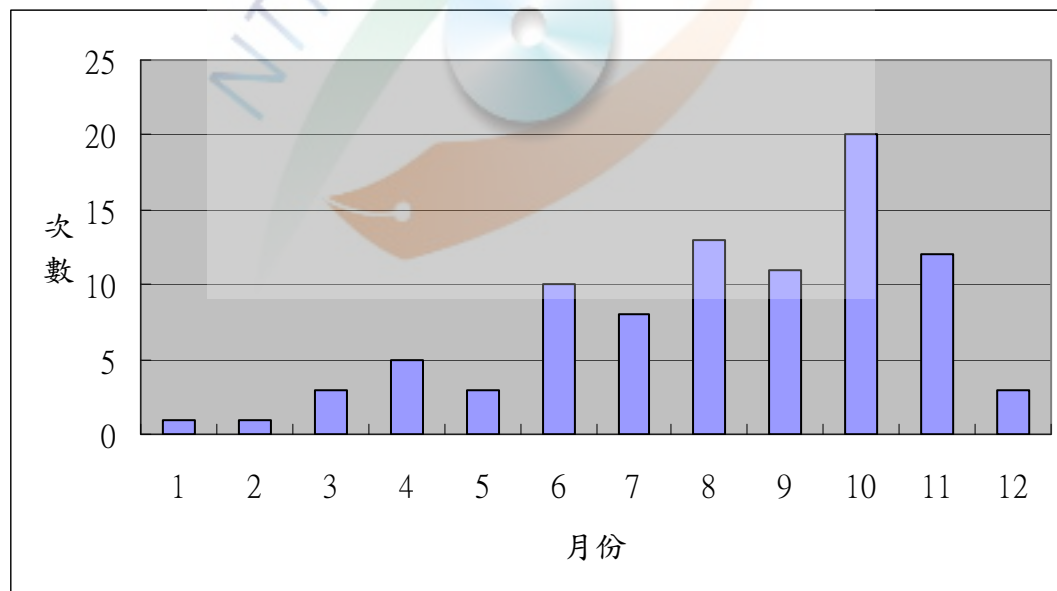


圖 4-5 卑南溪河口段風吹沙好發月份圖

統計 89 年至 97 年卑南溪河口段風吹沙發生時間至風沙停止時間，繪製日發生時間座標軸，如圖 4-6，研究分析顯示，風沙吹天氣發生之時空頻率約略為常態分配單峰曲線，發生時段落在每日 8 時至 18 時間，中午 13 時為最高好發時段。

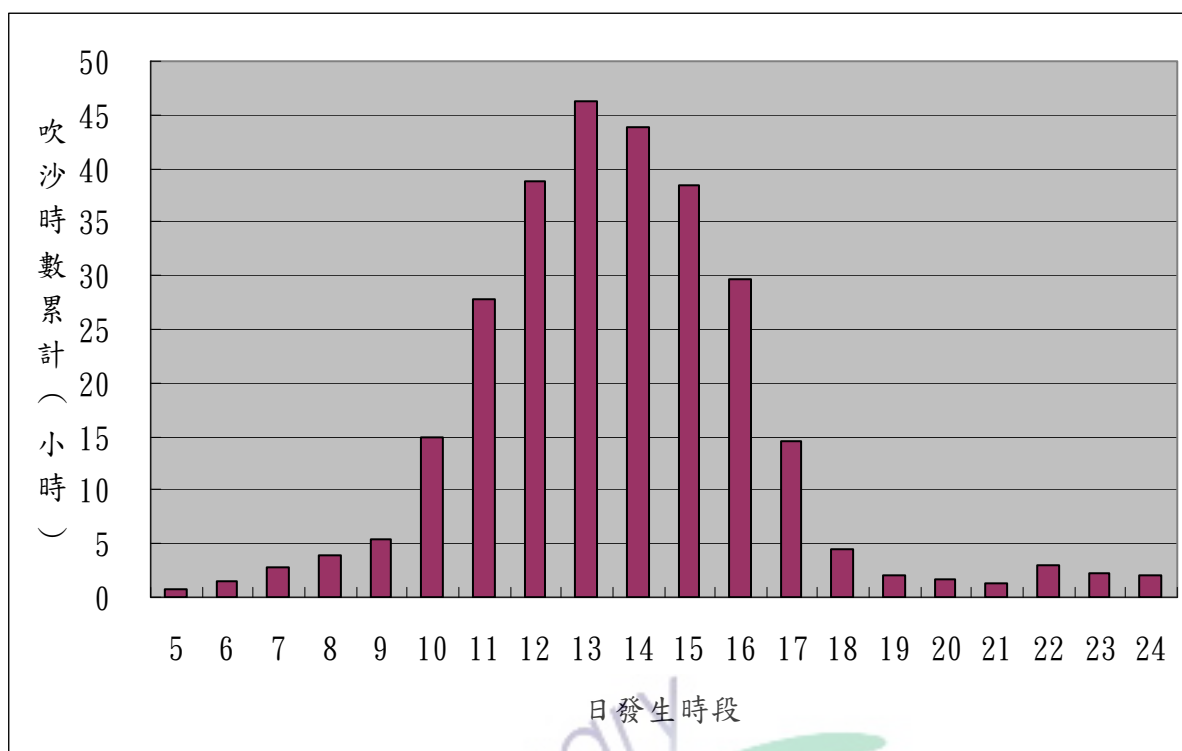


圖 4-6 民國 88 年至 97 年發生風吹沙天氣時空頻率

由 89 年至 97 年止，臺東市風吹沙次數統計、風沙優勢風向、風吹沙月份統計及風吹沙好發月份，分析臺東市風吹沙主要優勢風向分佈在東北方向，發生次數達 53 次，次要風向分佈在西南方向，發生次數也達 21 次之多。臺東市風吹沙好發期常態分佈在 6—11 月間，全年風吹沙主要好發月份在 10 月，發生頻率達 20 次之多，風吹沙防治作為應在好發月份之前，針對優勢風向（東北風及西南風向）完成相關佈署，好發季節即能發揮防治功能；另針對風沙調查，亦能規範相關工作期間，實際抽樣試驗得到相關數據資料。

由卑南溪河口段 89 年至 97 年間風吹沙天氣發生時空頻率統計圖表，歷年風吹沙主要發生時段在中午時間，出現頻率及時數最多，整體發生風吹沙時空頻率走向近似單峰常態分配曲線，吹沙時空關係常態分配於早晨 8-9 時至下午 6 時左右，中午 12 時至下午 15 時間為最高發生時間，此時河川內日照充足，陽光直射，紫外線強，河川沙灘地地面溫度急驟增加，若遇峰面過境或季節強風，即容易發生風吹沙現象，此結果與沙塵起動機制條件相吻合；從氣象資料分析探討，風吹沙發生時間以中午時段為最多，溫度對臺東地區風吹沙的形成之氣象因子具有相當重要關連性。

颱風劇烈氣象影響臺東風吹沙關係顯著，颱風侵台路徑依據中央氣象局颱風資料分析顯示，如圖 4-7，颱風侵台路徑劃分為十項路徑，其中又以由臺灣南部海面向西或向西北進行之第五類路徑，颱風發生侵台機率最高，統計中央氣象局颱風侵台資料，在過去 108 年期間，總計發生西進侵台颱風有 89 次之多，佔所有侵台颱風總數的 19.57% 強，其次為通過臺灣北部海面向西或西北進行之第一類颱風，發生頻率有 62 次，佔所有侵台颱風總數之 13.48%。卑南溪風吹沙現象，由本研究資料顯示，又以西南風、東北風等風場最易引發臺東市風吹沙狀況；而影響之東北風天氣系統由本研究氣象因子分析顯示，可由颱風或熱帶低壓環流所引發；西南風則可來自南方暖流鋒面及颱風或熱帶低壓等引起；而西風、西北風、東風主要來自颱風環流影響。

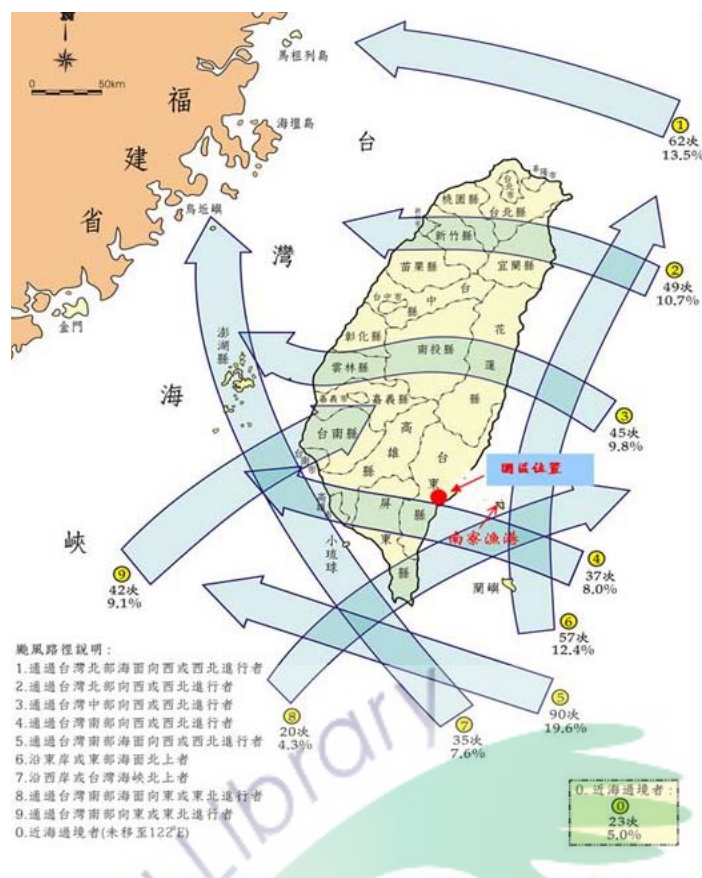


圖 4-7 颱風侵臺路徑圖 (摘自中央氣象局)

