

中華民國第 53 屆中小學科學展覽會 作品說明書

高中組 物理科

040114

上帝劃下的曲線－以流場分析新月丘理論

學校名稱：臺南市私立慈濟高級中學

作者： 高一 鄭迺蓁 高一 高嘉臨 高一 歐映廷	指導老師： 劉昌閔 鄭聖璋
---	-----------------------------

關鍵詞：沙丘、風洞、可視流場

摘要

本研究用自製簡易風洞製造穩定氣流，探討不同風速下沙丘速度及成因，研究得知沙子種類及性質皆會影響沙丘的形成，但特定風向皆能形成新月丘，所以利用保麗龍球來取代沙子，用顯著之運動探討在不同條件下沙丘成因。

實驗中設計單峰型態(不同高度) 在不同風速的比較，並探討雙峰間風速不同所對應關係。發現單峰實驗風速與移動速度為正成長，而單峰起始高度則與移動速度為負成長；雙峰沙丘因前峰所受風力較強，因此速度也越快，結果就能與後峰互相結合。本次實驗証實移動速度受幾個因素影響:1.風力，2.地形。望能建立特定氣流沙塵移動方程，並完善參數，若配合大氣模組參數建立風沙預測系統，可減緩沙漠化，並建立沙塵暴預警措施。

壹、研究動機

在地理課程中觀察到關於新月丘的知識及其形成的各種面貌，引領著我們尋找網路跟新月丘有關的圖片及影片；國家地理頻道以不到一分鐘的片段，用那整齊和壯闊的景觀深深地吸引著我們的眼光，令人迫不及待想明白其中奧妙。

為何因風的引領能形成新月形狀的小沙丘，在大片的土地上展現亂中有序且新月開口一致朝同方向的美感?在好奇心與求知欲的交織下，決定深入探討新月丘的形成和種種變因下的形態。找尋資料的過程中，我們發現很多與新月丘有關的研究，大多是以「地理」的觀點去解釋，於是我們便想嘗試以「物理」的角度去探討及研究關於新月丘形成的原因、不同風速下沙丘的移動速度與沙丘間的交互作用，希望能應用在臺灣風蝕與風積地形的走向及未來防治。

貳、研究目的

一、我們發現不同地方，沙粒大小雖然不同但皆可形成新月丘，希望能建立簡單的實驗模型來探討新月丘的形態與特徵。

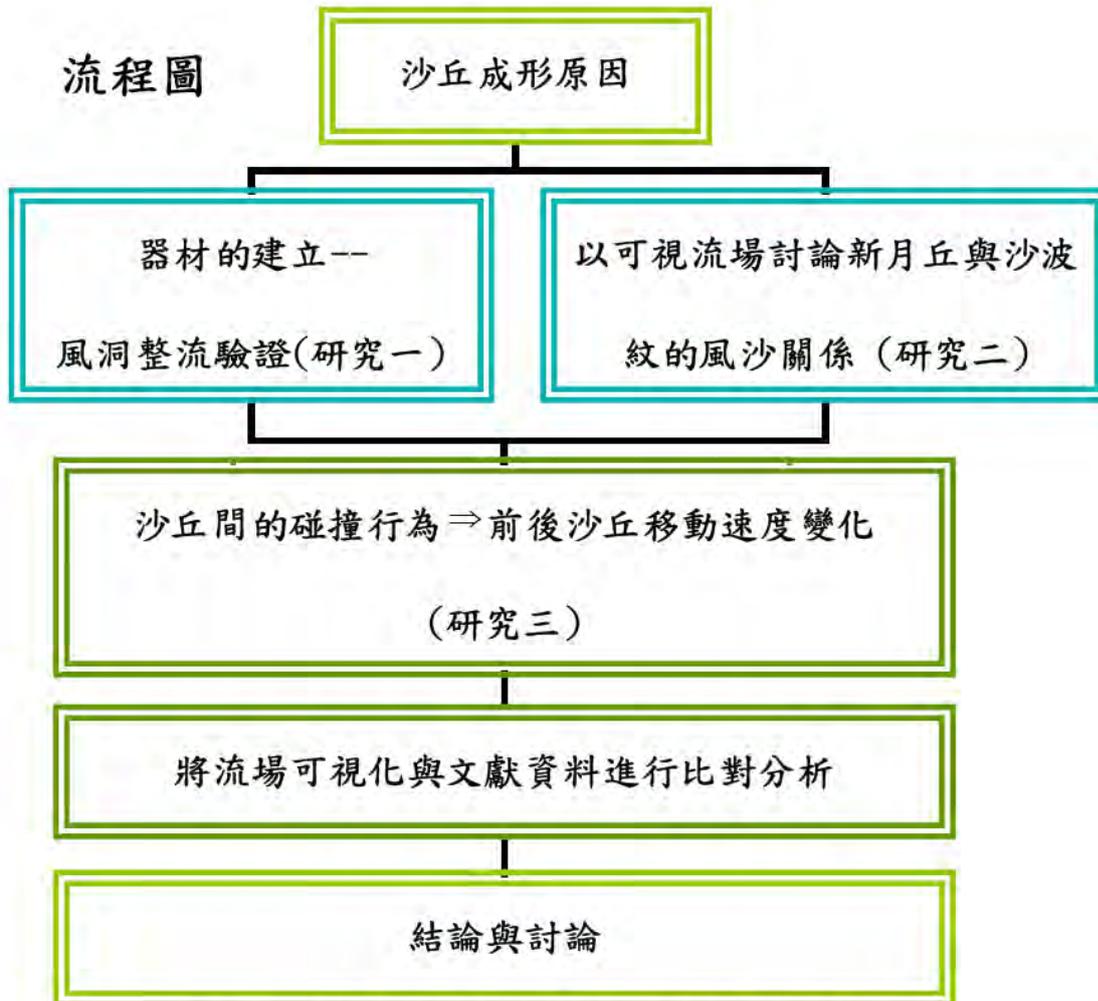
二、在臺南四草發現新月丘的地形，引起我們想了解風速對單一沙丘的影響，在尋找資料後發現各地沙丘性質與地形氣候(風的走向)不同，而形成不同的沙丘型態，希望了解各個原因對其的影響，進而能應用於臺灣風蝕與風積地形的走向及防治。

三、於地理頻道中觀察到因沙丘的前後位置及沙丘大小的不同會影響沙丘的移動速，所以發現到前面的沙丘追及後方的沙丘，而堆疊成一新的沙丘，讓我們想了解沙丘間的交互作用為何，希望能解開沙丘神秘的面紗。

