

2025年臺灣國際科學展覽會 優勝作品專輯

作品編號

180019

參展科別

地球與環境科學

作品名稱

沙波紋與新月丘—從地球到火星

就讀學校

國立臺灣師範大學附屬高級中學

指導教師

曹秀閔

作者姓名

吳政叡

曾羿學

關鍵詞

風洞 (Wind Tunnel)、新月形沙丘 (Barchan Dunes)、沙波紋 (Sand Ripples)

作者簡介



我是吳政叡，國立臺灣師範大學附屬高級中學數理資優班高三的學生。很開心高中加入地科專題研究，產出的東西雖然沒有太厲害，但這段旅程很好玩也很有趣。

2025年臺灣國際科學展覽會

研究報告

區別：北區

科別：地球與環境科學科

作品名稱：沙波紋與新月丘—從地球到火星

關鍵詞：風洞（Wind Tunnel）、新月形沙丘（Barchan Dunes）、沙波紋（Sand Ripples）

編號：

（編號由國立臺灣科學教育館統一填列）

摘要

本研究旨在探究風成沙紋的型態和其移動速度及新月形沙丘的演化過程。利用吹出式風洞建立穩定且單一風向的風場，並運用不同粒徑的石英沙，以研究不同情況下沙紋和沙丘的變化。研究發現，風成沙紋的波長變化不僅受到風速、粒徑等特性的影響，還可能受到波峰後渦流長度的影響。另外觀察沙紋移動速度的變化後，可以明顯的發現與風速有高度正相關，亦討論能量的變化，並試圖建立風速與移動速度的轉換模型。在新月形沙丘演化過程的模擬中，我們歸納出三個主要時期：延伸期、崩落期和消逝期。我們也針對這些結果進行質性分析，透過觀察與討論，進一步了解沙紋與沙丘之變化過程與形成條件。最後我們比較了火星橫向風成脊（TAR）的形狀、動力及分布差異，推論其可能成因，希望進一步探究行星地表形貌的形成和演化過程。

This study aims to explore the morphology and migration of aeolian sand ripples, as well as the evolution of barchan dunes. A blowout-type wind tunnel was used to generate a stable, unidirectional wind field, and quartz sand of different grain sizes was utilized to study the changes in sand ripples and dunes under different conditions. The research found that the wavelength of aeolian sand ripples is influenced not only by wind speed and grain size but also by the length of the eddy behind the crest. Additionally, after analyzing the changes in ripple migration velocity, a strong positive correlation with wind speed was identified. The study also discussed energy variations and attempted to establish a model of energy conversion between wind speed and sand migration velocity. In the experiment on the temporal evolution of barchan dunes, three main stages were identified: the extension stage, the collapse stage, and the dissipation stage. We conducted a qualitative analysis of these results, further understanding the processes and conditions of ripple and dune formation through observation and discussion. Finally, we compared our findings with the shape, dynamics, and distribution of Transverse Aeolian Ridges (TAR) on Mars, speculating on their possible origins, with the goal of further exploring the formation and evolution of planetary surface landforms.

壹、前言

一、研究動機

去年暑假我們在海水浴場玩的時候，發現海灘上的沙子呈現出許多規律的紋理，這引發了我們的興趣。經過查詢相關文獻後，我們發現沙紋的型態在各地略有不同，卻鮮有解釋。另外，在實驗中我們亦觀察到沙波紋會有移動的現象，推測其移動速度與風速有一定的轉換關係，若能找到此關係，就能實現利用遙測沙紋移動速度推測該地的風速。此外，在地理課上，我們也了解到有關新月形沙丘的知識，而且我們發現火星上也有特殊的沙丘。然而，網路上僅有對新月形沙丘的型態描述，卻缺乏形成這種沙丘的過程描述，火星上的沙丘也沒有完整的研究，許多成因也尚未被證實，這讓我們想要揭開它神秘的面紗。因此我們將採取風洞模擬實驗，以探討風速強弱和粒徑大小對沙紋的影響，以及新月形沙丘的形成過程的變化。

二、研究目的

- (一) 探討不同風速及顆粒大小對沙紋型態造成的差異。
- (二) 探討風速及沙波紋移動的關係，並找出其應用模型。
- (三) 了解新月型沙丘的形成與演化過程。
- (四) 以實驗結果去分析討論地球與火星上之相似地貌。

三、文獻回顧

(一) 沙子的移動方式

風搬運沈積物的主要方式滾動(rolling)及躍移(saltation)，以沙粒為主。較大而較圓的沙粒常受到風吹而沿著地面滾動，向前搬運，其他較小的沙粒因為受到其他顆粒衝擊而上升到空氣之中。當風速到達某一階段的時候，在地面上一個滾動中的沙粒和其他沙粒互撞，結果使第二沙粒衝向空氣中，或使第一沙粒飛躍而起，這就是沙粒的躍移。有時沙粒為風吹起後，經過一段運動距離後再落下，落下來的沙粒再把地面上另一顆沙粒撞擊而跳起，或自己再跳躍上去，或把這地面沙粒推送向前，如此可以使沙粒不斷運送前進。根據估計，約有五分之一到三分之一的沙粒是由滾動方式搬運，其餘則多以跳躍或跳動方式搬運。(何春蓀, 1986)

(二) 沙丘

1. 沙丘 (Sand Dunes)

沙丘是相對於沙波紋(Sand Ripple)、沙脊(Sand Ridges)等小尺度風沙地貌的大尺度風沙地貌。為風力作用產生的地形特徵，主要出現在沙漠、海灘或沙洲等地。它的形成與風吹動地表的沙粒有關，將沙粒推移、搬運，堆積而成。當風從迎風面吹過，沙粒被風吹動沿著迎風面斜坡跳躍而上。當風吹過頂端的時候，會在沙丘背風側會產生渦流，使風速下降。所以沙粒一旦到了丘頂，就被吹落到背風面上相對靜止的空氣中，自然會堆積下來。沙丘背風較陡的一面叫做滑落面(Slip Surface)，沙粒在這裡迴動而跌落向下堆積，所成沙堆的坡度則愈來愈陡。滑落面斜度較陡，約在 20 度到 30

度左右，如果坡度上沙粒堆積到超過沙的休止角（ Angle of sand Repose ）——即 34 度的最大限度時，就會發生沙崩、一直等到再回到 34 度的傾角為止。（何春蓀, 1986）

2. 新月丘（Barchan Dunes）

新月丘屬於沙丘的一個類型，呈半月形。多發生在植物稀少、風速中等、沙供應量較少且具一定規模之風速。是沙丘發達初期地形，成孤立小丘，向盛行風向伸展，迎風坡成凸形緩坡，背風坡成凹型急坡，坡面兩端伸展成兩突角形，背風坡超過休止角即崩下。（何春蓀, 1986）

新月形沙丘形成前會先經歷狀沙堆階段、盾狀沙丘階段、雛形新月丘階段和新月丘形成階段。沙堆背風坡形成渦流，將沙子堆於沙堆背風坡的兩側，並形成背風坡兩尖角之間的馬蹄形小凹地。

（三）火星的地貌

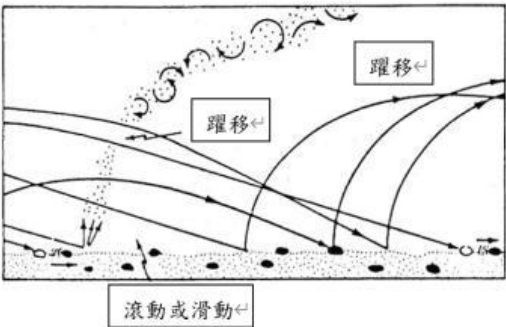
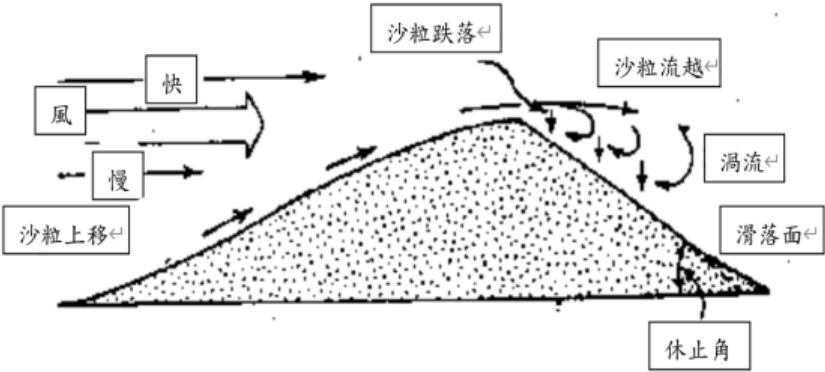
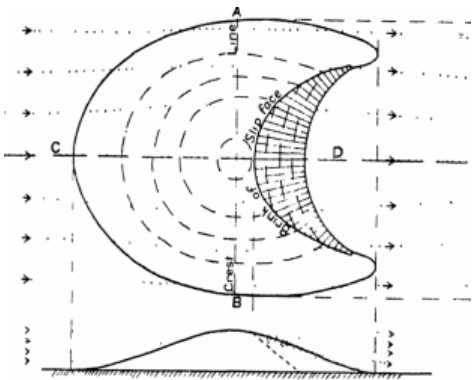
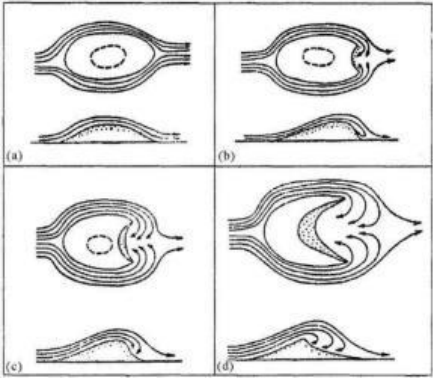
依據Day & Zimbelman的研究，依地形的尺度大小、剖面對稱性以及表面粒徑分佈，火星表面的風成地形類型大致可分為小沙波紋（Small Ripples）、大沙波紋（Large Ripples）、巨型沙波紋（Mega-ripples）、橫向風成脊（Transverse Aeolian Ridges）以及沙丘（Dunes）（圖 5）。其中小沙波紋和大沙波紋波長小於 4 公尺，高度約為 25 公分，主要由中等沙、細砂組成，剖面一般不對稱。巨型沙波紋波長 5 到 15 公尺，高度小於 1 公尺，由粗的雙峰分佈的砂組成，粗砂主要集中在脊上，剖面較為對稱。橫向風成脊波長可達數十公尺（大於 20 公尺），高度一般大於 1 公尺，表面有粗砂分佈，剖面對稱。沙丘波長可達幾百公尺，高度達數十公尺，由均勻分佈的細砂組成，剖面一般不對稱。（如圖 6）