4-2-3 河床沙源與市區風吹沙關係比對分析

卑南溪流域地質組成，依卑南溪及其支流流經地層及其組成特徵分析資料顯示，卑南溪下游流經利吉斷層帶，該斷層由巨厚泥岩組成，地質乾旱，水土保持不易，土壤沖刷嚴重，每遇豪大雨或颱風豪雨，常為卑南溪河口帶來豐富的懸浮泥質沈積物；這些巨厚泥岩層所產出的泥質沈積物，在夏季洪水期高水位時被攜帶至卑南溪河口一帶，漂浮在河床高低灘地上，並隨著洪水的消退而慢慢堆積下來，當水量逐漸消退、水位下降至一般正常水位時，這些在高灘地上的河床泥質細塵微粒逐漸乾枯裸露，鬆散泥質微粒可能常成為秋冬季枯水期間，東北季風或夏秋冬季節強風或颱風環流影響，造成臺東市區嚴重風吹沙災害的沙塵主要來源之一。

卑南溪口砂泥質礦物成份，由經濟部水利署第八河川局採樣分析如第二章參考文獻 2-6 節附表 2-15 及 2-16，2008 年 3 月 14 日對河床砂泥質礦物組成份調查，資料顯示河口段砂質礦物組成，如圖 4-8，最主要成份為板岩屑，平均約佔 53% 比例、次要組成分為石英，平均約

佔 37%，再其次為粉砂岩屑和方解石等。泥質成分中的主要成分是伊萊石，平均約佔 61%比例，其次是綠泥石平均約佔 27%，再其次是石英和長石等，如圖 4-9；其中伊萊石和綠泥石主要是化學風化的產物。河床質礦物組成調查資料顯示，本區段河床質礦物組成最主要為板岩屑，在各樣品中的比例，介於 9~50%，平均約 31%。次要的成分是石英，平均約 26%，再其次是粉砂岩屑和伊來石、綠泥石，其餘的成分均屬少量。

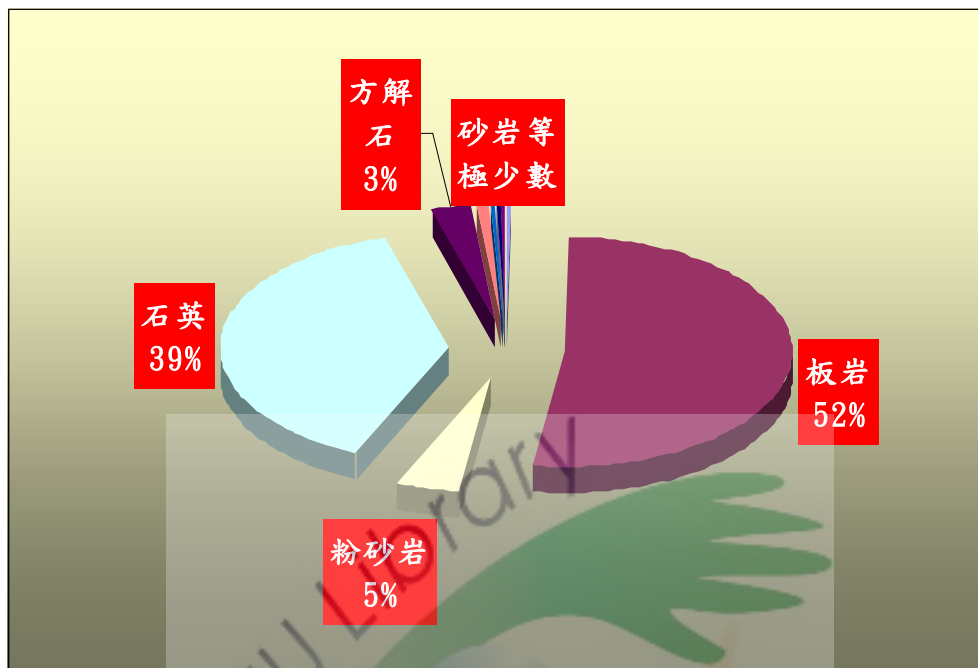


圖 4-8 河口段沙質礦物成份比例圖

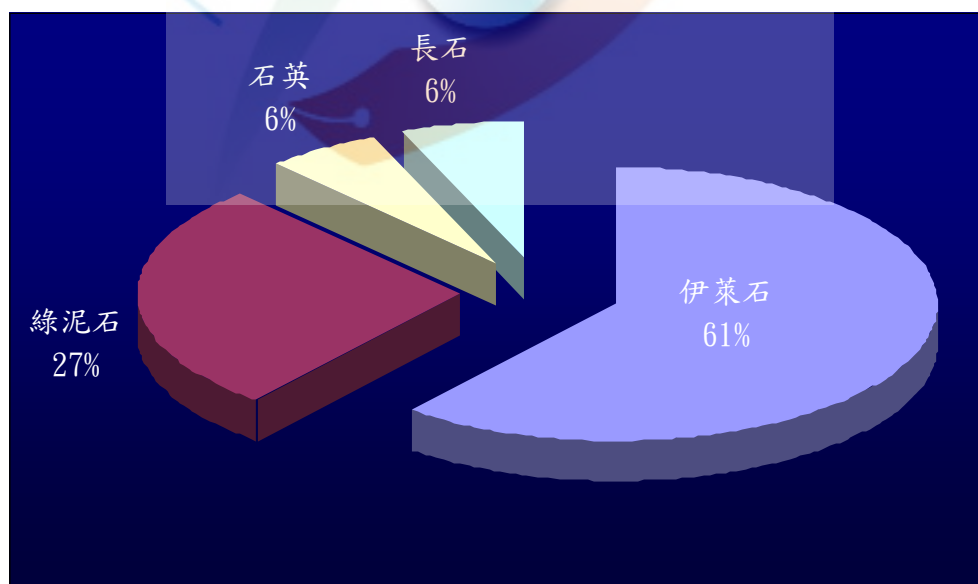


圖 4-9 河口段泥質礦物成份比例圖

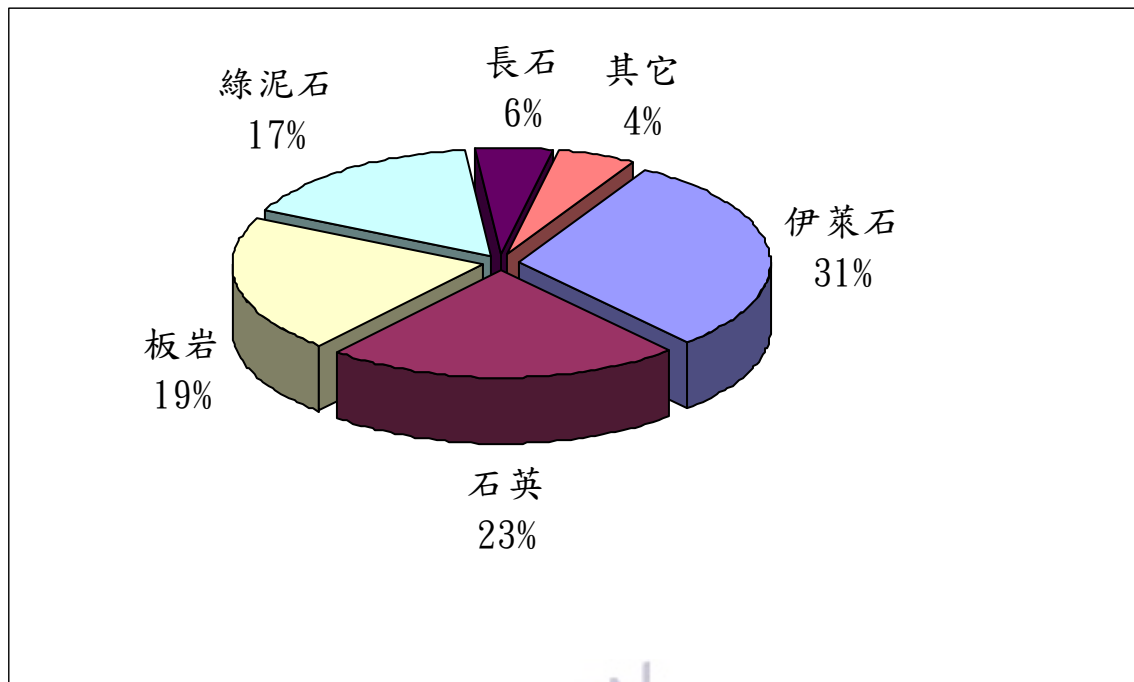


圖 4-10 臺東市區落塵微粒礦物成份比例圖

臺東市區落塵粒徑與泥沙比調查分析，由臺東縣環境保護局及經濟部水利署第八河川局臺東市區定點落塵調查資料，研究顯示臺東市區落塵之中值粒徑(D₅₀)，除馬蘭國小落塵收集粒徑為 0.155 mm 較大外，其餘各落塵收集點粒徑大致分佈在 0.062—0.107 mm 間；在含泥量調查方面，除新生國小、公東高工與馬蘭國小等之含泥量約 28.33%—44.05% 偏小外，其餘大致多分佈在 36.79%—59.13% 間。由臺東市區懸浮微粒礦物成份資料，研究顯示臺東市區懸浮微粒礦物組成，如圖 4-10，最主要成份為伊來石，在樣品中的比例，平均約 31%。次要的成分是石英，平均約 23%，再其次是板岩平均約 19%、綠泥石平均約 17%、長石平均約 6%，其餘成分則占極少量。由卑南溪河口段河床泥質採樣資料比對分析，泥質微粒主要成份為伊萊石，所佔比例約 61%、次要成分為綠泥石，所佔比例約 27%、其他成分為石英及長石等，分析臺東市區落塵懸浮微粒成份與卑南溪河口段泥質沙塵採樣分析，研究比對結果，沙塵微粒質性相類似，主要礦物成份均為伊來石、石英及綠泥石等，研判臺東市區懸浮微粒來源與卑南溪河口段泥質微粒關連性明顯。