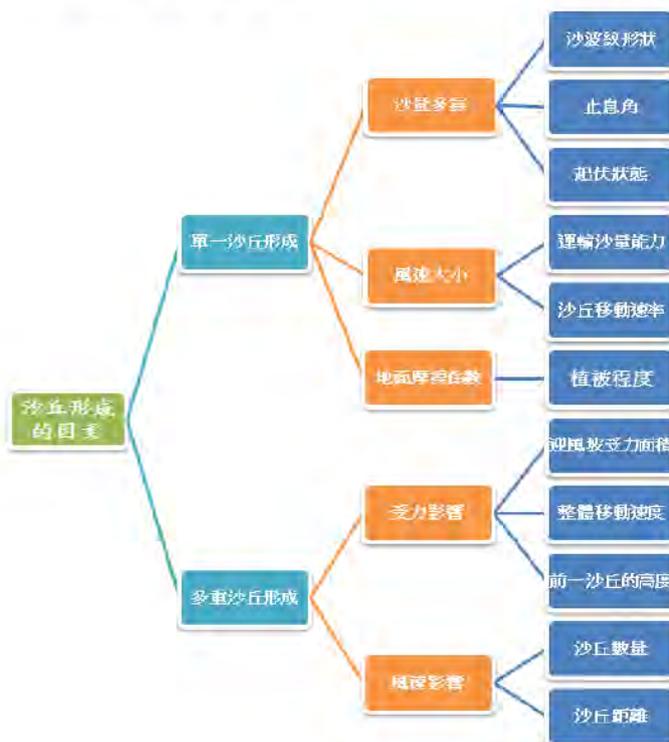
參、研究設備及器材

自製簡易風洞				
	風扇	整流板組	可變電阻器	壓克力風洞
	測量器材			
		風速計	微壓差計 (型號：testo 510)	
流場可視化及輔助器具				
	煙霧機	照相機		

肆、研究過程與方法



圖(一)根據我們討論所繪製出的研究之架構流程圖



圖(二)根據上述理論討論出的實驗變因圖。

在眾多變因中我們針對風速有更進一步的探討，以單一沙丘來說，考慮其風速及原始形態(高度);而多重沙丘除風速外，還選擇前一沙丘與後一沙丘的互動、影響。

一、實驗模型建立

(一)用保麗龍取代沙粒

1. 以沙子做實驗觀察不易，於是我們採用較輕的保利龍來取代沙粒。
2. 根據理論探討所述，各地沙子性質不同卻都能形成新月丘，因此我們假設:新月丘的形成不受限於沙粒，改以保麗龍球(直徑:0.07~0.09cm)代替。

(二)自製實驗用之簡易風洞

我們假設風向固定，只改變風速，建立一個方便觀察的實驗環境

1. 器材：

- (1) 風扇 (Rotary Fan ; R-C-A1016):
- (2) 整流板組 (Rectifica):
- (3) 可變電阻器 (Variable resistor):
- (4) 壓克力風洞 (Acrylic wind tunnel):

2.製作過程及說明：

(1)風扇

如圖(二)所示，原 a 風扇擬定於 c 處，但風扇導入之氣流成漩渦狀，設於 a 處使氣流撞擊 d 處更能破壞其氣流形狀。

為使整體氣流速度更加平均，特別裝設 b 風扇抽風。

(2)整流區

為使氣流能成平行狀流動，本實驗以多片中空板疊成蜂巢狀以期達到整流效果。

未來改進：可組合成 L 型風洞，增加整流區長度，以換取更佳整流效果。

(3)外殼

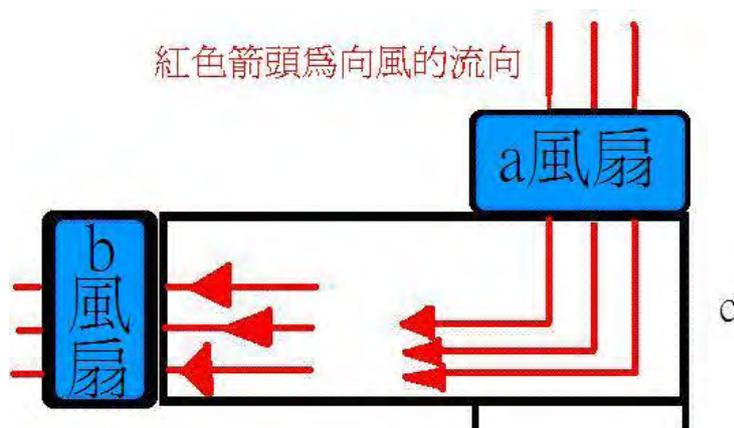
以壓克力板製成，不但能大幅降低外殼震動，透明壓克力可方便觀察實驗過程。

(4)可變電阻器

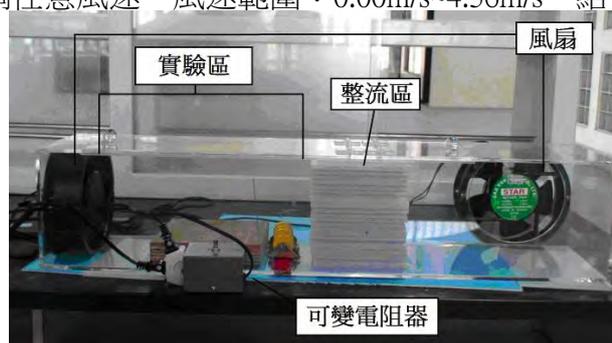
將可變電阻器與風扇組合，控制不同的電壓來改變風扇風力之大小，使風速不僅只有三段，可調任意風速。風速範圍：0.00m/s~4.56m/s。結合上列所需，完成成品圖。



圖(一)壓克力風洞



圖(二)風洞設計說明。藉由此設計以得到最穩定的流場



圖(三) 這個風洞的完成，花了我們不少的構思與組裝，以整流區來說是我們以一片片大片的板子，再加以切割下來的。

二、實驗步驟

(一)實驗一:模擬新月丘的形成並測量沙丘型態(h,RI,RS)