在火星的北半球是年代較新的廣闊平坦的平原，以前很可能是海洋，地勢較低；南半球則地層年代較古老，圓坑很多，是崎嶇的火山區，地勢較高。火星南半球比北半球平均高五公里。最高與最低點高度相差達 32 公里，相當於地球同一差度的 1.5 倍。火星南北極有明顯的極冠，乾冰在北極約 1 公尺厚，在南極則約 8 公尺厚，南極所含二氧化碳量相當於大氣含量的 80%，火星大氣層過於稀薄，使物質不能穩定地保持液態，進而蒸發為氣體從大氣中逸出。（何顯榮、黃朝明，2004）

（四）橫向風成脊（TAR）分布

依據遙感影像研究，橫向沙脊數量隨緯度的變化規律（圖 7）。基於該圖，我們可以獲得以下資訊：

1. 南半球橫向沙脊較北半球多
2. 低緯度地區的橫向沙脊多，中高緯度地區的橫向沙脊少

 圖 1 沙粒移動方式	圖源： 普通地質學
 圖 2 沙丘縱剖面及其地質作用簡圖	圖源： 普通地質學
 圖 3 新月丘俯視及剖面圖	圖源： The Physics of Blown Sand and Desert Dunes
 圖 4 新月丘形成順序圖	(a) 餅狀沙丘 (b) 盾狀沙丘 (c) 幼年新月形沙丘 (d) 新月形沙丘 (圖源：地貌學原理)

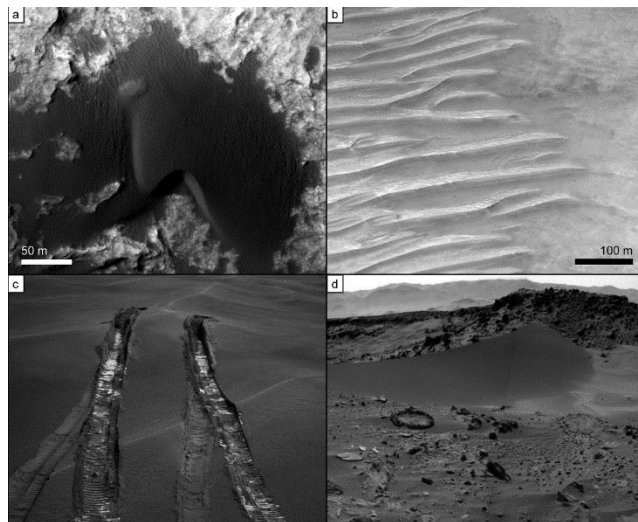


圖5 火星表面風成地形

(a) 好奇號偵測過的沙丘 (High Dune)。
 (b) 橫向風成脊 (TAR)。
 (c) 機遇號穿越過的沙波紋 (Purgatory ripple field)。
 (d) 好奇號穿越過的風成地形 (Dingo Gap bedform)。

(圖源：Ripples, megaripples, and TARs, Oh, My! Recommendations regarding Mars aeolian bedform terminology, 2021)

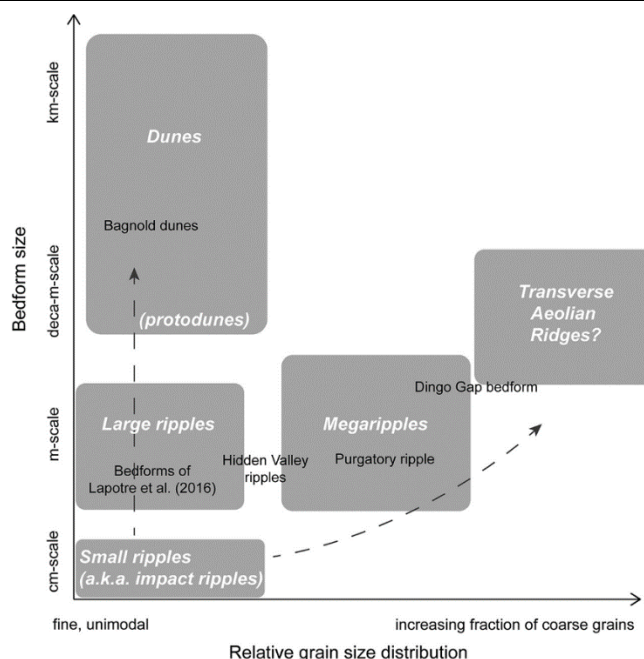
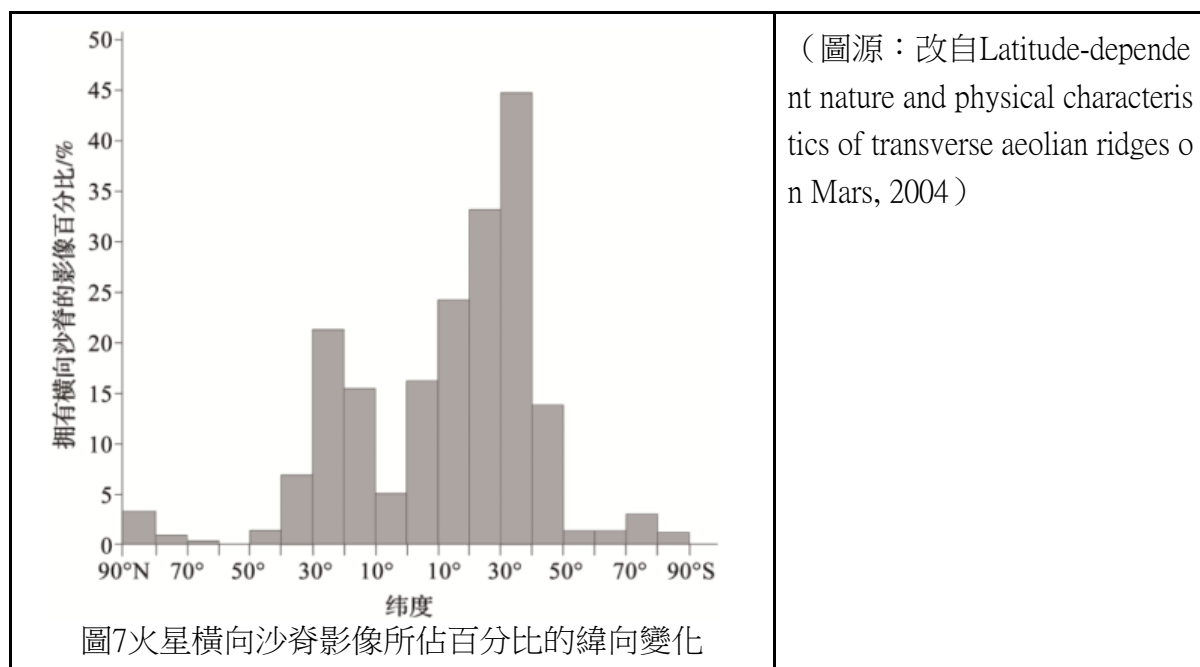


圖 6 粒徑關係分布圖

前人依衛星觀測資料及探測器樣本分析推測火星地表沈積物粒徑以沙為主，可大致分成細沙、中等沙、粗沙。圖中X軸為相對粒徑大小分佈，由左至右越來越大；Y軸則為火星地貌的尺度大小。

(圖源：Ripples, megaripples, and TARs, Oh, My! Recommendations regarding Mars aeolian bedform terminology, 2021)



貳、研究方法與過程

一、實驗器材

- (一) 風速計
- (二) 壓克力試驗段：長 180 公分、寬 120 公分、高 40 公分。上端無封口呈 U 字形，末端設有 18 公分高之擋沙板。
- (三) 自製楔形沙丘模型：長 60 公分、寬 40 公分、高 17 公分。
- (四) 刮水器：鋪平沙面用。
- (五) 照明設備：燈箱、手電筒。
- (六) 風洞：為開放、吹出式風洞，風洞全長 8.3 m，試驗段出口寬度 1.2 m，高 0.8 m
- (七) 石英砂（ 2V、5V ）：各 75 公斤（2V粒徑： 0.60 ~ 1.18 mm，後續文中以粗沙稱之；5V粒徑：0.15 ~ 0.30 mm，後續文中以細沙稱之）
- (八) 水平儀
- (九) 攝影設備：手機 3 部，腳架 2 隻。

二、分析軟體

- (一) Excel：數據分析
- (二) PhotoScape X：照片處理
- (三) Tracker：影像分析

表 1：實驗器材（下表照片未標註者皆由第一作者所攝）

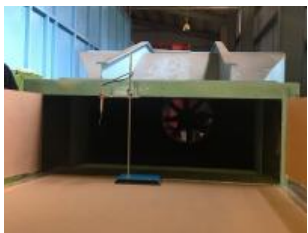
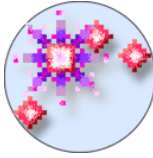
		
風速計	壓克力試驗段	自製楔形沙丘模型
		
刮水器	照明設備 (燈箱、手電筒)	風洞
		
石英砂 圖源：奈美網購(https://shopping.naimei.com.tw/9v-2kg/)	水平儀	攝影設備

表 2 分析軟體

		
Excel 圖源：Microsoft網站 (https://www.microsoft.com/zh-tw/microsoft-365/p/excel/cfq7tc0pbmf)	PhotoScape X 圖源：PhotoScape X 網站 (https://x.photoscape.org/)	Tracker 圖源：Tracker網站 (https://physlets.org/tracker/)

三、實驗器材架設

將壓克力試驗段置於風洞出口，並在風洞出口上方架設燈箱，如圖 8-1。

圖 8-2為示意圖，其中ABCD點為手機拍攝位置代號。



圖 8-1 器材架設圖
(本照片為第一作者拍攝)

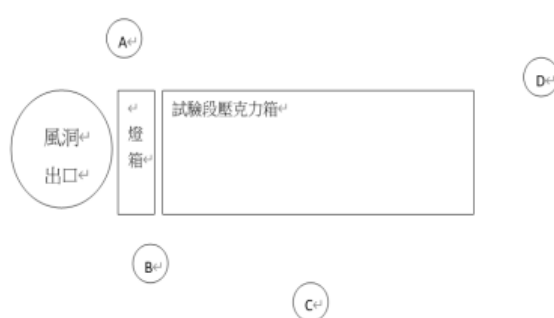


圖 8-2 器材架設位置示意圖
(本圖為第一作者製作)

四、實驗設計

(一) 沙紋實驗：

1.實驗步驟：

- (1) 使用刮刀鋪平沙子，並利用水平儀校正。
- (2) 架設手機於B、C兩點（見圖 8-2）並調整風速並開啟風洞（21分鐘）。
- (3) 使用攝影機拍攝實驗段畫面。
- (4) 每3分鐘於A點（見圖 8-2）拍攝照片。
- (5) 將尺放置於垂直波前連線處，拍照量測沙波紋長度。

2.分析方法

- (1) 開啟PhotoScape X批量編輯，調整顏色灰階、負片、變亮100、清晰度100、對比100、亮度-25、加亮30、加深10、銳利度7。如圖 9-1。
- (2) 將照片上傳至PhotoScape X，微調至波紋與尺刻度清晰。
- (3) 選取明顯的兩道波紋，量取寬度。並計算中間包含幾個波。如圖 9-2。
- (4) 加總總長度及總波數，相除得到平均波長。如圖 9-2。