4-3 歷年風沙治理方法分析及探討

臺東風沙問題砂源主要來自卑南溪河道內之細粉塵，與國外沙塵暴砂源發生在沙漠地區或海岸地區有所不同，粒徑大小也裴異，風吹沙成因與卑南溪豐枯流量懸殊，枯水季節或是有颱風來襲，熱帶氣旋，加上連續多日乾旱無雨、土壤乾燥又遭遇強風吹襲，就易造成臺東市區嚴重的風吹沙災害；風吹沙防治困難度高，溪水豐枯流量懸殊，乾旱季節，河道內植生

不易，颱風期間河道內鋪設之風沙防治工法如稻草蓆、攔砂籬、防風樹種及滯水土堤等，又極可能遭到強勁洪水的破壞，未來防治策略需要再研究及評估，以確定防治功效。

4-3-1 治理成效之評估方式

一、定點落塵觀測

1. 由臺東市區落塵調查分佈圖，於卑南溪出海口右岸堤防上、卑南溪中華大橋上游右岸處堤防上、利吉水利公園間、復興國小與臺東海岸間，規劃設置落塵氣象監測設備，進行長期間卑南溪河口段及臺東海岸間風沙落塵、風速、風向、氣溫及雨量等數據資料監測蒐集，以提供卑南溪河口段或臺東海岸間飛沙揚塵評估依據。
2. 另為充分瞭解河口段飛沙揚塵不同防治策略工法施行前後，臺東市區懸浮微粒濃度值變化情形，在風沙揚塵好發期間前，在臺東市區內各定點落塵收集點，繼續針對臺東市區落塵懸浮微粒、風速、風向、相對濕度、氣溫與雨量等監測，配合河床沙灘地溫濕度、含水量、摩擦風速等揚塵氣象資料，分析比對防治策略施行前、後，飛沙揚塵抑制情形，以提供卑南溪飛沙揚塵治理成效評估。
3. 由臺東市區落塵懸浮微粒礦物成份及粒徑分析，臺東市區風沙災害主要粒徑分佈在0.062mm至0.107mm間之細微塵土，在沙塵運動模式為懸浮運動，為瞭解卑南溪河口段風沙揚塵捲揚實際分佈空域高度、塵粒細度等資料，以提供實際治理策略研擬參考，於臺東大堤、卑南大堤右岸設置垂直空間懸浮微粒收集器，以利治理工法及防治成效評量。

二、不定點落塵散佈範圍監測

1. 按本研究臺東市區落塵分佈，由東南方向西北方向遞減模式，為充分瞭解卑南溪飛沙揚塵平面散佈範圍與抑制情形，以供飛沙揚塵治理成效與後續改善參考，擴大臺東市區與飛沙揚塵河床間，進行不定點落塵散佈範圍數據資料監測，同時依據落塵監測所得數據資料，分析臺東市區平面落塵散佈範圍。
2. 於風吹沙好發秋冬季及颱風侵襲前，施放低空氣球，配合裝置GPS衛星定位系統，追蹤卑南溪口與臺東市區間氣流分佈狀況，拍攝卑南溪與臺東市區揚塵分佈情形，以瞭解研究全區域之風沙揚塵平面分佈狀況。

4-3-2 卑南溪河口段風沙防治作為及效益分析

卑南溪河口段以往風沙防治工法及策略，由近年來臺東縣政府與行政院環境保護署、經濟部水利署第八河川局等機關，曾嘗試利用種植防風樹種、機械引水噴灑、土堤築高加強坡面植生、加寬水域等之水覆蓋及綠覆蓋等方法，進行飛沙防治，分析探討如后：

一、河口段試辦水覆蓋、綠覆蓋防治作為

90 年執行「卑南溪河口段河川保育及景觀復育」，計畫辦理石山堤防前高灘地整理、中央浮覆島原生植生、水覆蓋工程、臺東大堤前坡綠美化。設計原則採水覆蓋、綠覆蓋方案。計畫經費 2,500 萬元。 91 年度執行「卑南溪出海口河段河道整理」，水覆蓋 668 公尺，綠化植生 18,365 平方公尺。 92 年度執行「河川環境管理維護」，水覆蓋 300 公尺。 93 年度執行「卑南溪口段河川環境改善」，水覆蓋 1908 公尺。 94 年度執行「卑南溪石山堤段河川環境改善」佈設防沙塵滯水工 3 處，防治作為、花費經費及執行後現況如表 4-6。

表 4-6 河口段試辦水覆蓋及綠覆蓋防治作為一覽表

年	名 稱	經費(元)	工程內容	執行現況
91	卑南溪出海口河段河道整理工程	2,494,243	1. 水覆蓋帶工668公尺。 2. 綠化植生18365平方公尺。	92年9月杜鵑颱風，水覆蓋、綠覆蓋工程幾乎全毀。
	卑南溪臺東大堤前坡及丁壩植生定砂工程	2,714,000	1. 臺東大堤樁號(1+300~2+600)前坡植培地茅7800公尺、共6排。 2. 樁號(2+900~4+100)植蔓荊4840株。 3. 植百喜草12262平方公尺。 4. 樁號(1+300~2+600)植扶桑花2600顆。 5. 丁壩植生15座。	
92	卑南溪石山段景觀改善工程	7,382,243	1. 石山堤防水防道路改善1578公尺，植喬木223株，灌木635株。 2. 中華橋上游一千三百公尺處，完成兩座寬16公尺，長180公尺涵水石堤，增加水覆蓋裸露河床面積約10公頃。並利用地形施作高灘引水路800公尺、五座滯水土堤，以引水漫溢裸露河床。並於中華橋下埋設臨時噴水管，於東北季風時噴水減少部分揚塵。	93年敏督利、蘭寧及艾利颱風洪流淹沒河灘地，水覆蓋、綠覆蓋工程幾乎全毀；卑南溪出海口泥塵裸露。
93	卑南溪河口段河川環境改善工程	12,624,525	1. 製作水覆蓋帶工1908公尺水覆蓋裸露河床面積約40公頃及引水路漫流河床。 2. 中華橋上游施辦稻草蓆覆蓋工法，覆蓋面積約1.5公頃。	94年海棠、馬莎、泰利等颱風侵襲，水覆蓋、綠覆蓋工程幾乎全毀，並將上游沖刷的泥漿淤積在卑南溪出口的河床
94	卑南溪石山堤段河川環境改善工程	6,459,181	1. 於中華橋下游左岸，完成蓄水土堤，增加水覆蓋裸露河床面積約40公頃。 2. 中華橋上游施辦稻草蓆覆蓋工法，覆蓋面積約1.5公頃。	已損毀殆盡。
95			1. 防砂塵滯水工3處。	
96 97	卑南溪河口段環境改善	13,560,000.	試辦水幕防治風沙，新設29組噴水系統、加壓輸水7組、預警監視系統等	施工中

資料來源：水利署第八河川局

90 年—95 年度執行「水覆蓋、綠覆蓋風沙防治工法及策略」，工法完成後一定期間內，風沙防治執行成果確實良好，如圖 4-11 至 4-15 影像驗證：



圖 4-11 卑南溪石山堤防高灘地生態復育-水覆蓋及綠覆蓋



圖 4-12 卑南溪臺東大堤前坡景觀與植栽-綠覆蓋



圖 4-13 卑南溪中華大橋下游水覆蓋



圖 4-14 卑南溪石山堤防高灘地生態渠道-水覆蓋及綠覆蓋



圖 4-15 卑南溪石山堤防高灘地生態池-水覆蓋

水覆蓋及綠覆蓋執行後效益評估：

1. 90 年於河床內施作水覆蓋及綠覆蓋工程，完工後區域內風沙防治發揮一定功效，惟 92 年 9 月杜鵑颱風侵台，水覆蓋及綠覆蓋工程幾乎全部遭洪水沖毀，花費計畫預算 2,500 萬元，效果僅維持約一年時間，洪水天災無法預期，風沙防制成本 68,493 元/天。
2. 92 年—94 年間水覆蓋工程，於每次工程完工後即遭逢 1 場大洪水，執行成果全遭受沖毀，卑南溪河口地區地形變化相當劇烈，且於大雨或豐水期間充沛之水流沖刷河道，出海口河道變遷相當頻繁，其中 94 年受海棠、泰利與龍王等強烈颱風影響上游沖下大量土石，河口近岸地區之水深地形侵淤幅度高達 22 公尺。因此往昔植生、覆蓋方式防治策略，於高灘地或尚能維持防治效果，對佔有極大面積之低灘地，其植生或覆蓋物則盡流失或被溪水帶下之砂土掩埋覆蓋，風沙防治功效歸零，風沙防制成本 21,694 元/天。
3. 綜合考量每年花費在防風沙滯水土堤工程均耗費政府預算不貲，且維持成效不長，為避免貿然施作防治工程，造成相關之資源浪費，破壞河川生態，未來再辦理類似工程時，需再詳細研究評估整體經濟效益及環境影響。

二、河口段試辦水幕防治作為：

96 年—97 年度執行「卑南溪河口段環境改善」，計畫採行噴水幕防治工法，96 年度計畫經費 510 萬元、97 年度計畫經費 846 萬元，計畫內容為：1. 新設抽蓄水系統 7 組。 2. 新設加壓輸水系統 7 組。 3. 新設噴水系統 29 組。設計風沙防治構想為利用抽水噴灑，使風沙含水，增加其重量，減低其飛行能力，來達到防止砂害之目的，並改善歷年於河道內執行之防治工作，每遇洪水即遭沖毀，功效盡流失，檢討以往防治工法缺失後，於堤頂試辦水濺幕防治風沙作為。