1. 目的:證實保麗龍球可在風洞模型產生沙丘，並測量沙丘型態，以利後續實驗使用

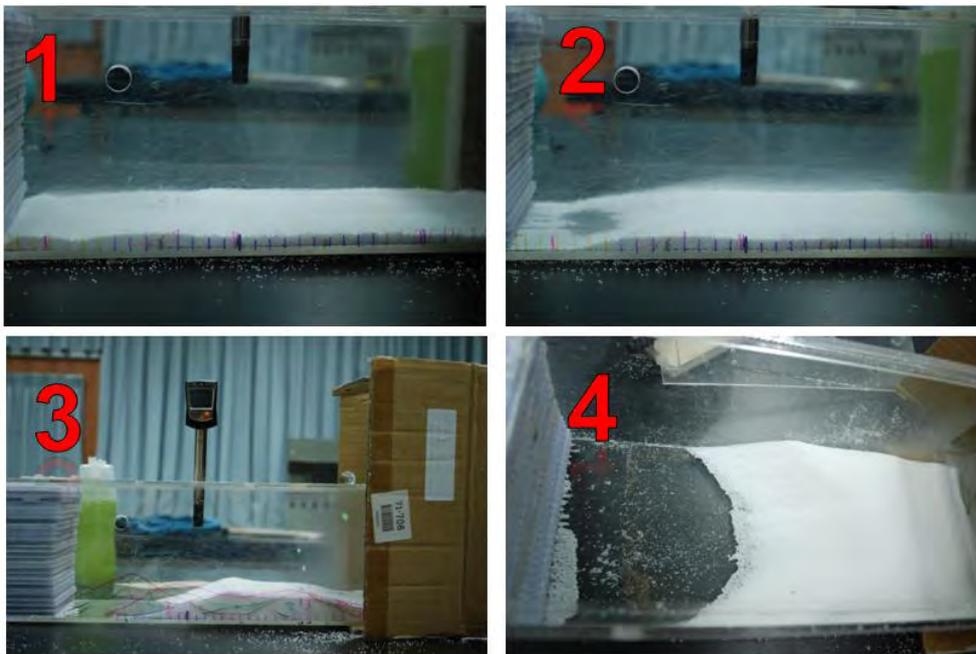
2. 實驗步驟

(1)將保麗龍球鋪平在風洞內觀察區，厚度 1cm(如下圖步驟 1)

(2)將風洞封上，插入風速計做量測。

(3)開啟風扇至風速 2.0m/s，以攝影機拍攝保麗龍球吹動情況。

(4)測量啟動後第 5 秒時沙丘的(h,RI,RS)並利用碼錶計時，紀錄並存證。(在風洞側邊的壓克力旁先描繪大致圖形後，再測量水平與垂直高度 (如下圖步驟 3)



圖(四)實驗一實際測量步驟。

(二)實驗二:風速與單一沙丘移動速度的關係

1. 目的:探討不同風速對相同高度單一沙丘移動速度的影響。

2. 變因討論：

控制變因	風向、砂粒性質、沙丘初始型態
操縱變因	風速
應變變因	沙丘移動速度

3. 實驗步驟

(1)堆疊單個沙丘(高度與底邊固定)。

(2)開啟風扇指風速 0.4、0.6、0.8m/s 三種情況。

(3)以攝影機拍攝保麗龍球吹動情況。

(4)如實驗一紀錄並存證後，計算沙丘的移動速度。

(三)實驗三:單一沙丘的形狀與移動速度的關係

1. 目的:探討不同高度沙丘的形狀與移動速度。

2. 變因討論：

控制變因	風向、砂粒性質、風速
操縱變因	頂點(高度)
應變變因	單一沙丘的形狀與移動速度

3. 實驗步驟

- (1)堆疊單個沙丘(底邊固定)。
- (2)開啟風扇指風速 0.4 、0.8m/s 二種情況。
- (3)以攝影機拍攝保麗龍球吹動情況。
- (4)如實驗一紀錄並存證後，測量沙丘的的形狀並計算沙丘的移動速度。

(四)實驗四:沙丘間的互動關係

1. 目的:探討沙丘初始形態所造成之接近情況。

2. 變因討論：

控制變因	風向、砂粒性質、風速
操縱變因	沙丘初始型態
應變變因	前方沙丘移動的速度

3. 實驗步驟

- (1)推疊兩個不同保麗龍沙丘。
- (2)開啟風扇指風速 0.4 、0.8、1.2m/s 三種情況。
- (3)以攝影機拍攝保麗龍球吹動情況。
- (4)如實驗一紀錄並存證後，測量前方沙丘的的形狀並計算沙丘的移動速度。

伍、研究結果

一、實驗一:模擬新月丘的形成並測量沙丘型態

(一)實驗數據：

第1組		時間		T=0		T=5		T=14		T=25		T=41		T=49		T=66			
風速	位置	高度		位置		高度		位置		高度		位置		高度		位置		高度	
		V=0.4	X1	6.0	1.5	6.0	0.0	6.0	0.0	6.0	0.0	6.0	0.0	6.0	0.0	6.0	0.0	6.0	0.0
	X2	13.0	1.5	13.0	1.8	13.0	1.9	13.0	0.5	13.0	0.4	13.0	0.2	13.0	0.2	13.0	0.0	13.0	0.0
	X3	20.0	1.5	20.0	1.5	20.0	1.6	20.0	1.6	20.0	1.0	20.0	1.0	20.0	1.0	20.0	0.4	20.0	0.4
	X4	25.0	1.5	25.0	1.5	25.0	1.3	25.0	1.4	25.0	1.2	25.0	1.3	25.0	1.3	25.0	1.0	25.0	1.0
	X5	30.0	1.5	30.0	1.6	30.0	1.6	30.0	1.5	30.0	1.4	30.0	1.4	30.0	1.4	30.0	1.9	30.0	1.9
	X6	35.0	1.5	35.0	2.0	35.0	2.3	35.0	2.3	35.0	2.3	35.0	2.3	35.0	2.3	35.0	2.4	35.0	2.4

第2組		時間		T=0		T=9		T=17		T=24		T=29		T=37		T=50			
風速	位置	高度		位置		高度		位置		高度		位置		高度		位置		高度	
		V=0.3	X1	6.0	2.3	6.0	2.0	6.0	0.7	6.0	0.4	6.0	0.0	6.0	0.0	6.0	0.0	6.0	0.0
	X2	13.0	2.3	13.0	2.2	13.0	2.5	13.0	2.4	13.0	1.5	13.0	1.0	13.0	1.0	13.0	0.7	13.0	0.7
	X3	20.0	2.3	20.0	2.5	20.0	2.2	20.0	2.5	20.0	2.7	20.0	2.9	20.0	2.9	20.0	2.4	20.0	2.4
	X4	25.0	2.3	25.0	2.7	25.0	2.7	25.0	2.9	25.0	2.7	25.0	2.6	25.0	2.6	25.0	2.8	25.0	2.8
	X5	30.0	2.3	30.0	2.8	30.0	3.0	30.0	3.0	30.0	3.2	30.0	3.1	30.0	3.1	30.0	2.6	30.0	2.6
	X6	35.0	2.3	35.0	2.8	35.0	3.0	35.0	3.4	35.0	3.4	35.0	3.8	35.0	3.8	35.0	3.5	35.0	3.5

表(一) 實驗一沙丘形成形狀對時間關係表

二、實驗二:風速與單一沙丘移動速度的關係

(一)實驗數據：

1.風洞風速v=0.4m/s

第1組		時間		T=0		T=5		T=10		T=20		T=30		T=40			
風速	位置	高度		位置		高度		位置		高度		位置		高度			
		V=0.4	起點	1.50	1.30	4.00	0.40	6.00	0.30	8.00	0.30	9.00	0.50	11.00	0.20	12.00	0.20
			頂點	13.00	4.00	14.00	4.30	15.50	4.50	18.50	4.40	20.50	4.30	24.00	3.70	27.00	3.70
			終點	27.50	0.50	28.50	0.80	29.00	0.90	30.00	1.50	33.00	1.80	34.00	1.80	34.00	1.80