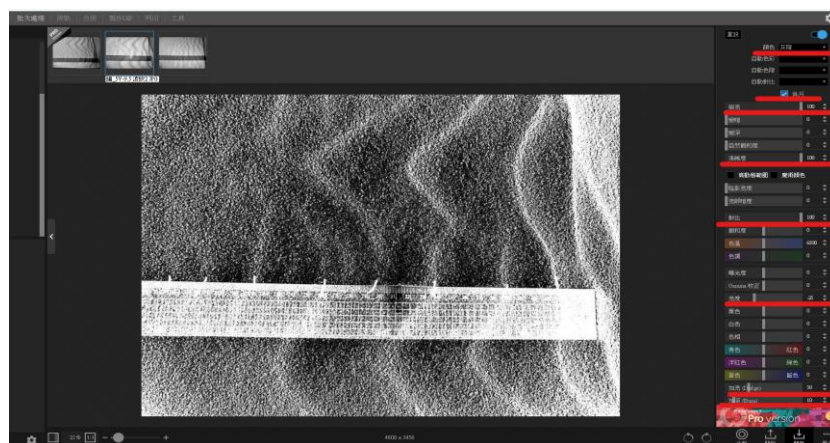


圖 9-1 PhotoScape X 調色說明（本照片為第一作者拍攝）

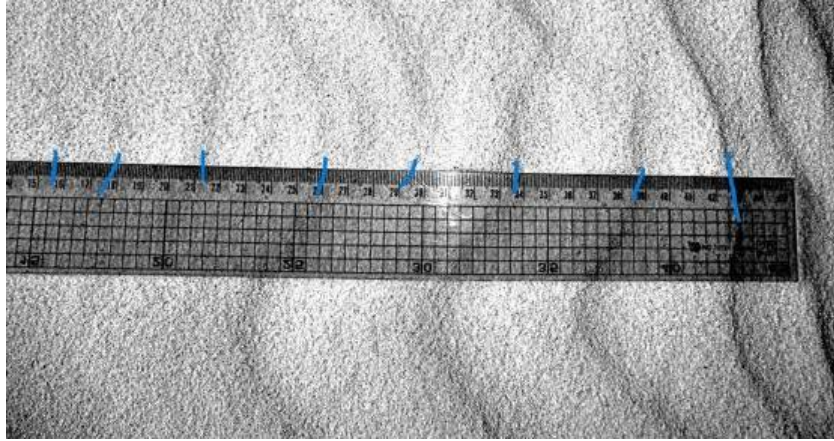


圖 9-2 沙紋計算方法（本照片為第一作者拍攝）

3.實驗變因

（1）實驗1：細沙，每次實驗調整風速約0.4m/s

* 實驗1-0：細沙，風速3m/s到5.4m/s

風速（m/s）		6.6	7	7.4	7.8
實驗編號	1-0	1-1	1-2	1-3	1-4

（2）實驗2：粗沙，每次實驗調整風速約0.4m/s

* 實驗2-0：粗沙，風速8m/s到11.3m/s

風速（m/s）		12.1	12.6	13	13.4	13.7	14.1
實驗編號	2-0	2-1	2-2	2-3	2-4	2-5	2-6

（二）沙紋移動波速實驗：

1.實驗步驟：

- (1)使用刮刀鋪平沙子，並利用水平儀校正。
- (2)架設手由上向下拍。
- (3)調整風速。
- (4)開啟風洞吹10分鐘製造沙波紋。
- (5)使用手機拍攝實驗段畫面。

2.分析方法

- (1)在Tracker中開啟影片，利用尺標記長度。
- (2)架設坐標系，使X軸平行沙波紋。
- (3)開啟軌跡track中的強度分布並使其平行x軸。
- (4)利用Python尋找強度分佈數據的局部最小值（即波谷位置），並輸出波谷位置對時間關係圖，再計算數據點平均斜率得到波紋移動速度。

3.實驗變因

(1)實驗 3：使用細沙，先吹10分鐘製造波紋後觀察其移動

風速(m/s)	6.2	6.6	7	7.4
實驗編號	3-1	3-2	3-3	3-4

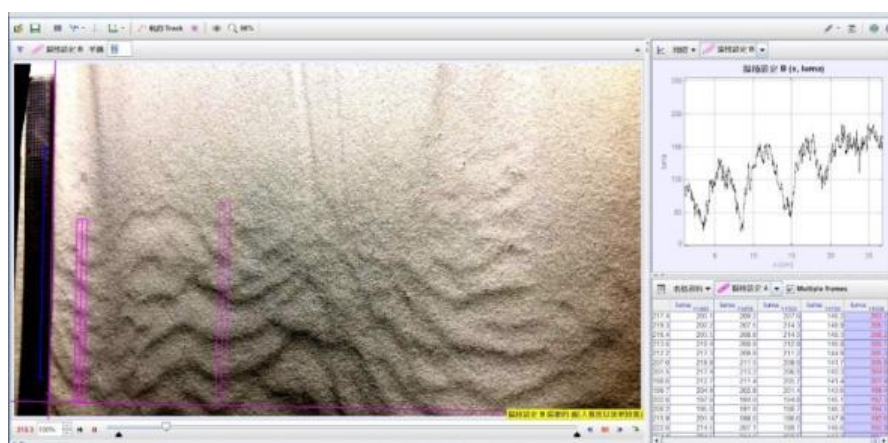


圖 10 Tracker強度分布 讀取長度示意（本照片為第一作者拍攝）

（三）沙丘實驗：

1.實驗步驟：

- (1) 使用刮刀鋪平沙子，並利用水平儀校正。
- (2) 堆疊沙丘，並固定形狀。
- (3) 架設手機於C、D兩點（見圖 8-2）。
- (4) 開啟風洞（6分鐘）。
- (5) 使用攝影機拍攝實驗段畫面。
- (6) 每3分鐘於A點（見圖 8-2）拍攝照片。
- (7) 重複步驟（4）到（6）。

2.分析方法

- (1) 在Tracker中開啟影片，利用壓克力箱上的尺標記長度 40公分。（如圖 11-1）
- (2) 架設坐標系，使X軸平行沙丘寬度。（如圖 11-2）
- (3) 開啟軌跡track中的強度分布並使其平行x軸。（如圖 11-3）
- (4) 調整強度分佈線到沙丘尾端，讀取右側強度明顯較低處。（如圖 11-3紅點處）
- (5) 影片移動三分鐘量測，重複步驟（1）到（4）。

3.實驗變因

- (1) 實驗4：細沙，固定風速 6.6（m/s），初始以自製楔形沙丘模型固定形狀，共計42分鐘。

- (2) 實驗5：細沙，固定風速 6.6 (m/s)，初始固定圓錐狀，共計24分鐘。
- (3) 實驗6：粗沙，固定風速 13.7 (m/s)，初始以自製楔形沙丘模型固定形狀，共計171分鐘。

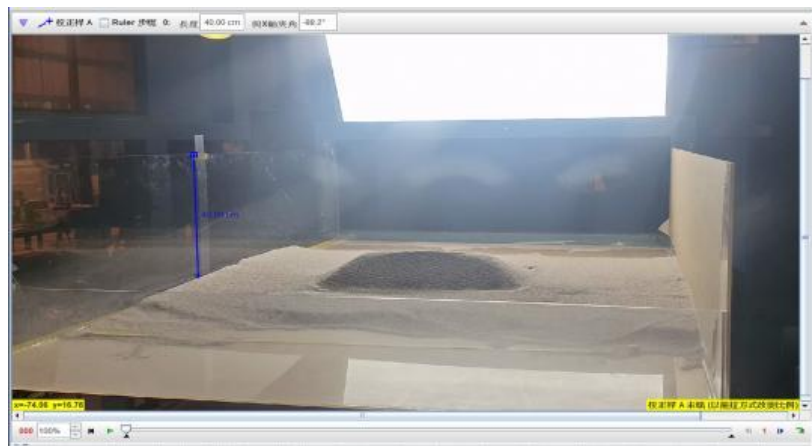


圖 11-1 Tracker 標記長度（本照片為第一作者拍攝）



圖 11-2 Tracker架設坐標系（本照片為第一作者拍攝）

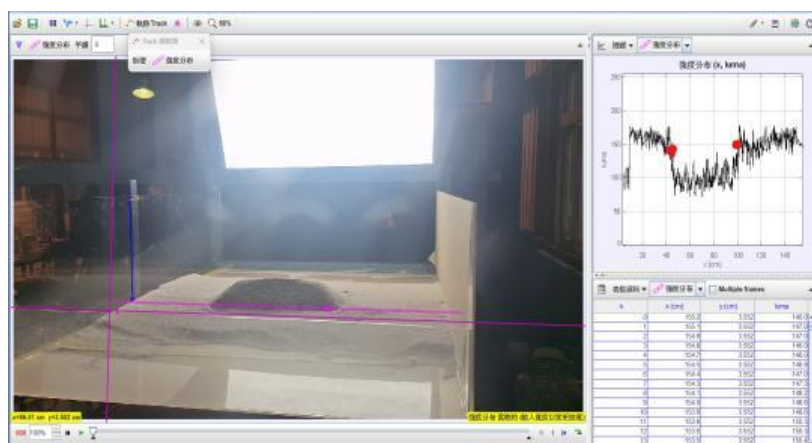


圖 11-3 Tracker強度分布 讀取長度（本照片為第一作者拍攝）

參、研究結果與討論

一、研究結果

(一) 沙紋實驗

1. 實驗1：細沙

實驗1-0：當風速小於5.4m/s的時候，我們發現砂粒難以被風吹動。

表 3 細沙不同風速下之平均沙紋長度

實驗編號	1-1	1-2	1-3	1-4
風速 (m/s)	6.6	7	7.4	7.8
總長度 (cm)	88.3	55.5	97.5	51.9
沙紋個數	27	16	27	12
平均沙紋長度 (cm)	3.27	3.47	3.61	4.33