圖4-16 卑南溪河口兩岸堤防高壓噴水幕裝置

水幕防治執行後效益評估：

1. 新設高壓噴槍噴水，製造水濺幕效果，攔截約 20 公尺空域懸浮微粒落塵，具一定防塵效果，惟遭遇強勁東北季風時，水柱不敵強勁風力折腰，損失有效攔截沙塵高度，但低層空域減塵效果明顯。
2. 歷年於河床以水覆蓋、綠覆蓋防治策略，每遭遇洪水侵襲，佈設防塵效果大減，成效盡失，工法成本昂貴，且易破壞河川生態，檢討後於堤防上新增設高壓噴水製造水濺幕工法，防塵策略永久，且設施不易遭洪水天災損毀，每年電費平均支出 230 萬元，風沙防治成本低廉，平均約 6,500 元/天，較水覆蓋及綠覆蓋等防治工法經濟。
3. 堤頂高壓噴槍噴水防治風沙，依現況調查有效防治沙塵平面距離約 30 公尺—40 公尺間，卑南溪河口段河寬達 2200 公尺，對河床中高低灘地飛沙揚塵，力有所不及，並

依據本研究結果，臺東市區風沙災害主要為細塵土，河床中細塵土於起動後即捲揚垂直分佈，隨導引氣流揚升，噴水製造水濺幕僅及低空區域，風沙防塵效果有所不足。

三、河床蓆覆蓋及堤前坡綠覆蓋防治作為：

風沙防治採行對策：1. 堤前坡種植防風林牆 2. 河床裸露地覆蓋稻草蓆及綠覆蓋沙灘裸露地。計畫構想：於河床裸露地覆蓋稻草蓆、植栽馬鞍藤、牧草及培地茅等綠化植栽，並於卑南溪右岸堤防坡面上以綠化堤防之經營方式，種植苗木，形成多道防風林牆，阻截沙塵進入，以降低臺東市區風沙災害。計畫內容：臺東大堤前坡種植 7000 棵相思樹及木麻黃樹苗、河床裸露地覆蓋稻草蓆及綠覆蓋 12.5 公頃。91 年及 96 年風沙防治計畫執行如表 4-7、圖 4-18：



圖 4-17 卑南溪右岸臺東大堤前坡綠化植生防風林牆現況

表4-7 河床蓆覆蓋及堤前坡綠覆蓋等風沙防治一覽表

年	名 稱	經費(元)	工程內容	執行現況
91	農業局試辦	自辦 未統計經費	中華大橋上游植馬鞍藤2公頃。	92年杜鵑颱風侵襲，植栽被摧殘，植被沖失。
92	農業局試辦	自辦 未統計經費	卑南溪出海口栽植馬鞍藤2公頃。	93年敏督利、蘭寧及艾利颱風洪流淹沒河灘地，卑南溪出海口泥塵裸露。
93	農業局試辦	約250,000	中華橋上游施辦稻草蓆覆蓋工法，覆蓋面積約1.5公頃。	94年海棠、馬莎、泰利等颱風侵襲，被沖失殆盡。
94	臺東縣卑南溪 臺東大堤裸露 地綠化	4,513,000	中華大橋卑南溪右岸堤防坡面植栽。 臺東大堤前坡種植7000棵相思樹及木麻黃樹苗。	迄至96年6月仍繼續成長。
96	臺東縣卑南溪 河床裸露地揚 塵改善	6,850,000	中華橋上游施辦稻草蓆覆蓋工法，覆蓋面積約20公頃。	臺東縣環保局位於博愛路東檢站及局本部之二處空氣品質人工監測站經測得落塵量96年1-6月平均值分別為2.83、3、5.2、1.86、3.1、2.4，與95年1-6月同期數據14.95、36、27.2、23.5、8.97、9.52相比較，顯示鋪設稻草蓆有發揮揚塵抑制的效果。遇降豪雨或溪水暴漲時，披覆於河床之稻草即為溪水所沖走。

資料來源：臺東縣政府



圖 4-18 河床蓆覆蓋及綠覆蓋風沙防治

蓆覆蓋及堤前坡綠覆蓋防治作為後成效評估：

1. 卑南溪裸露河床鋪設稻草蓆及綠覆蓋工作後，96 年由臺東縣政府頂樓落塵收集站檢測落塵結果，較去年減少約七成，臺東縣環保局博愛路東檢站及環保局本部空氣品質監測站測得 96 年 1-6 月落塵量 (PM₁₀) 平均值分別為 2.83、3、5.2、1.86、3.1、2.4，與 95 年 1-6 月數據 14.95、36、27.2、23.5、8.97、9.52 相較，臺東縣環境保護局提出數據資料顯示，溪床裸露地鋪設稻草蓆有發揮風沙揚塵抑制效果，平均減少落塵效果達八成，效果顯著，並且覆蓋之稻草蓆以石頭固定，預計 6 個月後稻草腐爛成養分，植物種子就會生根成長，長期可抑制河床風沙飛揚情形再度發生。

96 年 1-6 月落塵量 (ug/hr)	2.83	3	5.2	1.86	3.1	2.4
95 年 1-6 月落塵量 (ug/hr)	14.9	36	27.2	23.5	8.97	9.52
減塵效果(ug/hr)	12.1	33	22	21.6	5.87	7.12
減塵效率 (%)	81%	92%	81%	92%	65%	75%

2. 蓆覆河床裸露沙灘地，臺東市區懸浮微粒落塵約可減少八成，但其長期防治成效頗受天災洪水影響，一旦遭遇颱風洪水就全部化為烏有，被水沖走的稻草蓆還可能會成為河床及海岸的垃圾，造成二次環境污染。若估算蓆覆蓋一年有效防治期，則平均風沙防治成本約 18,767 元/天，成本較水濂幕稍高，但成效評估則有待水濂幕工法完成後檢測落塵數據相比對。
3. 堤前坡綠覆蓋，依本研究臺東市區風沙災害為細塵土，河床捲揚後隨氣流導引上升，較粗粒子滾動跳躍，遇卑南溪河水即流失，所以堤前坡植栽減塵作為僅及 1 公尺上下之沙塵攔截效應，防治沙塵效果由現地勘察均無沙塵累積，研判防治沙塵效果並不明顯。

4-3-3 其他縣市風沙防治作為及效益分析

一、跳島式植生工法：

行政院環境保護署過去為抑制河川揚塵，曾經嘗試有水覆蓋、噴水設施、礫石覆蓋、稻草覆蓋、種植植物等工法，但是在豐水期、或是颱風過後就遭河水沖走破壞，河砂不易堆積連帶植物無法生長，抑制效果有限。為抑制河川揚塵，環保署今年在濁水溪下游嘗試運用「跳島式植生工法」（小面積架設防風網和種植植物），一公頃約僅需花費五萬元經費，也能發揮有效定沙、堆沙功能，和鋪稻草一公頃需要二十到三十萬經費相較，成本經濟許多。但環保署也坦言說明各項工法應該因地制宜，使用這些方法，不過都只是治標而已。長期治本而言，仍需作好河川治理及山坡地水土保持等工作。今年環保署在濁水溪畔試辦「跳島式植生工法」，從雲林縣莿桐到西螺，選定 7 個揚塵情形特別

嚴重的地區，架設與東北季風風向成 70—90 度，張起一面面高 1 公尺、長 10 公尺、網眼密度百分之五十的攔沙網。經過 4 到 5 個月觀察，發現每面攔砂網前方可自然形成長 1 公尺、後方則堆出長 5 公尺沙丘。由環保署跳島式植生示範區之資料顯示，所攔截下來的砂量足足有 35—52 立方公尺，約可裝滿 5—7 台 21 噸的大型砂石車。這些原本要飄到空中的砂塵，被攔截下來後形成的沙丘，一段時間後，即有草種自然落下，生根成長；若自然植生不足，再輔以人工加強種植，如預期都可發揮良好的防風定砂功效。如以 97 年施工成本估計，一平方公尺約只需要 5 元，僅為稻草覆蓋工法的 1/2 或 1/3 經費；加上若颱風來襲，防風網可以在河川流量增大之前拆除收起，等到乾早期繼續佈設利用，收起便利、移動方便，並可重覆一再使用，經濟效益頗佳。因環保署檢驗試辦成效良好，環保署表示將繼續推廣「跳島式植生工法」到國內另 5 條河床裸露較嚴重的河川，如大甲溪、大安溪、高屏溪、卑南溪、花蓮溪等河川試辦。期望能讓河川恢復自然生態，待河床長滿芒草、蘆葦時，沙塵飛揚的情況即將消失不再。跳島式植生法讓河床發揮自然植生能力，再透過人工種植，補足自然植生之不足，充份利用河川自然條件，來營造定砂及防塵效果，操作容易又經濟，且無二次污染問題。