第2組		時間		T=0		T=5		T=10		T=20		T=30		T=40			
風速	位置	高度		位置		高度		位置		高度		位置		高度			
		V=0.4	起點	1.50	0.80	3.00	0.50	6.00	0.50	8.00	0.30	10.00	0.30	10.50	0.30	11.00	0.30
			頂點	13.00	4.10	14.00	4.70	15.00	4.60	18.00	4.50	21.00	4.50	23.00	3.80	24.00	3.80
			終點	28.00	0.50	29.00	0.50	30.00	1.00	31.00	1.30	33.00	1.50	33.00	1.60	33.00	1.60

第3組		時間		T=0		T=5		T=10		T=20		T=30		T=40			
風速	位置	高度		位置		高度		位置		高度		位置		高度			
		V=0.4	起點	1.50	1.00	4.00	0.40	6.00	0.30	8.00	0.30	9.00	0.40	11.00	0.30	12.00	0.30
			頂點	12.50	4.10	14.00	4.60	15.50	4.40	18.50	4.30	20.50	4.30	23.50	3.70	24.00	3.70
			終點	27.00	0.50	28.50	0.80	29.00	0.80	30.00	1.40	33.00	1.60	33.50	1.70	33.50	1.70

表(二) 風洞風速0.4m/s沙丘移動位置對時間關係表

2.風洞風速v=0.6m/s

第4組		時間		T=0		T=5		T=10		T=20		T=25		T=35			
風速	位置	高度		位置		高度		位置		高度		位置		高度			
		V=0.6	起點	1.30	1.30	4.00	0.30	6.00	0.20	7.50	0.10	11.00	0.50	14.00	0.40	14.00	0.40
			頂點	13.00	4.10	14.00	4.60	15.50	4.60	18.00	4.40	21.00	4.20	25.00	3.40	25.00	3.40
			終點	27.00	0.50	27.00	0.80	29.50	0.90	30.00	1.60	31.00	1.70	35.00	1.40	35.00	1.40

第5組		時間		T=0		T=5		T=10		T=20		T=25		T=35			
風速	位置	高度		位置		高度		位置		高度		位置		高度			
		V=0.6	起點	1.30	1.30	3.50	0.30	6.00	0.20	7.50	0.10	10.50	0.40	13.50	0.50	13.50	0.50
			頂點	13.00	4.00	14.00	4.70	16.00	4.50	18.50	4.30	21.30	4.20	24.50	3.30	24.50	3.30
			終點	27.00	0.70	28.00	0.65	29.50	0.90	30.00	1.50	32.50	1.50	34.00	1.30	34.00	1.30

第6組		時間		T=0		T=5		T=10		T=20		T=25		T=35			
風速	位置	高度		位置		高度		位置		高度		位置		高度			
		V=0.6	起點	1.30	1.30	4.00	0.30	5.80	0.15	7.50	0.20	10.50	0.40	13.50	0.50	13.50	0.50
			頂點	12.00	4.00	13.50	4.80	15.50	4.60	18.30	4.20	21.00	4.20	24.00	3.45	24.00	3.45
			終點	26.00	0.60	28.50	0.70	29.50	0.80	30.50	1.70	31.50	1.60	34.50	1.35	34.50	1.35

表(三) 風洞風速0.6m/s沙丘移動位置對時間關係表

3.風洞風速 $v=0.8m/s$

第7組		T=0		T=5		T=10		T=15		T=25		T=30	
風速	時間	位置	高度										
$V=0.8$	起點	1.00	1.30	4.00	0.20	6.00	0.00	7.00	0.00	12.50	0.50	16.00	0.70
	頂點	12.50	4.10	13.50	4.90	15.50	4.70	18.00	4.40	21.00	4.10	24.50	3.20
	終點	27.00	0.50	28.00	0.60	30.00	0.80	30.00	1.70	30.00	1.50	35.00	1.00

第8組		T=0		T=5		T=10		T=15		T=25		T=30	
風速	時間	位置	高度										
$V=0.8$	起點	1.00	1.30	3.50	0.20	6.00	0.00	7.00	0.00	12.50	0.50	16.00	0.80
	頂點	13.00	4.20	14.00	5.00	16.00	4.80	18.50	4.50	21.50	4.30	25.00	3.30
	終點	27.00	0.60	28.00	0.60	30.00	1.00	30.00	1.50	33.00	1.50	34.50	0.90

第9組		T=0		T=5		T=10		T=15		T=25		T=30	
風速	時間	位置	高度										
$V=0.8$	起點	1.00	1.30	3.00	0.20	6.00	0.00	7.00	0.00	12.50	0.50	16.00	0.70
	頂點	12.00	4.00	13.50	4.80	16.50	4.50	19.00	4.20	22.00	4.00	25.00	3.10
	終點	26.00	0.60	27.00	0.60	30.00	1.00	30.00	1.50	33.00	1.50	34.50	0.80

表(四) 風洞風速 $0.8m/s$ 沙丘移動位置對時間關係表

三、實驗三:單一沙丘的形狀與移動速度的關係

(一)實驗數據:

1.風洞風速 $v=0.4m/s$

第1組		T=0		T=6		T=11		T=24		T=36		T=49	
風速	時間	位置	高度										
$V=0.4$	起點	1.50	1.30	4.00	0.40	6.00	0.30	8.00	0.30	9.00	0.50	11.00	0.20
	頂點	13.00	4.50	14.00	4.90	15.50	5.10	18.00	5.00	20.50	4.90	23.50	4.10
	終點	27.50	0.50	28.50	0.80	29.00	0.90	30.00	1.50	33.00	1.80	34.00	1.80

第2組		T=0		T=27		T=49		T=69		T=91		T=112	
風速	時間	位置	高度										
$V=0.4$	起點	1.00	1.00	3.00	1.10	3.50	0.70	5.00	0.50	9.00	0.50	10.00	0.20
	頂點	15.00	6.20	15.50	6.30	17.00	6.50	19.00	6.00	21.00	5.90	22.00	5.50
	終點	30.00	0.60	30.00	0.80	31.00	1.00	33.00	1.50	33.00	2.00	35.00	1.90

第3組		T=0		T=18		T=47		T=65		T=80		T=100	
風速	時間	位置	高度										
$V=0.4$	起點	1.00	2.00	1.50	0.80	2.50	0.50	4.00	0.40	7.00	0.60	8.00	0.30
	頂點	14.00	6.70	14.00	7.00	16.00	6.70	17.50	6.50	19.50	6.40	21.00	6.00
	終點	29.00	0.50	29.00	0.80	31.00	1.10	32.00	1.30	32.00	1.80	33.00	2.20

第4組		T=0		T=4		T=12		T=21		T=28		T=40	
風速	時間	位置	高度										
$V=0.4$	起點	1.50	0.80	3.00	0.50	6.00	0.50	8.00	0.00	10.00	0.30	10.50	0.30
	頂點	13.00	4.10	14.00	4.70	15.00	4.60	18.00	4.50	20.00	4.50	23.00	3.80
	終點	29.00	0.50	29.00	0.50	30.00	1.00	31.00	1.30	33.00	1.50	33.00	1.60