細沙在不同風速下之平均沙紋波長

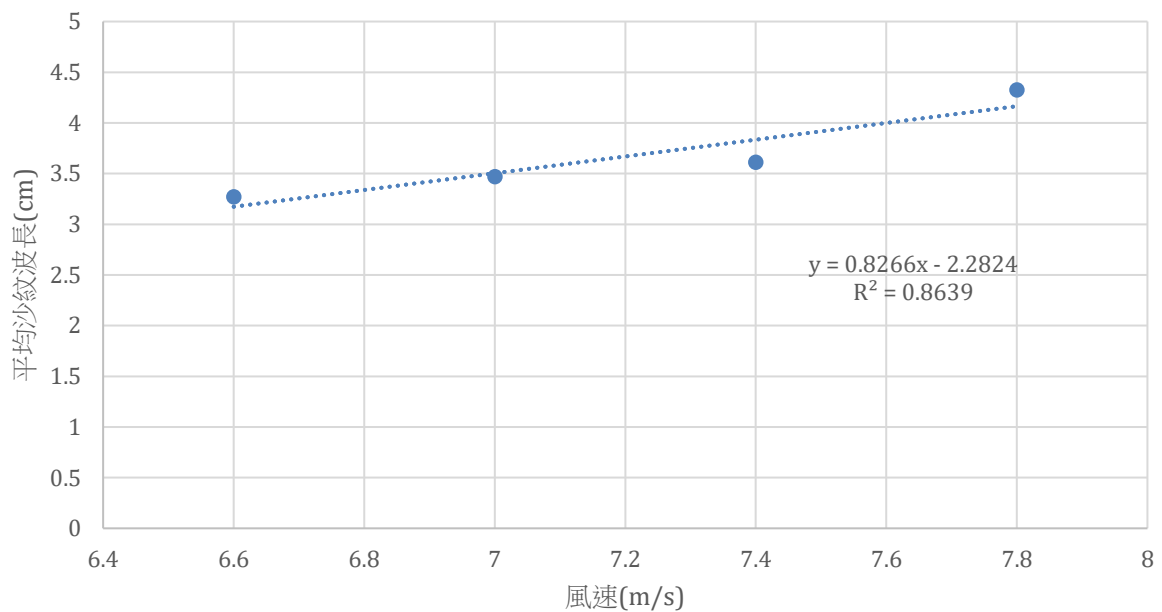


圖 12 細沙在不同風速下之平均沙紋長度散佈圖（本圖為第一作者製作）

2. 實驗2：粗沙

實驗2-0：當風速小於11.3m/s的時候，我們發現砂粒難以被風吹動。

表 4 粗沙不同風速下之平均沙紋長度

實驗編號	2-1	2-2	2-3	2-4	2-5	2-6
風速	12.2	12.6	13	13.4	13.7	14.1
總長度	32.3	27.3	23	16.1	34.8	14.6
沙紋個數	4	4	4	3	7	3
平均沙紋長度	8.075	6.825	5.75	5.36666	4.97142	4.86666

粗沙在不同風速下之平均沙紋長度

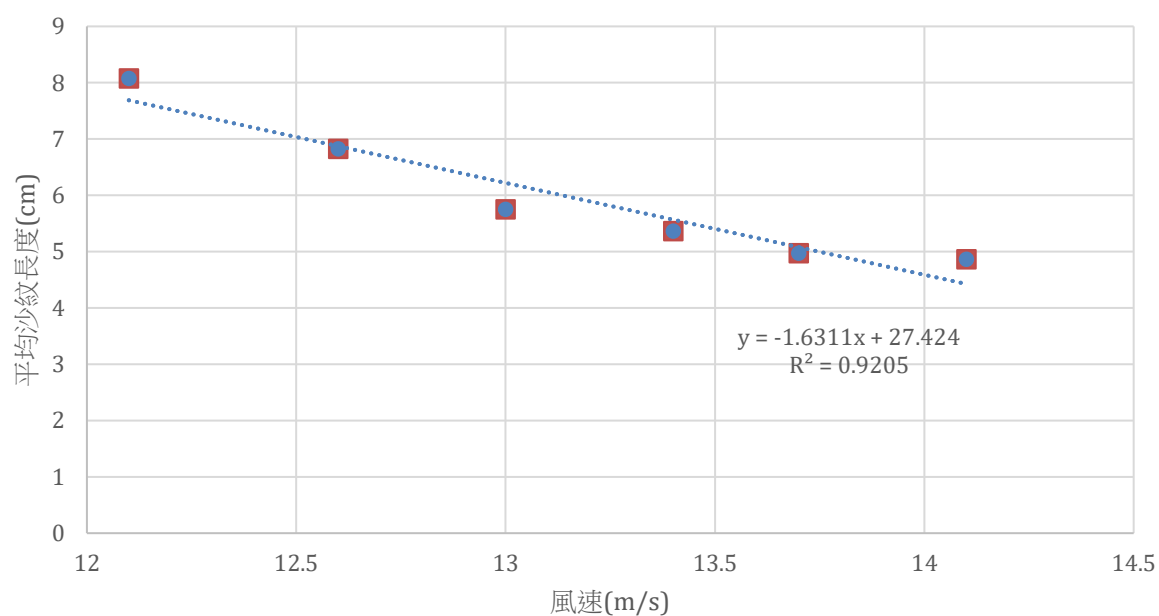


圖 13 粗沙在不同風速下之平均沙紋長度散佈圖（本圖為第一作者製作）

(二) 實驗3：沙紋移動速度

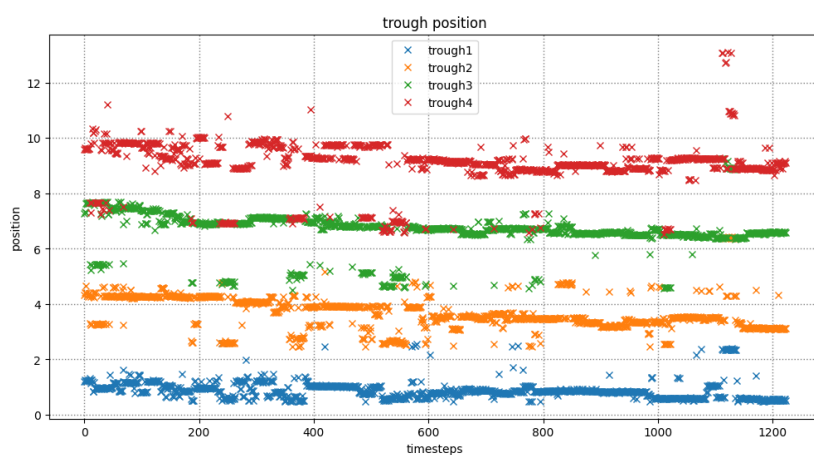


圖14 實驗3-1A區域 波紋位置對時間關係圖（橫軸時間步長1.66s，縱軸單位 cm）
（本圖為第一作者製作）

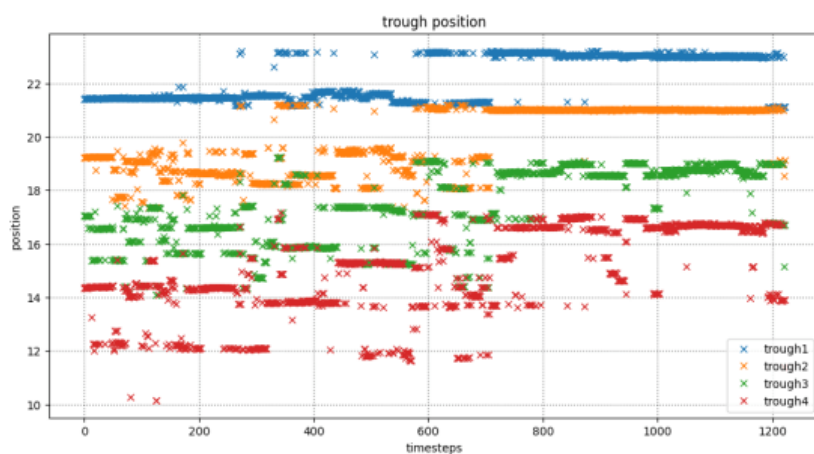


圖 14 實驗3-1B區域 波紋位置對時間關係圖（橫軸時間步長1.66s，縱軸單位 cm）
（本圖為第一作者製作）

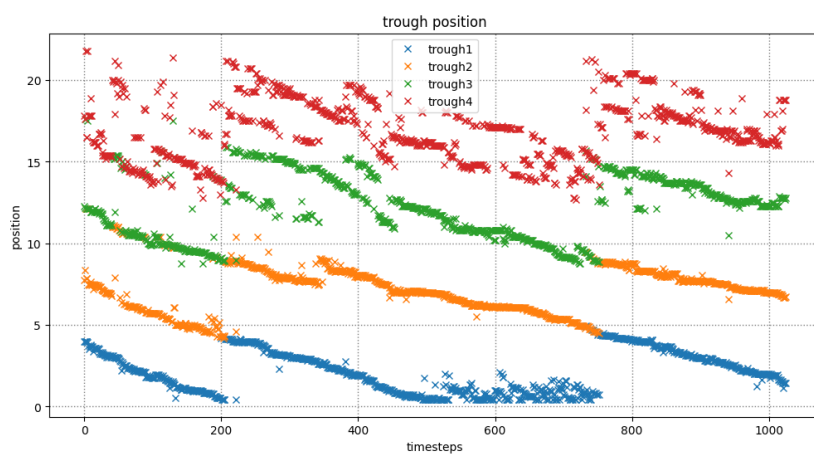


圖 15 實驗3-2 波紋位置對時間關係圖（橫軸時間步長1.66s，縱軸單位 cm）
（本圖為第一作者製作）

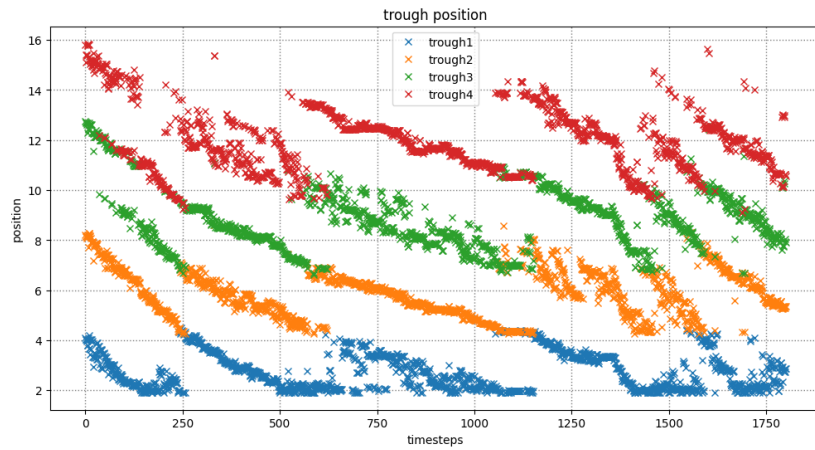


圖 16 實驗3-3 波紋位置對時間關係圖（橫軸時間步長1.66s，縱軸單位 cm）
（本圖為第一作者製作）

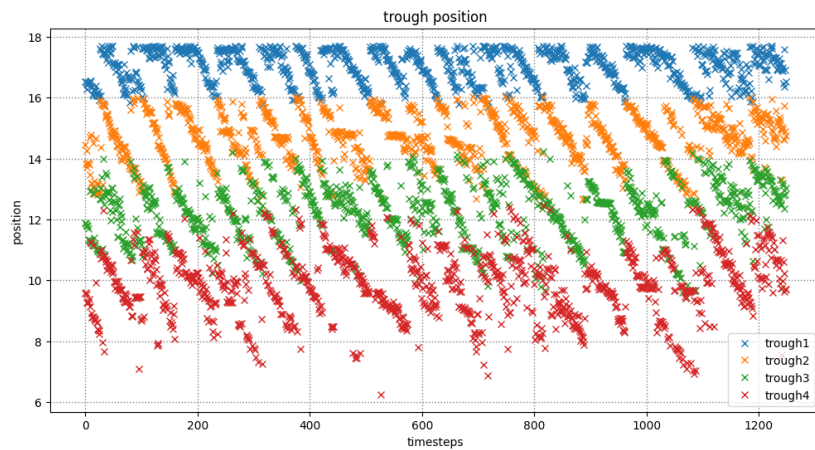


圖 17實驗3-4 波紋位置對時間關係圖（橫軸時間步長1.66s，縱軸單位 cm）
（本圖為第一作者製作）

經過程式的計算後，算出不同風速下對應的沙波紋移動速度，如表 5。並繪製風速與移動速度的一次關係與二次關係圖。

表 5 細沙不同風速下之平均沙紋移動速度

實驗編號	3-1	3-2	3-3	3-4
風速(m/s)	6.2	6.6	7	7.4
平均移動速度(m/s)	8.6524×10^{-6}	2.0169×10^{-4}	3.6539×10^{-4}	5.2608×10^{-4}