圖 4-19 跳島式植生工法防風定砂場景（圖片摘自行政院環境保護署）

二、澎湖地區防風定砂研究

澎湖地區每年入秋後，東北季風盛行，農夫慣用之蜂巢田式防風定砂工，現地礁古石料充足，就地取材，防風定砂且與週遭環境景觀搭配，並符合環保原則，經濟又實惠。



圖4-20 澎湖地區的「蜂巢田」防風定砂工（摘自水利署苗栗海岸復育研究）

三、苗栗海岸防風定砂採用工法：

1. 截砂溝工法：製造氣流旋渦方式來防風定砂。



圖4-21 截砂溝防風定砂流場示意圖（摘自水利署苗栗海岸復育研究）

2. 防風柵欄工法：構想以部份阻隔，降低風速及氣流的搬運能力，而將風砂阻擋下來防風定砂，樣式有多種，圖片如后。



圖4-22 木製防風柵欄（摘自水利署苗栗海岸復育研究）



圖4-23 波浪式鋼板防風柵欄（摘自水利署苗栗海岸復育研究）



圖4-24 尼龍網防風定砂（摘自水利署苗栗海岸復育研究）

3. 草方格植生工法：針對不同風向，構想以降低地表風速，削弱風沙流活動，以耐旱植物防風定砂，環境復育。



圖4-25 草方格防風定砂（摘自水利署苗栗海岸復育研究）

四、他縣市風沙防治作為成效評估：

跳島式植生工法，由行政院環境保護署濁水溪示範區試辦所攔截下來的砂量 52 立方公尺數據資料，及被攔截下來後形成的沙丘有利草種自然落下生根成長，發揮良好的防風定砂功效，制風沙於揚起前，工法成本低廉，約為稻草覆蓋法的 1/2 或 1/3，可以在卑南溪河口段裸露試辦評估；其他「蜂巢田」防風定砂工法、木製防風柵欄工法、波浪型式之鋼板防風柵欄工法，因工法成本高昂且有抵觸水利法「不得有妨礙水流之行為」疑慮，因地制宜，僅適用於海岸風沙治理參考，不適用於卑南溪河口段。另依據行政院農業委員會林務局集水區治理組針對防風網防風定砂實測資訊，防風柵網孔徑愈小，防風效果愈佳，但孔徑太小則易造成砂鹽阻塞現象，實測後建議採用柵網時，孔徑以 0.5 公分為宜，而整體防風效果則以設置透風率為 30% 至 40% 間之防風柵網為最佳，上列

資訊可供跳島式植生工法防風網佈設參考。

4-3-4 不同思考模式風沙防治作為

一、利用風力替代方案

利用風力渦輪作為風阻，有效降低風速對土壤的侵蝕，可在短期間內替代大型樹木產生風阻。在計劃的地區搭建風力渦輪機組減緩風速，並大大地減少土壤因風蝕而導致流失的情況發生，又同時提供降低當地對火力發電的依賴，大幅減緩了以木材為燃料而對森林所造成的壓力，再生綠能源符合環保，造成雙贏的局面。



圖 4-26 利用風力防風替代方案

二、水庫淤泥定沙工法

水庫淤泥在砂灘地表面形成一層護甲，藉此防止風蝕沖擊，並改善砂灘地含水能力。裸露砂灘地淺根植物，在種子發芽初期，可由水庫淤泥中吸取足夠水分並得以定植，隨後再利用原根系發展出淺層根系，進而固結進行深根植物的移植，如此逐一增加利用淺層至深層根系固結的砂灘地土壤深度，藉此改良砂灘地之土壤性質，使砂灘地得以有效利用。由學者專家試驗結果顯示，當水庫淤泥之泥水比在濃度 1:1 及 1:2 之間存在一「臨界濃度」，使得泥漿在砂灘地表層容易形成一層護甲，除了增加土壤含水性，有利植物定生外，並可保持平衡砂灘地之地表溫度，保護砂灘地植物種子。但由於水庫淤泥中的黏土顆粒在水分子中受布朗運動及凡得瓦爾力的影響遠大於重力的作用，故在應用時如何在最低成本的考量下，將泥漿均勻分布在砂灘地上，將是未來應用上的重點。植物本身因具有固結土壤及機械補強之作用，可阻止砂灘地表土流失及風蝕的繼續進行，對於伴隨強風的砂灘地具有良好的定砂效果。然而受到強風的影響，若要在砂灘地上進行大面積灑種繁殖的做法，必須有效抑制風吹走砂及防止水分過渡蒸發。利用泥漿微噴灌濕

潤灌溉及地下灌溉技術的配合，以保持砂灘地含水定砂，首先利用泥漿水微噴灌在砂灘地表土形成表層土固結，避免風蝕，接下來進行大面積灑草種，待草苗長成後，再利用原根系發展出的淺層根系土固結進行深根植物的移植，如此逐一增加利用根系固結的砂灘地土壤深度，藉此改良砂灘地之土壤性質，使砂灘地得以有效利用，並達防風定砂功效。

三、化學固砂法

一種可被生物分解的聚合乳劑，亦稱為土壤穩定劑，使用方式如在地面灑水，在流動砂面上噴灑化學黏劑，它能深入土壤，使在砂面形成覆蓋層，或滲入表層砂中，乾燥固化後變完全透明，留下地表原色，能抑止2.5微米以上大小塵粒，耐日曬雨淋，把鬆散砂粒黏結起來形成固結硬殼，以防止風力對砂粒的吹揚和搬運，進而達到固定流砂，防治砂害的目的。化學固砂雖然收效快，但成本高是其缺點，一般多用於風沙危害能造成重大經濟損失地區或國防軍事飛安要求的地區，且經常和植物固砂相互配合使用。

四、水霧降溫減塵法

風吹沙天氣主要為大氣邊界層處於不穩定狀態，強大氣流及持續高溫天氣，促使地面輻合上升運動增強，氣壓梯度和溫度梯度明顯增大，熱對流旺盛所引起，故有水霧降溫、減塵等構想，由林信輝與江永哲(1979)以後龍沙，在風洞內進行不同含水率時之飛沙量試驗，在含水率少於1.2%時，飛沙量近似相同，介於1.2%與2.1%之間，飛沙量隨含水率增加而急遽減少。亦即說明除非在極大風速下，否則水分含量大於15bar (2.85%)含水率時，不易風蝕。含水率與始動風速關係，指出砂體含水率增加時，其起動風速亦隨之增加。

南非使用間歇式噴霧法以降低農園之溫度，經過試驗一分鐘的噴霧時間對降溫較有效，持續的間歇噴霧能導致農園溫度迅速下降。美國華盛頓州立大學利用噴霧降低農園溫度所使用的水量以每公頃每秒6公升以上效果較佳。在晴朗無雲氣溫達到40℃的條件下每公頃每秒噴6.25公升的水霧可以保持農園溫度接近所選擇的溫度範圍。日本2008年夏天熱到不行，大阪8月的平均溫度高達攝氏29.9度，為了避免民眾中暑，當地政府在街頭裝置許多噴灑水霧的龍頭，讓路過的人頓時暑意全消，水霧在鬧區降溫的成效良好。日本大阪大學實驗，在一棟無人居住的公寓進行實驗，結果發現裝了水霧的房間，溫度比沒有裝的低了攝氏1.5到2度。根據大阪水利局的估計，如果用水霧在室內降溫8小時，大約需要消耗120公升的自來水，費用大概三塊多台幣，可是，噴灑水霧之後冷氣的用電量就減少許多，省下大筆的電費，水霧對降溫減塵不失為一種好方法。2007年12月11日台北市消防局在民權東路、成功路口訓練中心進行台灣第一場立體水霧消防演練，傳統搶救方式運用直線水柱進行滅火，1cc的水只能吸收1卡的熱量，新式立體水霧滅火1cc水汽化成水蒸氣則可以吸收五百四十卡熱量，減

火效率是傳統搶救的五百四十倍，水霧降溫效果明顯。且水霧當其沉降速度與設施內部之氣流達到平衡狀態時，則會產生浮游現象，尤其適合卑南溪河幅寬引用。國立宜蘭大學細霧與微霧應用系統，透過組合式微霧噴頭及搭配組合式高壓噴霧管，經實際測試微霧系統不僅可以使用在降溫上亦可利用微霧溼度控制來防塵與防止靜電產生。

4-4 卑南溪河口段風吹沙防治策略

4-4-1 短期風沙防治策略

本研究依據卑南溪河口段氣象、水文狀況、沙灘裸露地懸浮微粒、地理環境等調查資訊，及季節性變動特性，綜合研擬卑南溪河口段風沙防治短期策略：1. 治風沙於揚起前； 2. 河床保水植生； 3. 風場破壞； 4. 沙源阻截等4項短期策略，說明如后：

策略1. 治風沙於揚起前：

砂粒運動本身複雜多變，且運動尺度範圍極大，受粒徑大小影響分為滾動、跳躍、懸浮等類型，本研究河口段風沙運動態樣，實地勘察結果發覺亦相同情形，但由臺東市區風沙災害樣本分析資料，研究結果顯示為細塵土災害，與非洲及大陸沙塵暴產物砂粒等覆蓋掩埋地上物情況有所不同，由臺東市區落塵資料分析與河川採樣資料分析，臺東市區風沙災害主要粒徑分佈在0.062mm至0.107mm間，含泥量在36.79%至59.13%間與河口段砂質約佔99.4%、泥質僅佔約0.6%，差異懸殊，本研究顯示河川區砂質粒料滾動及跳躍運動至卑南溪主流河道，即因水流及河道寬幅而流失中止，並可從臺東大堤前坡植栽苗木均無砂塵覆蓋跡象取得印證，臺東市區風沙災肇因於泥質懸浮微粒，其運動搬運型態主要為懸浮，所以在卑南溪風吹沙治理觀念上應從懸浮運動制止著手，也就是治風沙於揚起前，防治作為與大陸等沙塵暴治理應有所差異。以此觀點在河床內裸露沙灘地植生應優先於堤防外下風處防風林種植為重要，限於機器設備及軍用機場航道管制，尚待進一步研究調查卑南溪河口段風沙垂直分佈狀態情形，證明本研究是項觀點，惟於現地歷次觀察沙塵隨氣流漂散情形，發覺河中浮島高灘地及堤防發揮有類似機翼及跑道效應，沙塵除了隨幅合上升氣流捲揚上升外，更借助河中浮島及臺東大堤1:2堤前斜坡助力揚升，遠處觀查直接判斷風沙揚塵高度大於卑南溪南岸防風林木麻黃樹高，防風林攔截沙塵功效大減，故治理卑南溪風沙災害應於揚起前，應著重於河床內植生及增加裸露沙灘地力學性質，抵抗風蝕，以改善臺東市區風吹沙災害。

卑南溪河口段風沙問題可分為風吹沙、揚塵兩部份，風吹沙主要分佈在高度約 1.5m 至 2m 間之空域，粒徑多大於 $100\mu\text{m}$ 以上，揚塵粒徑則多在 $100\mu\text{m}$ 以下，以微粒型態懸浮，顆粒越小，懸浮分佈越高，隨風吹送距離也越遠；裸露灘地河床質之塵泥含量越高，揚塵越容易被風帶起，隨風吹送之揚塵量也越高。因此防治策略宜依照河床質砂、泥含量