表(五) 風速 $v=0.4m/s$ 不同高度單一沙丘移動位置對時間關係表

2.風洞風速 $v=0.8m/s$

第5組		T=0		T=10		T=15		T=24		T=38		T=57	
風速	時間	位置	高度										
$V=0.8$	起點	1.00	2.50	2.00	0.40	5.00	0.60	7.00	0.60	9.00	0.50	16.00	0.60
	頂點	11.00	5.50	13.00	5.50	15.50	5.40	17.00	5.30	20.00	5.00	27.00	3.00
	終點	26.00	0.50	28.00	0.60	28.50	0.80	30.00	1.40	30.00	2.10	35.00	1.70

第6組		T=0		T=10		T=17		T=33		T=58		T=71	
風速	時間	位置	高度										
$V=0.8$	起點	1.00	1.50	3.00	1.10	6.00	0.70	7.00	0.60	9.00	0.50	10.00	0.50
	頂點	13.00	6.00	13.00	6.10	15.00	5.70	17.00	5.60	19.50	5.50	21.50	5.10
	終點	28.00	1.30	31.00	1.30	31.50	1.70	32.00	1.90	32.50	2.10	33.00	3.00

第7組		T=0		T=5		T=11		T=16		T=23		T=30	
風速	時間	位置	高度										
$V=0.8$	起點	1.00	1.30	4.00	0.20	6.00	0.00	7.00	0.00	12.50	0.50	16.00	0.70
	頂點	13.00	5.00	14.00	5.70	16.50	5.00	19.00	4.60	22.00	4.00	26.00	3.10
	終點	27.00	0.60	27.00	0.60	30.00	1.00	30.00	1.50	33.00	1.50	34.50	0.80

表(六) 風速 $v=0.8m/s$ 不同高度單一沙丘移動位置對時間關係表

四、實驗四:沙丘間的互動關係

(一)實驗數據：

1.風洞風速 $v=0.8m/s$

第1組

風速	時間	T=0		T=14		T=34		T=61		T=70		T=91	
		位置	高度										
$V=0.8$	1號起點	1	1	1.1	1.5	1.5	1	2	0.6	8	0.5	10	0.6
	1號頂點	9.5	5.4	10.5	5.2	12	5	14	4.5	15.5	4.4	16	4.3
	1號終點	20	0.5	20	1.3	20	2	21	3.1	21	3.7	21	3.8
	2號頂點	29.5	5.2	29	4.7	29	4.6	29	4	29	4.4	29	3.8
	2號終點	37	0.6	36	0.8	36	1	37	1.4	36	2	37	2.7

第2組

風速	時間	T=0		T=11		T=15		T=24		T=31		T=42	
		位置	高度										
$V=0.8$	1號起點	1	1.5	3	0.3	7	0.4	8.5	0.4	10.5	0.5	11	0.5
	1號頂點	8.5	4.4	11.5	4	15	3.4	17	3.5	19	3.3	19	2.5
	1號終點	18	0.8	18	2.2	18	2.7	21	2.9	22	3.1	22	3
	2號頂點	27.5	4	27.5	4	27.5	4	27.5	3.8	27.5	3	27.5	2.9
	2號終點	34.5	3	34	3	34	2.8	34	2.8	34	2.7	34	2.7

第3組

風速	時間	T=0		T=14		T=23		T=35		T=49		T=67	
		位置	高度										
$V=0.8$	1號起點	1	1.6	2	0.9	3	0.3	7.5	0.5	9	0.4	11	0.4
	1號頂點	12	4.8	12	5	14	4.7	16	4.9	19	4.7	22	4.4
	1號終點	23	1	23	2.1	23.5	2.7	24.5	3.5	25	4.3	28	3.8
	2號頂點	33.5	4.2	33	4	33	4.1	33	4	33	4	33	4
	2號終點	38	2.3	38	2.5	37	3	37	3	37	3	37	3

表(七) 風速 $v=0.8m/s$ 雙重沙丘移動位置對時間關係表

2.風洞風速 $v=0.4m/s$

第4組

風速	時間	T=0		T=17		T=40		T=50		T=60		T=75	
		位置	高度										
$V=0.4$	1號起點	1	0.7	2	0.9	3	0.9	5	0.5	8	0.5	10	0.4
	1號頂點	11	5.2	12	5.1	13	4.9	15	5	16.5	4.9	21	4.5
	1號終點	22	0.5	22	1.6	22	2.2	22	3.2	22	4.1	23	4.3
	2號頂點	30.5	4.2	30.5	4.1	30.5	4	30.5	4	30.5	4	30.5	3.9
	2號終點	35.5	1.4	35.5	1.8	35.5	2	35.5	2.3	35.5	2.5	35.5	2.7

第5組

風速	時間	T=0		T=10		T=17		T=27		T=40		T=60	
		位置	高度										
$V=0.4$	1號起點	2	0.8	3.8	0.6	7	0.4	10.2	0.5	11	0.3	14.5	0.4
	1號頂點	12	5.5	14.5	5.3	16.5	5	19	4.2	21.5	3.8	23.5	3.5
	1號終點	23.5	0.8	23.5	2	23.5	3	24	3.6	24.5	3.5	27	3.4
	2號頂點	32	3.5	32	3.6	32	3.7	32	3.6	32	3	32	2.7
	2號終點	38	1	38	1.6	38	2.5	38	2.7	38	2.4	38	2.8

表(八) 風速 $v=0.4m/s$ 雙重沙丘移動位置對時間關係表

3.風洞風速 $v=1.2m/s$

第6組

風速	時間	T=0		T=20		T=40		T=60		T=80		T=100	
		位置	高度	位置	高度	位置	高度	位置	高度	位置	高度	位置	高度
$V=1.2$	1號起點	1	1	2.3	0.9	3.1	1	4.2	0.8	5.5	0.7	6.2	0.6
	1號頂點	10	5.5	11	5.1	13	4.9	15	4.5	18	4.1	21	3.8
	1號終點	20	2	20	2.4	21	2.8	23	3.1	23	3.7	24	3.5
	2號頂點	30	5	31	4.7	31	4.6	31	4.3	32	3.9	32	3.3
	2號終點	40	0.5	39	0.8	38	1.2	38	1.7	39	1.9	39	2.3