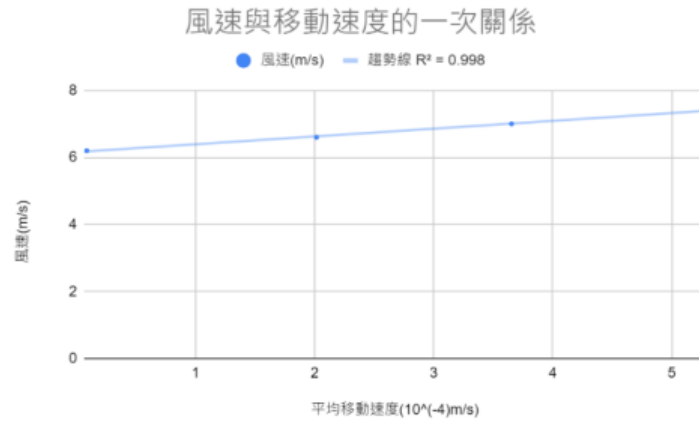


圖 18 風速與移動速度的一次關係圖（本圖為第一作者製作）

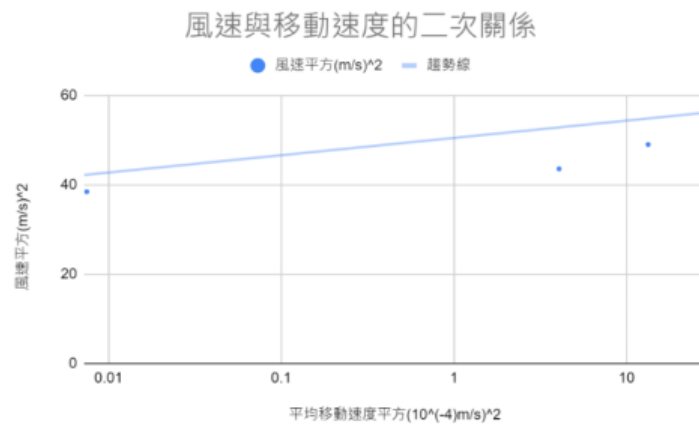


圖 19 風速與移動速度的二次關係圖（本圖為第一作者製作）

（三）沙丘實驗

- 實驗 4：以細沙觀察楔形沙丘到新月形沙丘的演化過程
（註：下方正面圖為受風面、側面圖則以左側受風）



圖 20-1 初始沙丘正面
（本照片為第一/第二作者拍攝）



圖 20-2 初始沙丘側面
（本照片為第一/第二作者拍攝）

(1) 延伸期

在此時期沙丘迎風面受風，兩側會向後延伸，但迎風面沙子流失不明顯。



圖 21-1 3分鐘時的沙丘正面
(本照片為第一/第二作者拍攝)



圖 21-2 3分鐘時的沙丘側面
(本照片為第一/第二作者拍攝)

(2) 崩落期

此為新月形沙丘主要存在的時期。由於兩側延伸區域形狀已完整，迎風面的沙子會經由兩側流失，迎風面也會逐漸縮小，沙丘高度也會逐漸下降。



圖 22-1 9分鐘時的沙丘正面
(本照片為第一/第二作者拍攝)



圖 22-2 9分鐘時的沙丘側面
(本照片為第一/第二作者拍攝)

可以見到 15 分鐘時的沙丘迎風面明顯較 9 分鐘時小。



圖 23-1 15分鐘時的沙丘正面
(本照片為第一/第二作者拍攝)



圖 23-2 15分鐘時的沙丘側面
(本照片為第一/第二作者拍攝)

(3) 消逝期

當迎風面已無沙子補充的時候，沙丘會急速下降，兩側的延伸區會向內收縮，最終合而為一，形成縱沙丘或被風弭平。



圖 24-1 27分鐘時的沙丘正面
(本照片為第一/第二作者拍攝)

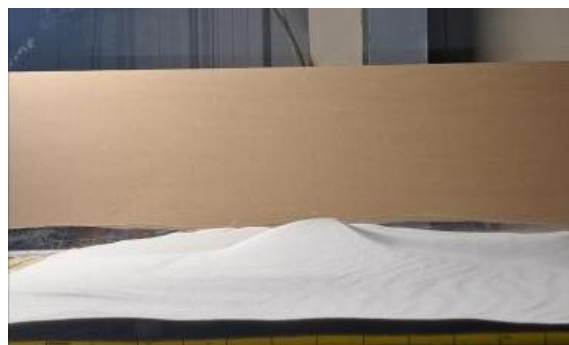


圖 24-2 27分鐘時的沙丘側面
(本照片為第一/第二作者拍攝)



圖 25-1 39分鐘時的沙丘正面
(本照片為第一/第二作者拍攝)

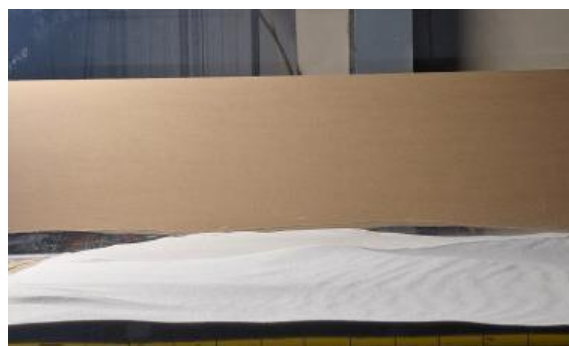


圖 25-2 39分鐘時的沙丘側面
(本照片為第一/第二作者拍攝)

2. 實驗 5：錐狀沙丘演化過程的觀察與比較

觀察錐狀沙丘之形成過程，我們發現與楔形沙丘相似，唯變化較不明顯。



圖 26-1 初始錐狀沙丘正面
(本照片為第一/第二作者拍攝)



圖 26-2 初始錐狀沙丘側面
(本照片為第一/第二作者拍攝)

(1) 延伸期

比較特別的是由於錐狀沙丘原本沒有迎風面，故在此階段同時會有迎風面之形成。如下圖 20 所示，可以明顯見到迎風面。

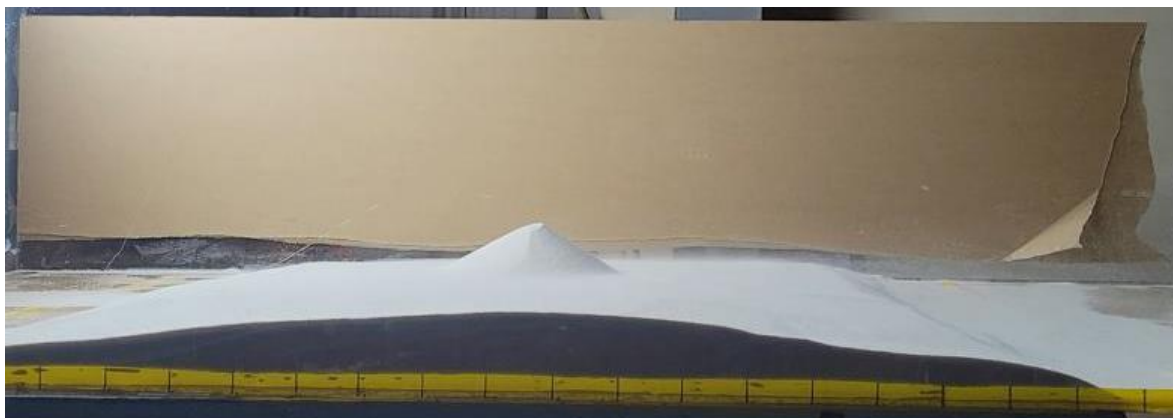


圖 27 15秒時之錐狀沙丘側面（本照片為第一/第二作者拍攝）

(2) 崩落期

由於沙丘高度不足及其形狀不利沙源補充，此實驗停留崩落期的時間非常短。



圖 28-1 3分鐘時之錐狀沙丘正面
（本照片為第一/第二作者拍攝）



圖 28-2 3分鐘時之錐狀沙丘側面
（本照片為第一/第二作者拍攝）

3. 消逝期



圖 29-1 6分鐘時之錐狀沙丘正面
（本照片為第一/第二作者拍攝）



圖 29-2 6分鐘時之錐狀沙丘側面
（本照片為第一/第二作者拍攝）

在 12分鐘時看見左右兩側之延伸合而為一，如圖 20-1。



圖 30-1 12分鐘時之錐狀沙丘正面
(本照片為第一/第二作者拍攝)



圖 30-2 12分鐘時之錐狀沙丘側面
(本照片為第一/第二作者拍攝)

在 24分鐘時錐狀沙丘已化為筆直的縱沙丘，且幾乎已看不到，即將被完全侵蝕。



圖 31-1 24分鐘時之錐狀沙丘正面
(本照片為第一/第二作者拍攝)



圖 31-2 24分鐘時之錐狀沙丘側面
(本照片為第一/第二作者拍攝)

3. 實驗6：新月丘寬度變化：以粗沙吹180分鐘

表 6 新月丘寬度對時間變化表（本表為第一作者製作）

時間 (分)	左邊界 (cm)	右邊界 (cm)	寬度 (cm)	時間 (分)	左邊界 (cm)	右邊界 (cm)	寬度 (cm)
0	31.77	89.63	57.86	21	22	91.12	69.12
3	31.52	99.3	67.78	24	23.92	93.8	69.88
6	32.48	95.12	62.64	27	27.34	97.96	70.62
9	32.47	97.67	65.2	30	32.93	105.4	72.47
12	26.66	94.99	68.33	33	45.89	118.2	72.31
15	24.59	96.45	71.86	36	51.11	125.73	74.62
18	24.84	95.2	70.36	39	32.73	105.01	72.28

時間 (分)	左邊界 (cm)	右邊界 (cm)	寬度 (cm)
42	69.14	143.2	74.06
45	40.85	115.3	74.45
48	40.52	115.6	75.08
51	31.72	103.8	72.08
54	28.9	103.67	74.77
57	27.36	104.6	77.24
60	30.7	103.8	73.1
63	27.16	102.8	75.64
66	27.7	102.4	74.7
69	29.37	105.48	76.11
72	25.6	100.35	74.75
75	27.77	103.67	75.9
78	28.94	105.8	76.86
81	28.67	103.4	74.73
84	26.67	105	78.33
87	29.62	106.58	76.96
90	29.81	107.3	77.49
93	26.89	105.4	78.51
96	32.56	111.79	79.23
99	28.91	109.25	80.34
102	26.78	103.54	76.76
105	31.22	110.84	79.62