百分比及其分佈情況，評估防治佈置方式與範圍。沙塵發生後，顆粒較大的粒子大多影響沙塵發源地或鄰近地區後，即沈降到地面，一般而言，風速及沙粒移動臨界條件是影響沙塵傳輸機制，但是顆粒較小的粒子可以向上傳送到相當於 1000 公尺至 3000 公尺高空，再藉由大氣環流攜帶傳送。在沙塵傳輸的過程中，部分的沙塵可能會因沉降作用或是受到降雨（雪）的沖刷效應而返回地面，而隨著沙塵傳送的距離愈遠，因為擴散或稀釋的關係，沙塵濃度也愈來愈低，當沙塵向外傳送到數公里外後，對當地之影響則主要為能見度降低及造成大氣中懸浮微粒增加。

策略2. 河床保水植生：

沙塵揚起主要機制為大氣邊界層處於不穩定狀態，強大氣流及持續高溫天氣，促使地面輻合上升運動增強，氣壓梯度和溫度梯度明顯增大，加速地面擾動，熱對流旺盛所引起，故水霧可有效降溫、減塵、保濕，並有利河川沙灘地植生，且由於植樹防風工程需較長時間之細部規劃施工與植生生長期；因此短期策略仍以固定噴水阻擋方法為主。有關砂含水率影響飛沙量，本研究中已諸多分析，當含水率為該土壤之 2.85% 左右時，飛沙量甚少，在風洞內進行之不同含水率飛沙量試驗中同時到證明，在含水率少於 1.2% 時，飛沙量近似相同，含水率於 1.2% 與 2.1% 之間時，飛沙量隨含水率增加而急遽減少。亦即說明除非在極大風速下，否則水分含量大於 2.85% 含水率時，不容易有風蝕現象發生。含水率與始動風速間有正向關係，砂體含水率增加時，其起動風速亦隨之增加。

河床噴水霧有主動進行治理效果，對河床降溫防治沙塵可期，由新竹縣頭前溪風吹沙試驗，0.5% 的含水即可達定砂效果，對卑南溪流量變動大、乾早期長，植物生長環境嚴苛下，河床噴水霧可長期提供河床植生草種樹苗保濕及水份供給，並且由水霧輸送沉降試驗，當其沉降速度地心引力與大氣環流之氣流達到平衡狀態時，則會產生浮游現象，對卑南溪河口段寬達 2200 公尺，噴水系統間距約 80 公尺、噴水射程約 65m，噴水減塵無法到達需要之河中裸露沙灘地，唯有以水霧方式借助大氣氣流能有效運達河中裸露乾旱沙灘地，對河床乾旱沙灘地植生提供有效水源，並提供裸露沙灘地表面含水量，增加鬆散沙塵凝聚力，進而促進沙灘地表膠結，抵抗風蝕，有效防治風沙源產生。

策略3. 風場破壞：

卑南溪河口段風域寬廣，由氣象調查資料，河口段風場調查顯示，東北風為主要風向，約佔六成、西南風向為次要風向，約佔三成；而每年風起沙揚月份約從 6 月份就開始至 12 月間，另由風沙起動機制，地表風速 2.5m/s（2.5m 高空處風速達 7.5-10 m/s，蒲福風級數 5 級）以上就能風起塵揚，由現地觀查本段風沙之主要來源為河床裸露沙灘地，其分佈範圍相當廣泛，每年在河床沙灘地進行防治工法之面積有限，因此進行防治工法之範圍可能對某一方向之風場引起的風沙具有防治效果，其他方向風場所引起之風沙則否，後續防治策略宜參考計畫風向之佈置沙灘裸露地綠覆蓋及防風網。由研究資料顯示，植生及防風網，能有效降低風速，削弱或破壞風場強度，防風設施架設，研究結果應與卑南溪風場東北風特性相連貫，配合東北季風風向成 70 度到

90 度間佈置；並由本研究發現，一層防風網定砂率達 88%，三層防風網可達 100%防風定砂，另由濁水溪跳島式植生工法試辦區資料研究發現，1 面(1 公尺高*10 公尺長)、網眼密度 50%的攔沙網前方可自然形成長 1 公尺、後方可堆出長 5 公尺沙丘，防風定砂效果相當可觀，可運用於本策略風場破壞上。

由河床裸露地風沙揚塵及氣象風向等資料，本研究認為卑南溪河口段風場破壞策略，應於卑南溪左岸上風處堤防上加強植栽防風林等木麻黃樹種種植，或於左岸堤防附近劃設 70 公尺至 150 公尺寬，帶狀防風林保護區域，以提高風場，並減低進入河床表面風速，降低風蝕發生機率；目前卑南溪河口段風沙防治均於下風處，臺東堤防右岸堤防及堤後約 50 公尺寬防風林保護區植生，攔截河床揚起之沙塵，風沙治理態樣較被動，不夠主動積極治理，且對河床揚起後之沙塵攔截效率並不理想，因此於臺東大堤右岸綠覆蓋植生防治風沙，需加寬防風林縱深、加強造林密度至 50%以上，方能主動破壞風場以提高防風效率。防風林樹種並宜選擇適合臺東當地氣候、耐海風、耐乾旱樹種，如表 4-8。

表4-8 防風林植栽樹種種類表

中文名稱	學名	成株高	特性
黃槿	Hibiscus tiliaceus L.	可達約 7m	葉子大呈心形，有長柄；花黃色，花冠鐘形，蒴果。鄉間其葉做為包裹糕餅之用，故又名「糕仔樹」，為台灣海邊防風防潮的重要樹種。國外學者將其歸為廣義紅樹林。
水黃皮	Pongamia pinnata (L.) Pierre ex Merr	可達約 6~12m	為半落葉喬木，奇數一回羽狀複葉，小葉3~7片，有柄，對生，革質，長橢圓形，長6~12公分。葉面濃綠油亮潔淨，嫩葉成淺紅色。開淡紫色花，腋生，總狀花序，花邊開邊凋落，春、秋兩季開花，一年花期兩次，4~5月、9~11月開花。果實為刀狀扁平的莢果，夏季成熟時黑褐色。抗風、耐鹽性特強，為台灣特有之優良海岸樹種。
木麻黃	Casuarina equisetifolia Forst	可達約 18m	樹冠長圓錐形，枝條展開，小枝細長而多節，每節有6~8個三角形退化的葉鞘齒狀鱗葉。雄花黃色，長在小枝先端；雌花紅色，長在側枝上。果為長橢圓形的聚合果，毬果狀，長橢圓形，果苞12~14裂。春季4~5月開花，樹性強健，耐旱，耐鹽，抗風。

河床裸露沙灘地上種植草本植物也可有效增加地表的粗糙長度，因而降低風切速度，削弱或抑制風沙的活動，唯河床流量變動大，乾旱期長，河床植物生長環境嚴苛，植生養護不易，所以宜選擇適合臺東卑南溪河口段耐乾旱、耐風蝕草種，如表 4-9：

表4-9 河床草種植生種類表

名稱	發芽適溫 (°C)	發芽天數 (日)	100g 可播種坪數	特性
百慕達草 Cynodon dactylon	20~35	5~7	3~4	為熱帶型植物，性喜強光、長日照，不耐遮蔭，具有相當優越的耐旱與耐鹽性，雖喜好高濕環境，但不耐浸水。百慕達草可適應從砂質土到黏土等各類的土質，土壤酸鹼度不拘。
百喜草 Paspalum notatum	20~35	7~10	1~1.5	屬暖地型草種，潮濕地與貧瘠地之最佳選擇，耐寒耐踐踏耐陰性佳，在樹陰、果樹下亦能正常生長。百喜草的土壤適應性廣泛，從排水良好砂質地到積水的黏重土壤皆可存活，尤其適應於質地粗糙貧瘠的海岸邊砂地，但是對於鹽分地卻不具耐性，適應的土壤 pH 範圍在 6.5~7.5 之間。
假儉草 Eremochloa ophiuroides	20~30	10~20	3~4	為熱帶型植物，雖可耐遮蔭，但在強光、長日照的環境有顯著較佳的生育反應，具有相當程度的耐鹽性，但不如百慕達草。假儉草除了砂地、石礫地外，可適應於其他黏土到砂土等各種土壤質地。假儉草在冬季低溫時，無明顯的休眠現象，極易遭受低溫的傷害。
類地毯草 Axonopus affinis Chase	20~30	7~14	2~3	為熱帶型植物，在台灣的實地觀察，可能是最耐遮蔭的草坪草種，性喜潮濕多雨，但在強光、長日照的環境有顯著較佳的生育反應。最適應於疏鬆的土壤，對於黏重排水不良的土壤則不易存活。對於低溫的耐性極差，每年台灣地區冬季東北季風來臨，較強的鋒面過後，地毯草草坪一夕轉紅而枯萎，此一現象在夏季高溫缺水時也會發生。

策略4. 沙源阻截：

卑南溪河口段季節流量變動性大，河床高低灘水線影響沙灘裸露地面積範圍、依據臺

東市區懸浮微粒與河床質微粒礦物分析資料顯示，臺東市區懸浮微粒之礦物成分與利吉層岩壁與其崩落土石區者有密切關係，為抑制利吉層裸露岩壁崩塌，減少流入卑南溪河床沙塵微粒來源，宜沿利吉橋至臺東大橋段規劃卑南溪左岸利吉層岩壁裸露區，進行邊坡基腳穩定與綠覆蓋植生、噴灌設施，培育樹木草種，加強水土保持工作，以達沙源阻截減少。