第7組

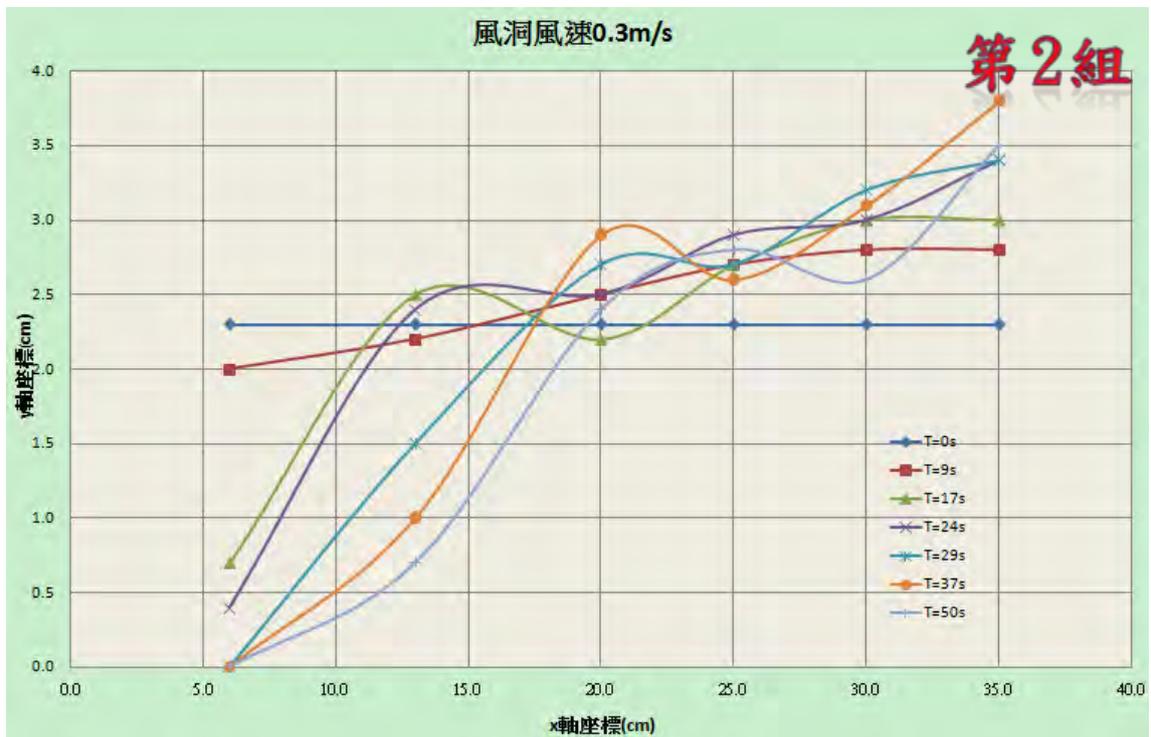
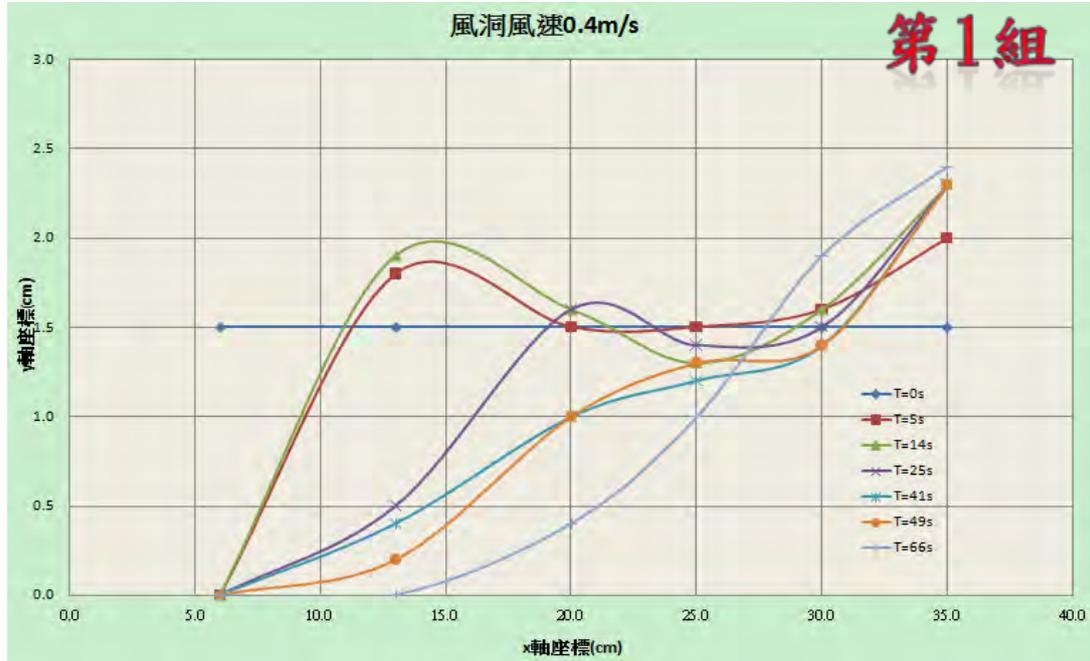
風速	時間	T=0		T=15		T=30		T=45		T=60		T=75	
		位置	高度	位置	高度	位置	高度	位置	高度	位置	高度	位置	高度
$V=1.2$	1號起點	1	1	1.6	0.9	2.2	1	3.8	0.9	4.6	0.8	5.9	0.7
	1號頂點	10	5	11	4.8	12	4.7	13.2	4.5	16	4.3	18.5	4.1
	1號終點	20	1.5	20	1.9	20.8	2.4	21	2.9	21.6	3.4	22.3	3.7
	2號頂點	30	4	30.5	3.6	31	3.3	32	3.2	31	3.1	31	3
	2號終點	40	0.5	39	0.7	38	0.9	37	1.3	36	1.6	35	1.8

表(九) 風速 $v=1.2m/s$ 雙重沙丘移動位置對時間關係表

陸、討論

一、實驗一:模擬新月丘的形成並測量沙丘型態(h,RI,RS)