時間 (分)	左邊界 (cm)	右邊界 (cm)	寬度 (cm)
108	25.44	104.67	79.23
111	29.12	107.87	78.75
114	30.87	107.33	76.46
117	27.33	104.21	76.88
120	34.09	110.19	76.1
123	33.02	108.48	75.46
126	26.79	102.46	75.67
129	25.73	101.42	75.69
132	30.45	106.31	75.86
135	28.04	105.39	77.35
138	31.67	108.42	76.75
141	27.95	103.61	75.66
144	25.23	98.65	73.42
147	32.14	107.96	75.82
150	26.36	98.45	72.09
153	33.45	106.02	72.57
156	27.88	101.48	73.6
159	29.73	103.75	74.02
162	34.26	107.92	73.66
165	33.74	106.22	72.48
168	26.55	99.58	73.03
171	28.29	100.44	72.15

我們大約將其分為三階段：

第一階段為 0 到 36 分鐘，在此階段新月丘寬度變化速率較高。其趨勢線斜率約為 0.3

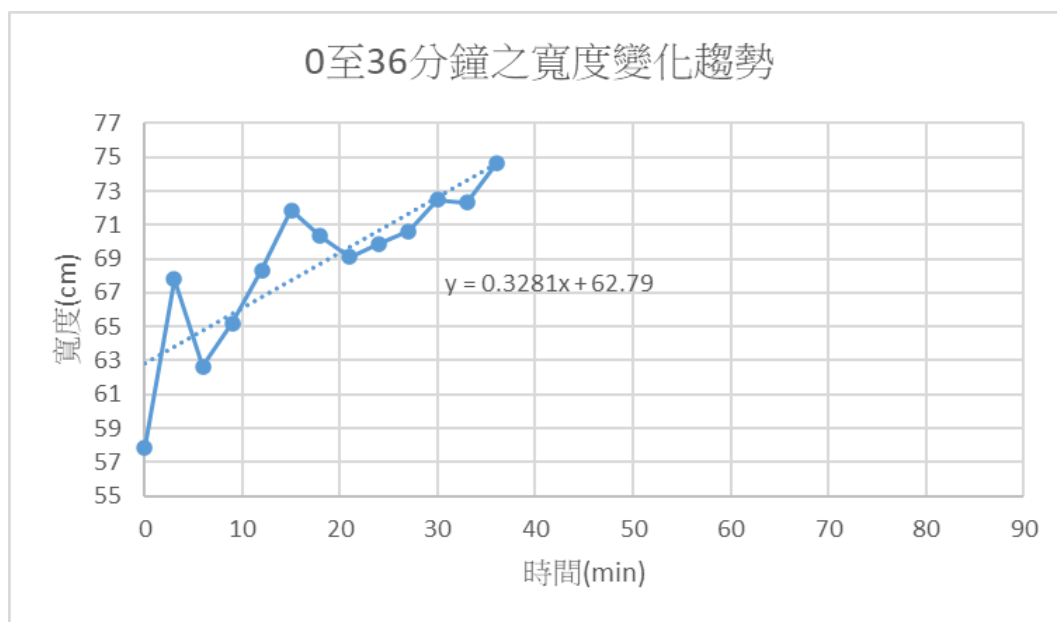


圖 32 0至36分鐘之新月丘寬度變化趨勢圖（本圖為第一作者製作）

第二階段為 36 到 102 分鐘，在此階段新月丘仍在變寬，但變化速率較低。趨勢線斜率約為 0.08。

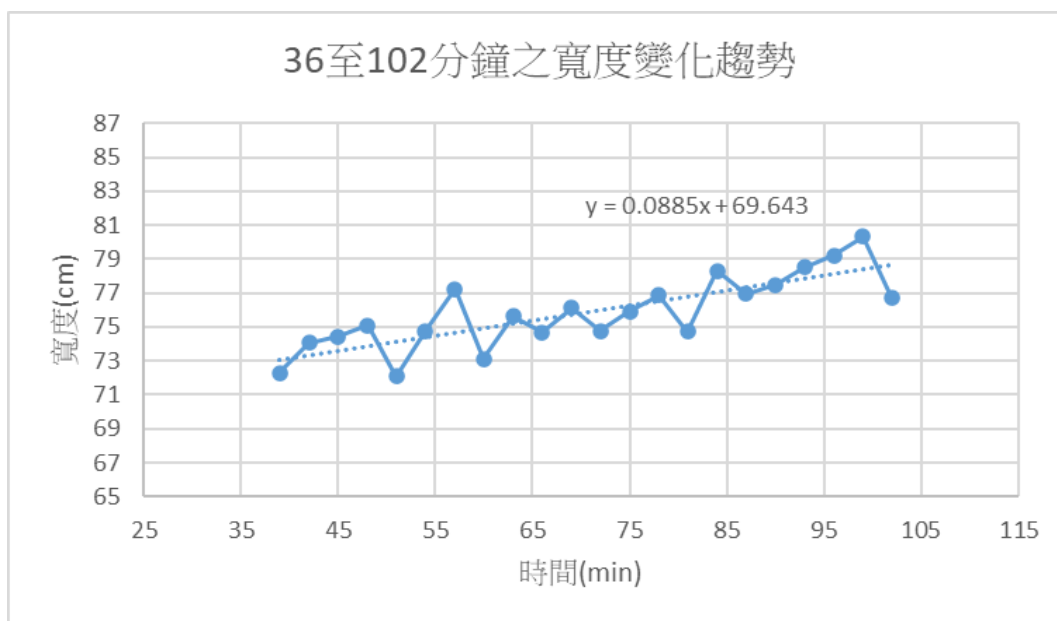


圖 33 36至102分鐘之新月丘寬度變化趨勢圖（本圖為第一作者製作）

第三階段為 102至 180分鐘，在此階段新月丘寬度逐漸下降。其趨勢線斜率約為 -0.08。

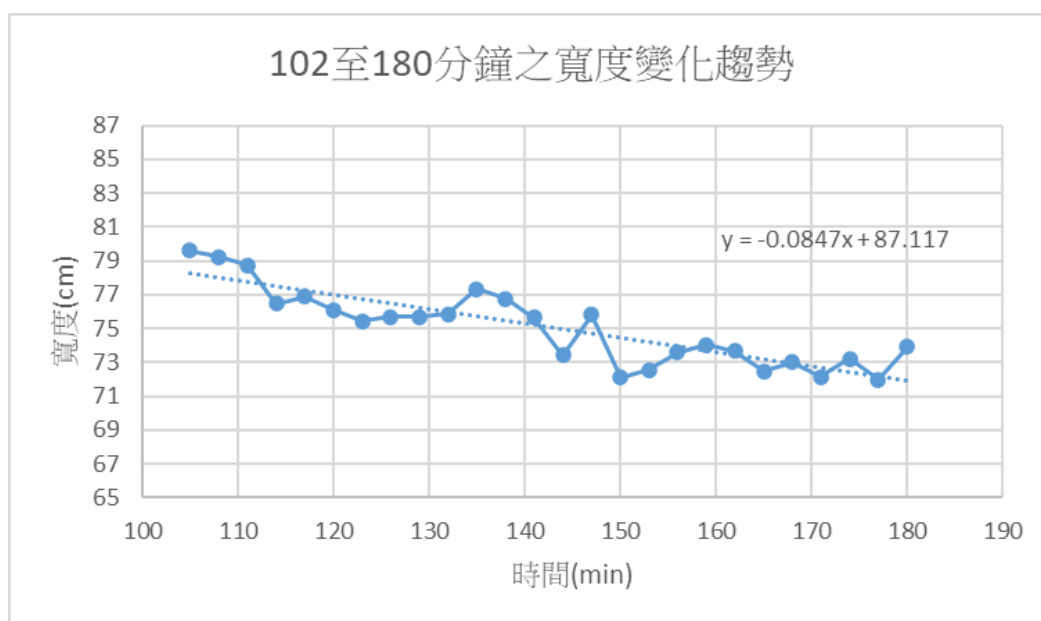


圖 34 102至180分鐘之新月丘寬度變化趨勢（本圖為第一作者製作）

二、討論

（一）波紋實驗——實驗 1-0及 2-0

在實驗 1-0及 2-0中，我們發現當風速小於 5.8 m/s及 11.7 m/s時，將無法吹動沙粒。我們發現沙粒能否被吹動取決於風速有無達到「啟動速度」。Bagnold (1951) 的著作中提及的啟動速度公式：

$$V_* = C_I \sqrt{\frac{(\rho_s - \rho_a) g d}{\rho_a}} \quad (1)$$

其中 V_* 啟動速度。 C_I 為正比係數，通常以0.1帶入。 ρ_s 和 ρ_a 分別為沙粒和空氣密度。 d 為顆粒大小。將2V（粗）、5V（細）的石英沙數據帶入，即粒徑大小 0.3 mm及 1 mm、石英砂粒密度 2.65 g/cm³、空氣密度（NTP下） 1.184 kg/m³，算出啟動速度約為 7.9 m/s及 14 m/s。考慮空氣密度、沙密度的浮動及粒徑些微不均勻的情況下，我們認為這是合理的數據。

（二）波紋實驗——實驗 1

在實驗 1 中，我們發現風速與波紋長度有顯著正相關。在穩定流場情況下，因為風速越高，風的搬運能力越強。Bagnold (1951) 建議的風沙運輸速率為：

$$q_s = C_2 \sqrt{\left(\frac{d}{d_r}\right)} \left(\frac{\rho_a}{g}\right) (V - V_*)^3 \quad (2)$$

其中 q_s 為運輸速率，單位為 $[kg/m \cdot s]$ 。 C_2 為一常數。 d 為粒徑， d_r 為標準沙的參考粒徑（0.25mm）。 ρ_a 為沙粒密度。 V 為風速， V_* 為啟動速度。可以知道沙子的運輸能力與風速呈三次方正比關係。因此當風速高於啟動速度越多時，沙粒能被運移至更遠的地方堆積。

（三） 波紋實驗——實驗 2

在實驗 2 中，分析數據後發現當使用較大粒徑沙粒時，波長整體大於實驗1（小粒徑），且風速與波紋的關係不如過去文獻與實驗1所得之正相關，而是呈現負相關。也就是風速越大、波紋越短，我們的推測如下：

1. 粗沙波長整體大於細沙波長之原因

在實驗1與實驗2中，當風速與啟動速度之差為定值時，根據式（2），影響運輸速率的變數僅有粒徑 d ，粒徑越大，運輸速率越高，造成粗沙整體波長較大。為維持波指數的相似，波長越長，波高就會越高，從而影響背風坡上之渦流長度，且渦流有利於沙子運動。故推測粒徑越大時，不只需考慮風的運輸能力，更需考慮渦流的影響。