另外卑南溪沿岸砂石洗解廠廢水宜強管制，洗石水泥塵含量高，最容易提供風吹沙之沙源，宜配合臺東縣環保局加強取締洗石水直接不經過濾即排放，防制卑南溪懸浮微粒產生。

4-4-2 中長期風沙防治策略

1. 預警制度建立：

建立風吹沙早期預警機制，結合中央氣象局衛星氣象資料預報分析、激光雷達監測、懸浮微粒（ PM_{10} ）人工及自動採樣監測、水文監測、河床溫濕度監測、堤頂微氣象站建置等。由目前研究風吹沙天氣資料彙整，研究顯示，初步可認為風吹沙為：長期的乾旱無雨、河床裸露地擴大、持續的高溫天氣、河床沙灘地受熱快、地面氣流擾動促使地面輻合上升運動增強，有利於強風的大氣環流形成，冷鋒過境時，氣壓梯度和溫度梯度明顯增大，就會造成風吹沙之天氣，上項技術、設備、資訊建置費時，若整體風沙預警問題無法在短期內改善，可依據揚塵影響的範圍或對象來思考，尤其利用環境調查資料成果，所檢測到之風沙和微塵影響範圍，配合風沙揚塵發生機制（如濕度、溫度、河川裸露地含泥量及含水量）的分析，嘗試建立適當的預警判斷機制，除提醒居民減少外出暴露於飛塵之中，並於堤防上裝置預警監視無線網路系統，適時起動置於卑南溪河口兩岸堤防上之高壓噴水、噴水霧裝置，以降低溪口空氣濕度、降低河床溫度以減少吹沙揚塵及攔截沙塵，以期能達到減輕風沙災害，並宜持續關注河床風沙揚塵垂直分佈狀況作深度空間沙塵濃度研究，以充實預警制度資訊。

2. 濱溪緩衝帶規劃：

河川區域是環境敏感地區，開發容許使用度低，先進國家對濱溪河川區域均有開發管制限制、緩衝綠帶等規定，如合理規劃鄰近河川流域土地的使用分區，或下游洪犯平原農業開發時，設置河川區域緩衝帶等，可減少農田等泥漿污染物排入河川中，本研究河段防風林區亦有劃設約50公尺範圍之保安林帶，惟劃設區域參差不齊，防風林先後又遭遇雷擊、火災、人工湖開發及農民開墾擴張影響，原緩衝綠帶功能減低，且急需劃設於上風處之保安林帶均尚未規劃佈設，亟需以都市及非都市計畫手段，規劃保護防風林帶寬、植栽；另外卑南溪北岸（下游左岸）上風處急需規劃之緩衝綠帶，宜限制農業或商業經濟開發行為，本研究指出卑南溪河口段風沙揚塵現場調查之氣象資料顯示，卑南

溪河口段風沙揚塵之風向多分佈在東北、東北東方向，為縮減傳送進河口區段之風域，抬高主要風場高度、擾亂削減風域能量、降低與裸露河床表面接觸之摩擦風速，於卑南溪左岸上風處規劃種植70公尺至150公尺防風林帶，將能有效破壞風場，減低風吹沙災害。

3. 長期沙源減少規劃：

- (1)河床植生綠覆蓋優先：本研究首要提出制風沙於揚起前之觀點，河床植生為最佳防風沙策略，應優先於堤前堤後植栽，由風沙揚塵採樣分析及氣象資料顯示，一旦風沙揚起擴散，現有地面植生攔截有限，力有不逮，事倍功半，應加強河床植生、噴水霧保濕定砂並供草籽維生，蘆葦自然生長後不需噴灌即能達定砂防塵功效，綠美化且維持河川生態生長，若遭遇洪水沖失後，每年列維護灑草籽補助植生，灑草籽費用低廉，搭配跳島式防風網、水霧噴灑，維護費用低、效益良好。
- (2)河川管理及辦法研修：1. 加強河川植生定期巡視補植； 2. 沖擊岸低度保護避免山坡地基礎沖刷土石塌方，製造沙源； 3. 裸露河床地上開放供農民種植牧草植生，避免許可種植短期收割後休耕荒田； 4. 加強管理河川疏濬砂石採取，避免濫採盜採，擾動河床自然穩定狀態，採砂石運輸道路適切鋪設 A.C 或低強度 P.C 鋪面，減少沙塵產生； 5. 上游修築攔河堰截水攔砂，或附近工廠抽取地下水，均易造成下游河床裸露，河川揚塵大幅增加。
- (3)加強上游水土保持：與林業單位、水土保持單位密切配合，劃設管理維護區域，避免三不管區域，加強種植深根固土樹種，水土保持並加強取締濫墾濫伐。

4-5 風沙防治策略佈置

卑南溪河口段風沙問題，若未能掌握風沙來源及其引發機制，其治理方法多僅能治標效果，無法發揮治本功效。經由歷年防治工法策略檢討分析，可知歷年飛沙防治作為之適用性及成本效益，同時參酌國內外風吹沙防治經驗，依照風沙揚塵諸項因子，研擬卑南溪河口段風沙防治策略佈置方案。

1. 卑南溪為成長型河川，河床水位榮枯變化大，河床綠化植生不易，為降低河床植生所需之經費與縮短施工佈置時間，可利用河床豐水期，將草籽混沙人工遍灑裸露沙灘地，或於上游降雨，高水位時讓草種隨著水流傳播方式，漂流播種靜水區域，滯留水區域含水量豐沛，使短期植生易於含泥量較高區域生長，若自然漂移植生不及，則輔以人工補植草種加強植生。
2. 由歷年氣象風速風向資料統計分析顯示，卑南溪河口段吹沙揚塵之風向多分佈在東北、東北東方向，為縮減傳送進河口段之強勁風力，抬高主要風向風場高度、破壞及削減風域能

量、降低吹入河床表面接觸之摩擦風速，建議於卑南溪左岸劃設50公尺至80公尺寬防風林帶，進行高低交錯並與主要風向為標的之防風林植栽，以提高風場或破壞風場，另可考慮以風力發電機組佈置方式替代防風林木，除了可達成破壞風場功效，另可發電出售自用，並且可發展地方觀光事業。

3. 卑南溪河幅寬達2200公尺，現有噴水系統防治沙塵作為因應調整，將卑南溪左岸現有之噴水系統改設為水霧噴射方式，並長時間噴霧方式持續濕養河床植生及增加河床裸露沙灘地保水；延伸河口段水霧、水珠噴射裝置及中華大橋北側，以增加空氣濕度影響範圍與攔截風沙揚塵有效長度，並可考慮將噴水霧系統以橋墩方式架設於河床高灘地或浮島處，以提高水霧噴佈有效範圍。
4. 卑南溪右岸黑森林與臺東森林公園地區，木麻黃防風林平均壽命30-40年即會枯死，建議相關單位加強植生管理規劃，以增加風沙揚塵攔截率，並儘速規劃卑南溪左岸防風林帶，以提高防風功效。
5. 卑南溪利吉段風沙起源特性為利吉橋上游、右岸高灘及風域較長，規劃以河床植生方法，進行飛沙揚塵抑制，利用河川自然水力，於降雨、水量較大期間，放流草種，讓草種隨水流滯留植生，或開放給農民牧草植生，以減低飛沙揚塵情形，並建議於卑南溪利吉橋上游護岸上，增設噴水霧系統，以增加空氣濕度，減少風沙揚塵傳播距離。



第 5 章 結論與建議

臺東市鄰近卑南溪畔住家，風吹沙的日子，往往不到兩小時，室外的車子、室內的傢俱、地板就滿布沙塵，人在戶外，一開口講話就有沙子跑進嘴裡去。河床高灘地沙塵飛揚，嚴重時就宛如大陸沙塵暴，人工湖隔離水道附近區域，完全籠罩在沙塵當中，中華大橋上騎車也非常困難，沙塵大到騎士眼睛睜不開，能見度不到 50 公尺，不僅行車視線受影響，市區民眾屋內也有大量積塵，影響生活作息，臺東人茶餘飯後有一句笑諺「臺東人吃飯配砂」，實實在在印證風沙災害非常困擾著臺東人的生活。

本研究卑南溪河口段風沙防治策略，希望能提供臺東市風沙防治有效治理策略，跳脫以往風沙防治不佳迷思，總結歸納如后：

- 一、由本研究計畫蒐集風吹沙氣象資料比對分析，卑南溪口地區平常日，普遍頻繁風向為東北風或東北東風，歷次風沙揚塵現場調查顯示，卑南溪河口段風沙揚塵之風向亦多分佈在東北向及東北東方向，沿著海岸山脈及臺東縱谷間 V 字型地形，順著河道吹向卑南溪下游方向，造成臺東市區嚴重風吹沙災害。
- 二、由研究調查資料分析結果顯示，臺東市區吹沙揚塵主要影響範圍在中華路以南地區，沿臺東大堤往臺東女中、東海國小、復興國小間區域，落塵懸浮濃度則由臺東市區東南側向西北方向逐漸遞減狀況分佈，尤其是中華路與海岸間之市區揚塵問題較為嚴重，風沙來源除了東北風狂吹起之卑南溪河口段高低灘地懸浮微粒細塵土，尚有南太平洋生成之熱帶氣旋所狂吹之西南氣流，將臺東海岸地區沙灘細塵土微粒吹襲入臺東市區影響。
- 三、研究資料分析顯示，臺東風吹沙與摩擦起動風速間有相當正比關係，風吹沙大致隨摩擦風速加大而有劇增之趨勢。但與河床表面含水比例、裸露沙灘地裸露面積之單一事件，關係則不十分明顯，研判與沙塵天氣發生時必需具有三個必要條件：有利於強風的大氣環流形勢、有利的沙源條件、大風經過區域持續高溫且地表植被稀疏土質乾燥疏鬆等條件有關，因此在個項檢測數據中，有回歸誤判風沙落塵值等問題。但飛沙揚塵總量與摩擦風速間有著非常正比關聯是肯定的，原因可能與沙灘地表面風力加速風乾，減少沙塵表面間水份凝聚力等起動力學有關，河床表面含水量仍然為抑制風沙起動重要因子，關係密切。
- 四、卑南溪河口段泥質礦物成份與臺東市區落塵微粒礦物成份、粒徑、風速、風向等比對分析顯示，臺東市區風沙落塵與卑南溪河口段風吹沙關係密切。卑南溪河口段風吹沙好發月份在每年十月，風吹沙次數頻率為當月最高值，達 20 次之多，全年好發期常態分佈在 6 月至 11 月間；風吹沙發生時段則近似常態分佈於早晨 8—9 時至下午 6 時止，中午 12 時至下午 15 時為最高發生時段。
- 五、卑南溪河口段風吹沙由本次研究發現，河床風沙運動依粒徑大小分為三類運動型態，滾動、跳躍、懸浮等，實際沙塵滾動、跳躍等二種運動，在河川中遭遇水流路即沖刷流失