(一)實驗曲線圖



圖(五) 沙丘形成曲線對時間構成圖。

(二)實驗一討論：

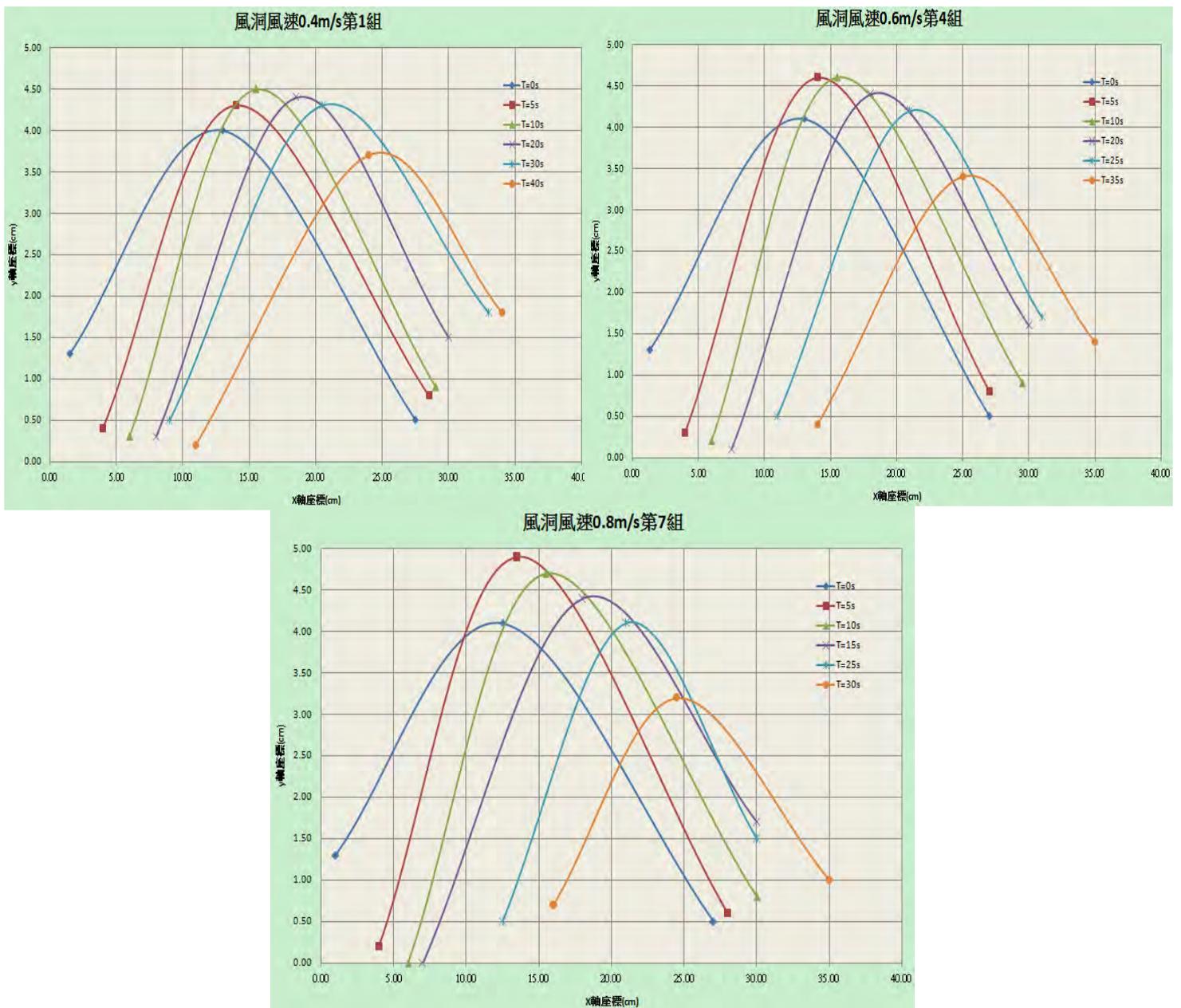
上述兩組不同風速的沙丘形成曲線對時間構成圖是描述不同時間下，風洞內大量保麗龍粒隨風移動的情形，例如第一組在風洞風速為 0.4m/s 的情況下，第一條 T=0s 曲線描述一開始為

鋪平厚度為 1.5cm；第二條 T=5s 曲線則呈現出前端保麗龍粒向後移動，且整體地形開始呈現起伏移動的現象，最終由於風洞長度不足而在 T=66s 曲線呈現出向上堆疊的坡度，也可視作沙丘的迎風坡面。雖無法完全呈現出沙丘的具體成形，但也可以作為後續實驗測量方式的參考。

經過風洞測試沙粒與保麗龍粒的結果比較，因為沙粒的粒徑可能過大或風洞的效率不足，使得沙粒成形沙丘的速度相當緩慢(大約要 2~3hr)，且起伏程度非常不明顯(垂直高度 $h < 0.5\text{cm}$)，所以為了觀察現象，接下來的實驗就先採用保麗龍粒作實驗來驗證相關原理。

二、實驗二:風速與單一沙丘移動速度的關係

(一)實驗曲線圖



圖(六) 不同風速沙丘移動位置對時間圖。
(各取一組作代表)