2. 粗沙的風速與波長呈現負相關之原因

當風速提高，流場較為穩定，同時風侵蝕沙粒的能力也隨之提升，使波高下降，導致風形成的渦流長度減小，使沙粒沉積較快，波長下降。當風速增快，流場越穩定，背風渦流範圍越窄，導致波長下降。

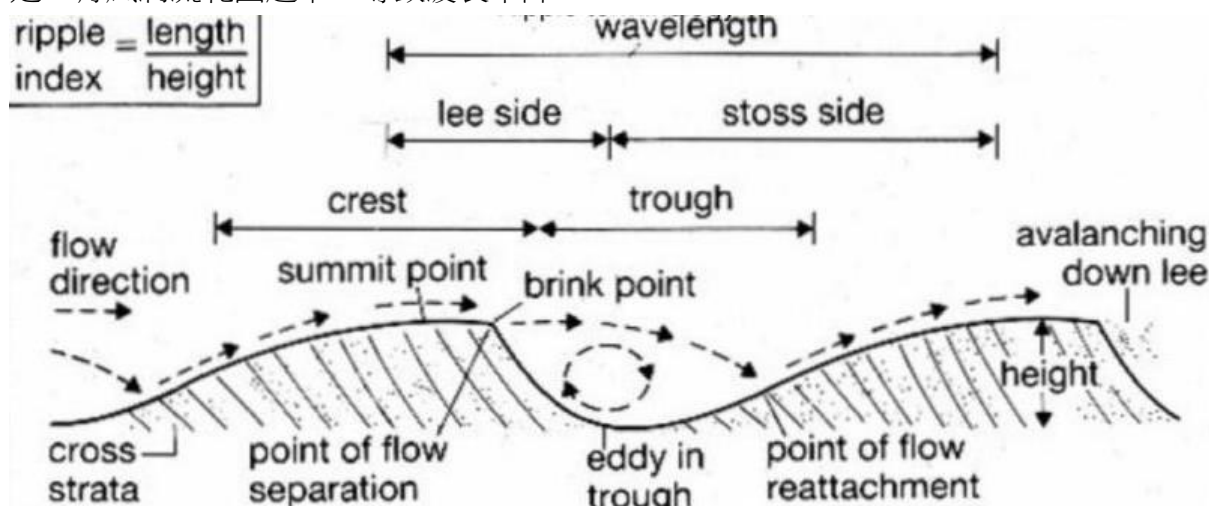


圖 35 波紋相關名詞示意圖（圖源：Baggs（2001），p.38）

名詞定義與解釋

波長（Wavelength）：波鋒（Crest）加波谷（Trough）長。

同時也是兩波鋒最高點（Summit Point）連線長

背風面（Lee Side）：渦流（Eddy）帶起的沙之堆積處

迎風面（Stoss Side）：直接面對風向（Flow direction）的一側，沙粒在此處被風帶起

波指數（Ripple Index）： $\frac{\text{波長 } l}{\text{波高 } h}$

(四) 波紋移動速度實驗——實驗 3

觀察圖15與圖16可發現當風速越快時，其移動速度越高，二者為高度正相關。其 R^2 值高達0.998，這也與預測相符。從能量的角度分析，由動能公式（式 3）可知物體的能量應與移動速度的平方正相關。

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 \quad (3)$$

假設能量完全轉換（ $E_{k風} = E_{k沙}$ ），則其比值應為參與移動的風與沙之質量（m）比。考慮能量的消耗（如摩擦熱） $E_{k風} = E_{k沙} + E_{消耗}$ ，我們預期在同一模型下的能量轉換效率（ $E_{k沙} : E_{k風}$ ）應固定。

根據Bagnold（1951）給出的躍移高度與風速、啟動速度對照圖（圖19）大概可以估計沙子躍移高度為2cm，假設單位截線長 L（即出風口的橫切長度120cm）在單位時間 Δt 下的風體積為 $0.02V \Delta t L$ ，移動的空氣質量為 $0.02V \Delta t L \rho_a (kg)$ 。又根據式（2）帶入數據後（ $C_2 = 1.5, d = 0.225(mm), d_r = 0.25(mm), V_* = 5.4(m/s), \rho_s = 2.65(kg/m^3), g = 9.8(m/s^2)$ ）可求得單位時間內沙的運移量 $0.385(V - 5.4)^3 L \Delta t (kg)$ 。將風速及沙紋移動速度帶入動能公式可求得風的動能及沙波紋的動能，實驗3中的能量轉換如表7

表 7

風速(m/s)	風動能(J)	移動速度(m/s)	沙運移量(kg)	沙動能(J)
6.2	5.64360704	8.6524×10^{-6}	0.0110	$8.2427538 \times 10^{-13}$
6.6	6.80790528	2.0169×10^{-4}	0.0880	$3.58077336 \times 10^{-9}$
7	8.12224	3.6539×10^{-4}	0.2970	$3.96638798 \times 10^{-8}$
7.4	9.59570432	5.2608×10^{-4}	0.7042	$1.948954371 \times 10^{-7}$

其中沙運移量的單位為每單位時間(s)每截線長(m)的沙通量(kg/m-s)，倒入的沙為9公斤，運移量為1.5(kg/m-s)並不合理，在沙箱寬度為1.2公尺的情況下，每秒會有1.8公斤的沙被移動。如此高的運輸速度並無法支持沙子受到長時間的吹蝕。

參考其他運移速率經驗公式，Kawamura(1951)提出的公式為：

$$q_s = C_3 \left(\frac{\rho_a}{g} \right) (V - V_*) (V + V_*)^2$$

其中 C_3 根據Kawamura的建議係數為2.78。帶入此公式算出的運移量分別43.29991837，92.46938122，147.7970547，209.5716049。

Zingg(1952)提出的公式為：

$$q_s = C_4 \left(\frac{d}{d_r} \right)^{3/4} \left(\frac{\rho_a}{g} \right) V_*^3$$

係數 C_4 為0.83。運移量為49.42592902，59.6226918，71.13345329，84.03784978。

此兩組經驗公式亦可能礙於適用尺度的差異無法有效的估測沙的運移量。不過我認為若是找到合理的估計方式，再對應到能量的轉換條件，應能有效地建立波紋移動速度模型，並可以由觀測移動速度去反推其平均風速。

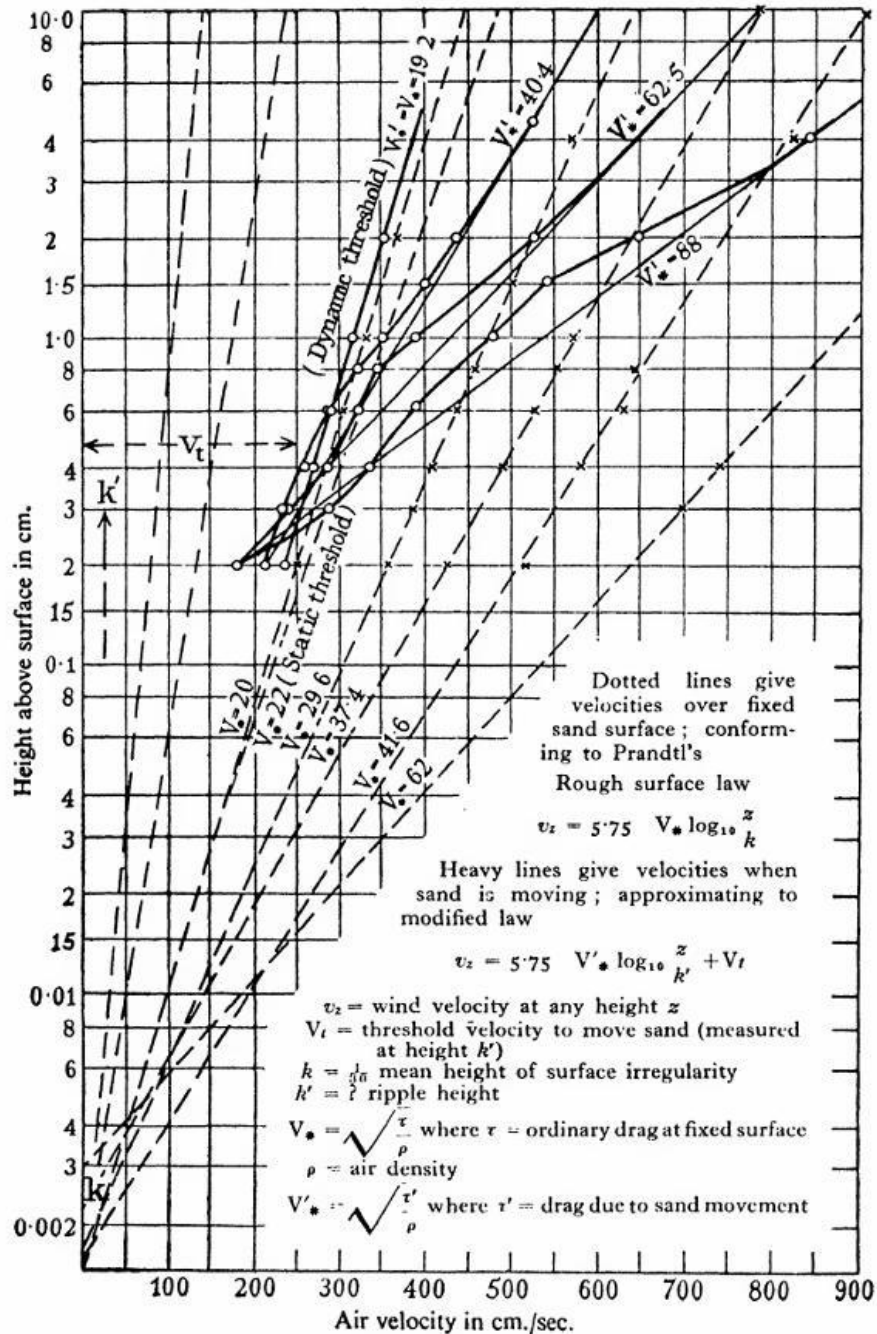


圖36 躍移高度與風速、啟動速度對照圖（圖源：Bagnold, Ralph Alger (1941).）

（五）沙丘實驗——實驗 4：楔形沙丘到新月丘之演化過程

1. 形狀

我們發現自己做出之模擬沙丘與自然中的新月丘形狀仍有些許不同，自然中新月形沙丘為圖 26-1，呈流線形；模擬實驗的沙丘為圖 26-2（箭頭指示風的去向），沙丘邊緣有稜角。我們推測有幾點原因：



圖 37-1 自然界中新月丘
John McCauley於祕魯沿海攝

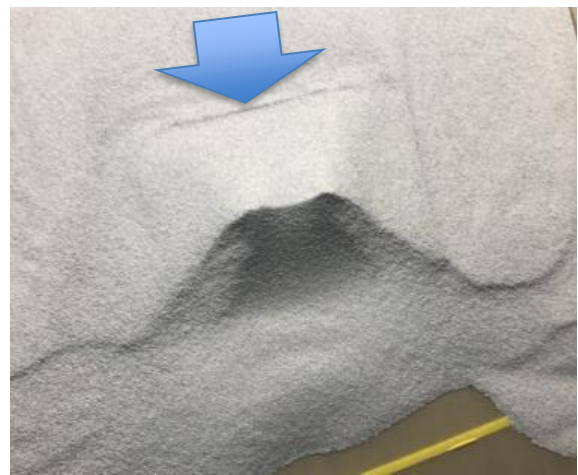


圖 37-2 模擬實驗的沙丘
(本照片為第一/第二作者拍攝)