，一般均無法跨越3公尺寬之水流路，因此實際跨越至河川外侵襲臺東市區之風吹沙災害，僅及懸浮運動之0.01mm以下細小微塵，此種推論可由臺東大堤前植栽防風林木均無遭受粗粒徑沙塵侵襲堆積砂丘情形得予驗證，並由臺東市風沙災害均為細塵土得到佐證。

- 六、卑南溪風吹沙治理應從背動攔截轉換為主動抑制作為，持續進行河床植生含水策略，以往河床水覆蓋工法及綠覆蓋工法，觀念均正確，完工後之防治功效亦顯著，治理失敗處為成效防治作為約僅一年，每年水覆蓋或綠覆蓋治理完工後即遭遇洪水沖毀，耗費政府預算不貲，經濟效益不彰，惟風沙治理根本觀念正確，僅需在防治作為上再加研究改善；風沙防治從沙灘持續維持保有含水，既能防治風沙、維護河床植生環境又不破壞原有河床生態方式研究著手。
- 七、卑南溪濱溪地帶，劃設保安林區等低度開發緩衝綠帶，符合先進國家對保護河川地帶相關管制作為，然而在規劃設計上，未能對環境資料充份調查，防風林相佈置未能針對主要風吹沙風向配置，使緩衝綠帶設計提高風場、縮減風域方面成效不佳。在風吹沙攔截成效上也僅止於低度空間區域。建議濱溪緩衝綠帶應針對卑南溪風場規劃卑南溪左岸(上風帶)低度開發區，除了空軍志航基地航道區域外，劃設70公尺至150公尺以上帶狀綠帶，廣植高大防風林木，密度在40% — 69%之間，加強造林，並針對東北東風方向佈置林相，俾使進入卑南溪河床區域風場抬高，減低河床風蝕現象，縮減風域，防治風吹沙。
- 八、河床植生及濱溪兩岸緩衝綠帶植樹防治風吹沙，短期間內無法有效達成，又卑南溪河寬達2200公尺，以水幕噴水減塵有效寬度或高程僅及30-50公尺，防治成效有限，依據水霧沉降速率達氣流速度時，細小水珠即達漂浮狀態，可有效將水珠傳遞至河中沙洲高、低灘地，除對風吹沙有降溫條件，並對河床植生環境維護，增加沙塵含水量物理凝聚力，並搭配預警系統建立，於風吹沙氣候條件前連續噴水霧處理，預期將可有效治理沙塵。
- 九、長期加強濱溪兩岸綠帶植樹維護管理，並對枯死苗木替換補植，維持一定植生密度。另持續對上游利吉巨厚泥岩層及上游水土保持工作，加強河川管理，杜絕非法砂石採取，管制卑南溪兩岸洗石廢水泥塵排放。

參考文獻

國內文獻

1. 中國荒漠化防治研究課題組(1998)。中國荒漠化(土地退化)防治研究。中國環境科學出版社，北京。
2. 方煒(1995)。溫室蒸發冷卻系統降溫效果量化指標之建立。農業機械學刊，4期，第5-12頁。
3. 王寶貫(1997)。雲物理學。國立編譯館主編，渤海堂印行，台北，2003年10月。
4. 石再添、張瑞津、張政亮、林雪美、連偵欽(1993)。台灣西部海岸沙丘之地形學研究。國立台灣師範大學地理學系，地理研究報告，第19期，第99-148頁。
5. 余嘉裕、陳永祺、劉廣英(1997)。台灣地區空氣品質監測與東亞沙暴關係之氣候與地球化學分析。行政院環境保護署EPA-86-L102-03-20。
6. 吳正(2003)。風沙地貌與治沙工程學，初版。科學出版社，北京。
7. 呂維明、戴怡德(1998)。粉粒體粒徑量測技術。台北市：高立圖書有限公司。
8. 李抒敏、裘惟欣、蔡承諭、黃夢堯(1957)。風殺竹塹——新竹市沙塵暴的探討。中華民國第四十六屆中小學科學展覽會，新竹市立光武國民中學。
9. 李芳君、余進利(2003)，「雲林海岸地區風飛砂調查」，第25屆海洋工程研討會論文集，第677-684頁。
10. 李湘鶴、陳正平、林筱雯(2004)。台灣本土大氣沙塵產生機制之探討。2004年天氣分析與預報研討會論文集，第536-541頁。
11. 沈孝輝。敲響生態危機的警鐘——沙塵暴。中國大地雜誌，90年4月。
12. 周恆(1978)。防風定砂。國立編譯館主編，黎明文化事業公司，台北，1978年7月。
13. 林正亮、朱健松、黃裕立(1997)。噴霧降溫系統於開放式雞舍內的蒸發比例之分析。嘉義技術學院，55期，第11-26頁。
14. 林宗儀(1998)。雲林海岸的風砂活動現況。第20屆海洋工程研討會論文集，第443-447頁。
15. 林宗儀(1999)。雲林海岸風砂搬運量的估算。第21屆海洋工程研討會論文集，第447-452頁。
16. 林雅谷(2004)。風沙與地形變動之試驗研究。國立成功大學碩士論文。
17. 金傳良(2001)。中國西部沙化與水文氣象的關係——兼論人為影響及防治對策。中國水利水電科學研究院，2001年4月25日。
18. 施昭彰(1990)。智慧型自動噴灑水霧系統之研究。設施農業專輯，33期，第5-11頁。
19. 柳中明、楊之遠、彭立新、錢正安(2001)。沙塵暴的過去、現在和未來。大陸沙塵暴對台灣地區空氣影響與預測研討會，台北，2001年3月21日。
20. 徐啟運、胡敬松(1996)。我國西北地區沙塵暴天氣時空分布特徵分析。中國沙塵暴研究，第11-15頁。

21. 許盈松、洪振豪、周湘俊、陳清茂、朱家興、林大港(2006)。風沙現象研究。農業工程學報，第52卷，第4期，第15-24頁。
22. 陳加忠，陳志昇(1994)。溫室細霧冷卻系統之開發與性能研究。農業工程學報，40 期，第 78-87 頁。
23. 陳永強、曾俊傑、陳忠漢、張晏暉、王韋勝、張又予(2006)。臺東機場吹沙現象初探。2006 年氣象與航空安全研討會論文集，台北，第157-169頁。
24. 曾俊傑(2008)。臺東卑南溪出海口河段沙塵災害探討。交通部中央氣象局97年9月出版年刊，台北，第395-400頁。
25. 曾晴賢(2002)。卑南溪河口段近自然生態工法之研究。經濟部水利署第八河川局，臺東。
26. 楊之遠、李侃翰、柳中明(1997)。長程輸送黃沙與本地污染之空氣品質監測比較-1997年3月12日資料分析。中華民國環境保護學會會誌，20期，第1-38頁。
27. 蔡崇憲(2007)。風吹沙的景觀解析與對策。國立宜蘭大學碩士論文。
28. 蕭葆義(2006)。風工程，初版，第四章第一節，國立海洋大學河海工程學系，台北。
29. 錢正安、賀慧霞、瞿章、陳敏連(1996)。我國西北地區沙塵暴的分級標準和個例譜及其統計特徵。中國沙塵暴研究，第1-10頁。
30. 謝信良、王時鼎、鄭明典、葉天降(1998)。百年(1897~1996)侵台颱風路徑圖集及其應用。497PP。
31. 簡仲和、林宗儀、郭晉安、蔡宗利(2008)。卑南溪河口段風砂問題改善對策初步探討。經濟部水利署第八河川局，臺東，第1-73頁。
32. 中央氣象局全球資訊網：<http://www.cwb.gov.tw/V5/index.htm>。

國外文獻

1. Chang, D. W., (1968) . Climate and agriculture. P109-117.
2. Bagnold, R. A. (1935). The Movement of Desert Sand. The Geographical Journal, Vol. 85, No. 4. P342-365.
3. Bagnold, R. A. (1941). The Physic of Blown Sands and Desert Dunes. Methuen, London, 265pp.
4. Kawamura, R. (1951). Study of sand movement by wind. Report to the Institute of Science and Technology.
5. Coughlan, M. J. and Lee, D. H. (1978) The assessment of drought risk in Northern Australia. Natural Hazards Management in North Australia Aust. Nat. University, Canberra.
6. Gibbs, W. J. and Maher, J. V. (1978) Rainfall deciles as drought indicators. Bulletin no. 8 Bureau of Meteorology, Australia.
7. 田中貞雄(1954) 風蝕防止に関する研究 農業氣象 10(1,2) P57-59.
8. 渡邊光(1976) ジオモ-フォロジ-地形學 古今書院, P219-220



自 述

中文姓名：周元春

英文姓名： Ensen Chou

戶籍： 浙江省臨海縣

生日： 1961 年 02 月 20 日

學歷： 臺東縣立仁愛國小

臺東縣立寶桑國中

省立岡山農工

中正理工學院土木工程科

國立臺東大學環境經濟資訊管理所碩士班

通訊處：臺東縣臺東市太原路一段 432-1 號