(1) 沙丘模型形狀

我們設計模型時採用楔形模型，與現實中之餅狀、盾狀不同。楔形沙丘的垂直受風面積較大，空氣流動不如餅狀與盾狀沙丘可以繞過沙丘。

(2) 沙丘模型角度

為方便觀察，我們設計的楔形沙丘迎風坡與背風坡傾角分別為30度與60度，自然中沙丘之傾角分別約為13到20度與30到34度（休止角）。角度過大可能使迎風面的沙粒難以躍移並堆積至波峰；背風面的沙子缺乏前方沙源補充，整體形狀變化以沙丘橫向兩側沙粒的流失為主。

2. 波紋位置

觀察波紋位置我們發現在沙丘背風側無沙紋產生，推測有下列兩種可能原因：

- 1.該處無風通過，推測需要流場與沉積表面接近平行的條件下，波紋才能生成。
- 2.該區域主要動力來源是渦流，由於渦流無法提供穩定、且方向單一的動力，所以沙紋無法在此形成。

(六) 沙丘實驗——實驗 4：錐狀沙丘到新月丘之演化過程

錐狀沙丘與楔形沙丘具有相同之演化順序，合理的推測風速、形狀不影響沙丘之演化過程，只影響變化速率。風速越高，粒徑越小，風的搬運、侵蝕能力越強，變化速率越高。若沙丘前方迎風面有足夠沙源補充流失的沙子（如楔形沙丘），則變化速率越慢。反之，錐狀沙丘前方沒有足夠的沙源補充，所以變化速率就很快。

(七) 沙丘實驗——實驗5：新月丘寬度變化

第一階段：0 至 15 分鐘

此階段為延伸期，為沙丘形狀延伸主要階段，可對應到圖22中趨勢線斜率較高，即寬度變化速率較快。

第二階段：36 至 102 分鐘

此階段為崩落期，沙丘之迎風面受風侵蝕，沙子沿兩側被運移至後方，導致沙丘寬度仍有變長的趨勢，但速率沒有延伸期高。

第三階段：102 至 180 分鐘

此階段為消逝期，此時兩側的沙丘沿伸區向內收縮，導致沙丘寬度逐漸下降。

（八）縱向沙丘之生成

在進行實驗 1 至 5 時，我們發現在實驗區前端的沙子經過風的侵蝕後，都會出現一條條與風向平行的縱向條紋。（箭頭指示風的去向）

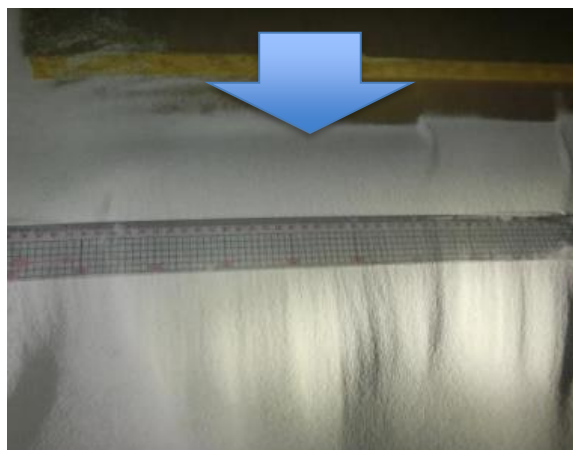


圖 38-1 細沙 風速7.4m/s
（本照片為第一/第二作者拍攝）



圖 38-2 細沙 風速7.4m/s
（本照片為第一/第二作者拍攝）



圖 38-3 粗沙 風速13.7m/s
（本照片為第一/第二作者拍攝）



圖 38-4 粗沙 風速13.7m/s
（本照片為第一/第二作者拍攝）

根據何春蓀（1986）之敘述：「縱丘（Longitudinal Dune）和風向平行發育，多發生在沙量中等、風速強、植物少、風向固定之沙漠地區。」我們推測出現縱向沙丘有下列兩個原因：

1. 該區域與最接近出風口，受到的風力最強。
2. 由於該區域為沙區前端，導致被侵蝕後前方無沙源補充。

（九）火星相關參數之討論與比較—以橫向風成脊（Transverse Aeolian Ridges）為例

1. 型態比較

觀察火星上之橫向風成脊（TAR）發現其形成之新月型沙丘與實驗同樣非流線型，如圖 28。根據討論四之結論，我們可以推測其並非地球上之餅狀、盾狀演化而來。且除了地球上新月丘交錯的排列方式，火星上的新月形沙丘也會有如圖中整齊排列的形式。

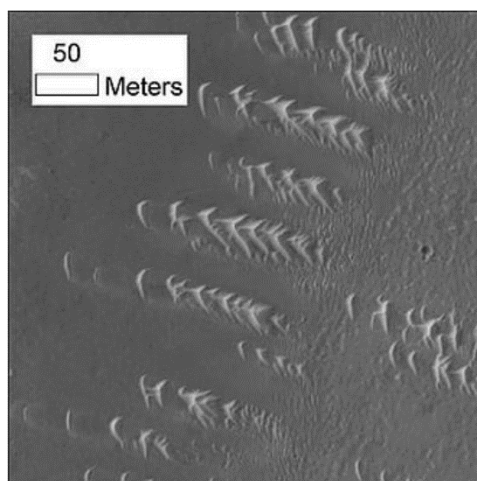


圖 39 新月丘型TAR

圖片來源：HIRISE攝影
拍攝時間：2014/05/03
火星時間：15:24
地點：(0.537°,357.444°)
(https://www.uahirise.org/ESP_036410_1810)

2. 動力來源差異

比對火星、地球與實驗之相關物理量（表 8）並帶入式（1）後可發現：火星沙粒的啟動風速遠大於平均風速。根據文獻我們推論可能是因為火星上多了季節性二氧化碳汽化熱當作沙子運移的動力來源。由於火星大氣壓力較小，液態物質無法穩定的存在，進而汽化造成壓力差帶動沙子移動。而這是地球上從未有過的現象，恰好能說明啟動風速跟火星上平均風速當中的能量差異。而能量較高也可帶動較多沙量，或許是尺度大小差異之原因。

表8 火星與實驗之相關物理量對照表（本表為第一作者製作）

物理量	火星	實驗
重力加速度（m/s ² ）	3.71	9.81
風速（m/s）	1~4	6.6/13.7
空氣密度（kg/m ³ ）	≈ 0.02	1.184
沙粒密度（g/cm ³ ）	3.2	2.65
沙粒粒徑（mm）	0.5	0.3/1
地表大氣壓力（hPa）	6.36	1013

3. 橫向風成脊（TAR）分布差異原因

由文獻得知南半球的TAR數量多於北半球，我們依據火星南北半球地形特徵差異推論出可能的兩個原因：

（1）二氧化碳含量：南半球為古老地形所含資源非常豐富，二氧化碳含量接近於大氣的80%，遠多於北半球的二氧化碳含量。

（2）平均地形高度：由於南半球平均地形高度遠高於北半球，大氣壓力小於北半球，因此南半球的二氧化碳相較於北半球較容易汽化，使環境溫度下降，從而造成壓力差形成風。

綜上所述，我們認為火星南半球的動力來源較北半球強，可能是南半球的TAR較多之原因。

肆、結論與應用

一、沙紋實驗

（一）風速：一般來說當風速越高，沙粒能被運移至更遠的地方堆積。此時沙波紋長度較長。

（二）粒徑大小：當粒徑越大，所需要的啟動速度較高，從而影響波高的大小。

（三）渦流長度：渦流長度為主要影響波紋長度之因素。風速越高則渦流越長，但當波高太小時，渦流長度也會隨之減少。進而使波紋長度下降。

二、移動速度實驗：風速與沙紋移動速度呈高度正相關，若能找到參與移動的沙質量估計方式，應能建立模型以估測風速。

三、沙丘實驗

（一）不管風速大小、粒徑、沙丘初始形狀如何，新月形沙丘的演化過程皆類似。

（二）通常來說，新月形沙丘的演化過程可簡單分為三個階段。延伸期、崩落期與消逝期。當初始形狀為楔形沙丘時，崩落期為主要存在階段。

（三）縱沙丘之形成需要較高風速且缺乏補充沙源。

四、火星沙丘之比較

（一）火星上的新月沙丘與實驗發現的非流線型相似，其形成方式可能不同於地球。

（二）火星上啟動風速遠大於平均風速，可能暗示火星上沙子的動力來源除了風亦包含二氧化碳季節性汽化造成的影響。

（三）橫向風成脊分布差異可能源自於南北半球平均地形高度及二氧化碳含量。

四、未來展望

（一）探討不同沙丘之形成過程。如橫丘、星狀沙丘、拋物線（U型）丘...等。

（二）探討非單一粒徑混和沙對沙紋長度的影響以更貼合現實世界。

（三）討論沙波紋形狀、沙粒徑對流場穩定性的影響。

（四）找到準確地估計沙運移量的方式，以完成模型的建立。並利用此模型對應自然界中的風沙關係，建立一套可以從遙測估計風速的方式。

（五）研究火星沙丘更多不同的樣貌與特性，以期找出更貼近其真實情況之形成原因。

伍、參考文獻

何春蓀（1986）。普通地質學。臺北市：五南。

楊景春（2012）。地貌學原理（三版）。北京市：北京大學。

朱佳仁（2006）。風工程概論。台北市：科技圖書。

何顯榮、黃朝明（2004）。火星的真相。飛碟探索雜誌珍藏本（25）。

董治寶、呂萍、李超、胡光印（2020）。火星独特风沙地貌之橫向沙脊。陝西 西安：陝西师范大学行星风沙科学研究院。

Bagnold, Ralph Alger (1941). The Physics of Blown Sand and Desert Dunes. London: Methuen.

Kawamura(1951).Study On Sand Movement By Wind

Eric J.R. Parteli et al.(2009). Sand transport on Mars.

Sharon A. Wilson, James R. Zimbelman (2004). Latitude-dependent nature and physical characteristics of transverse aeolian ridges on Mars

【評語】 180019

設計步驟完整，關聯分析的部分有引用前人的研究成果，且除了有討論實驗獲得數據的合理性外，並提出符合專業的解釋。橫向風成脊的觀測以地球為實驗場的概念，並延伸至火星的觀測，數理出數個重點敘明並探討兩星球的差異。部分關係圖的說明在內文中闡釋較為不足，如圖 19 繪製風速與移動速度的二次關係圖，無法容易理解其想表達之觀點。參考文件的部分需再檢視完備，如第 24 頁的圖提及 Baggs(2001)的文獻，但未見引述。