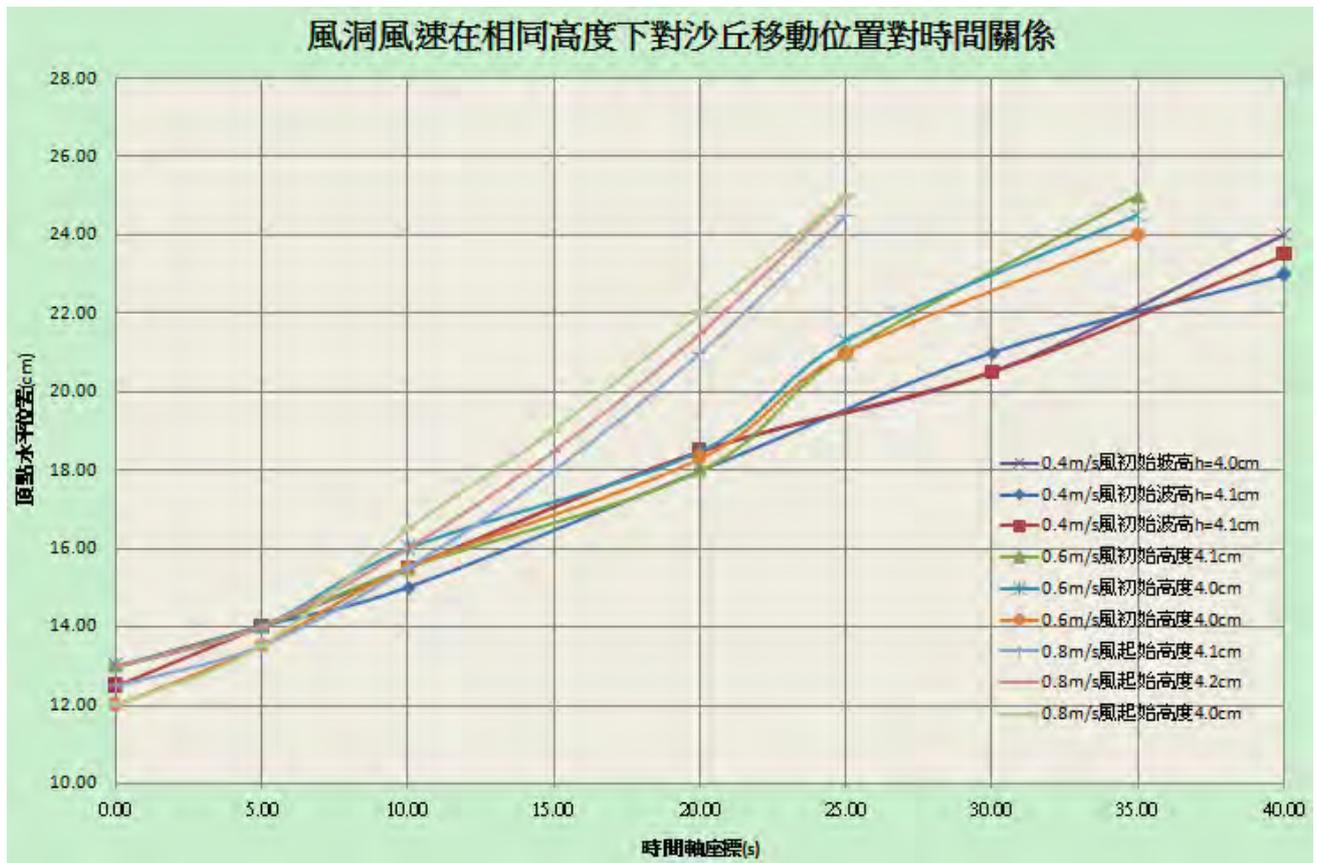
(二)實驗二討論

風速 0.4m/s	第1組 h=4.0		第2組 h=4.1		第3組 h=4.1	
	時間	頂點位	時間	頂點位	時間	頂點位
	0.00	13.00	0.00	13.00	0.00	12.50
	5.00	14.00	5.00	14.00	5.00	14.00
	10.00	15.50	10.00	15.00	10.00	15.50
	20.00	18.50	20.00	18.00	20.00	18.50
	30.00	20.50	30.00	21.00	30.00	20.50
	40.00	24.00	40.00	23.00	40.00	23.50
第1組 v=0.275cm/s		第2組 v=0.250cm/s		第3組 v=0.275cm/s		

風速 0.6m/s	第4組 h=4.1		第5組 h=4.0		第7組 h=4.0	
	時間	頂點位	時間	頂點位	時間	頂點位
	0.00	13.00	0.00	13.00	0.00	12.00
	5.00	14.00	5.00	14.00	5.00	13.50
	10.00	15.50	10.00	16.00	10.00	15.50
	20.00	18.00	20.00	18.50	20.00	18.30
	25.00	21.00	25.00	21.30	25.00	21.00
	35.00	25.00	35.00	24.50	35.00	24.00
第4組 v=0.342cm/s		第5組 v=0.328cm/s		第7組 v=0.342cm/s		

風速 0.8m/s	第6組 h=4.1		第8組 h=4.2		第9組 h=4.0	
	時間	頂點位	時間	頂點位	時間	頂點位
	0.00	12.50	0.00	13.00	0.00	12.00
	5.00	13.50	5.00	14.00	5.00	13.50
	10.00	15.50	10.00	16.00	10.00	16.50
	15.00	18.00	15.00	18.50	15.00	19.00
	20.00	21.00	20.00	21.50	20.00	22.00
	25.00	24.50	25.00	25.00	25.00	25.00
第6組 v=0.400cm/s		第8組 v=0.400cm/s		第9組 v=0.433cm/s		

我們整理出不同風速對沙丘移動的影響，以沙丘頂端的位置為主，來計算沙丘移動的速度(如圖所示)，可以發現 X-t 關係圖的斜率與風洞風速有正指數關係，但是由位置對時間關係可以看出風洞風速的影響在一開始(大約前 10 秒鐘)並不明顯，因為在文獻討論中，一開始沙粒間的碰撞需要考慮地面植被與沙粒間磨擦係數的關係，也就是俗稱風沙流的『啟動速度』，通常地面植被與沙粒間摩擦係數不變的話，『啟動速度』也相去不遠。所以可以看出風洞風速對沙丘的影響，是風速與沙丘移動速度有正指數關係，但由於保麗龍與地面的係數不變，所以『啟動速度』大致上相同。

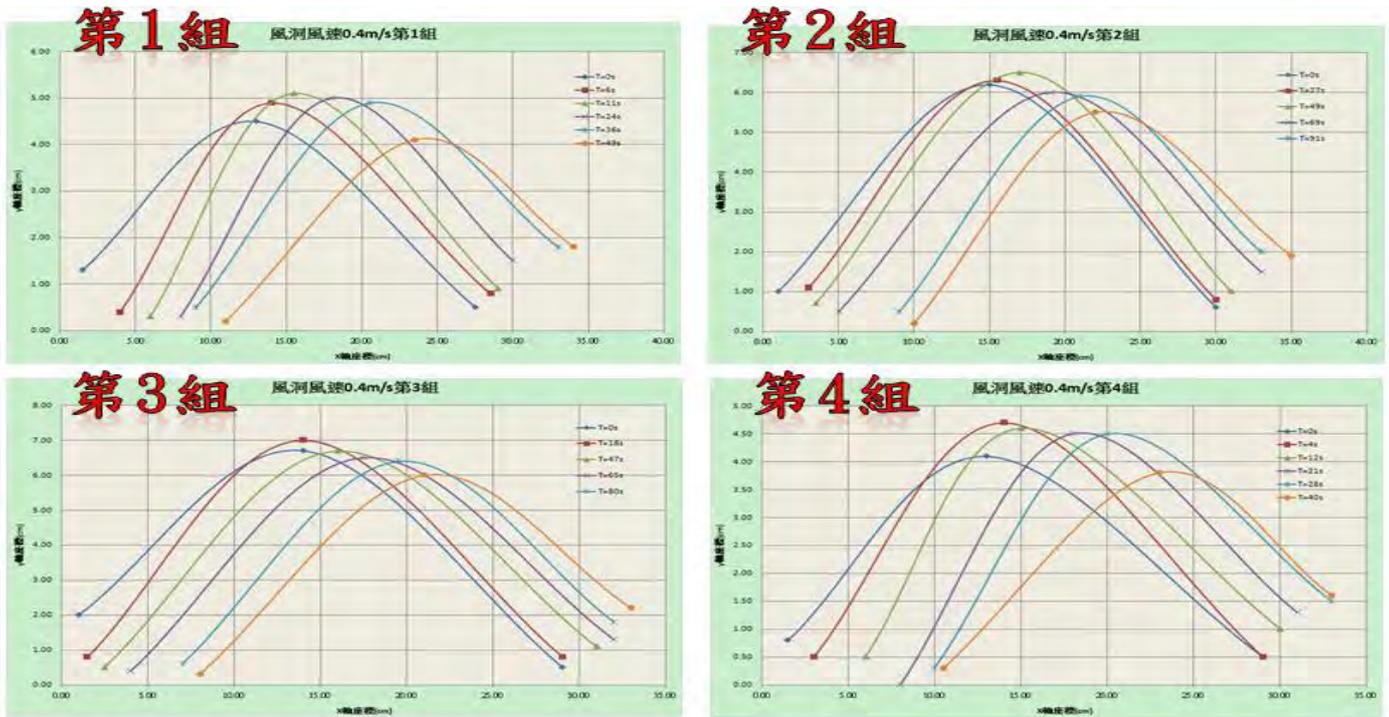


圖(七) 風洞風速對同高度沙丘移動位置對時間關係圖。

三、實驗三:單一沙丘的形狀與移動速度的關係

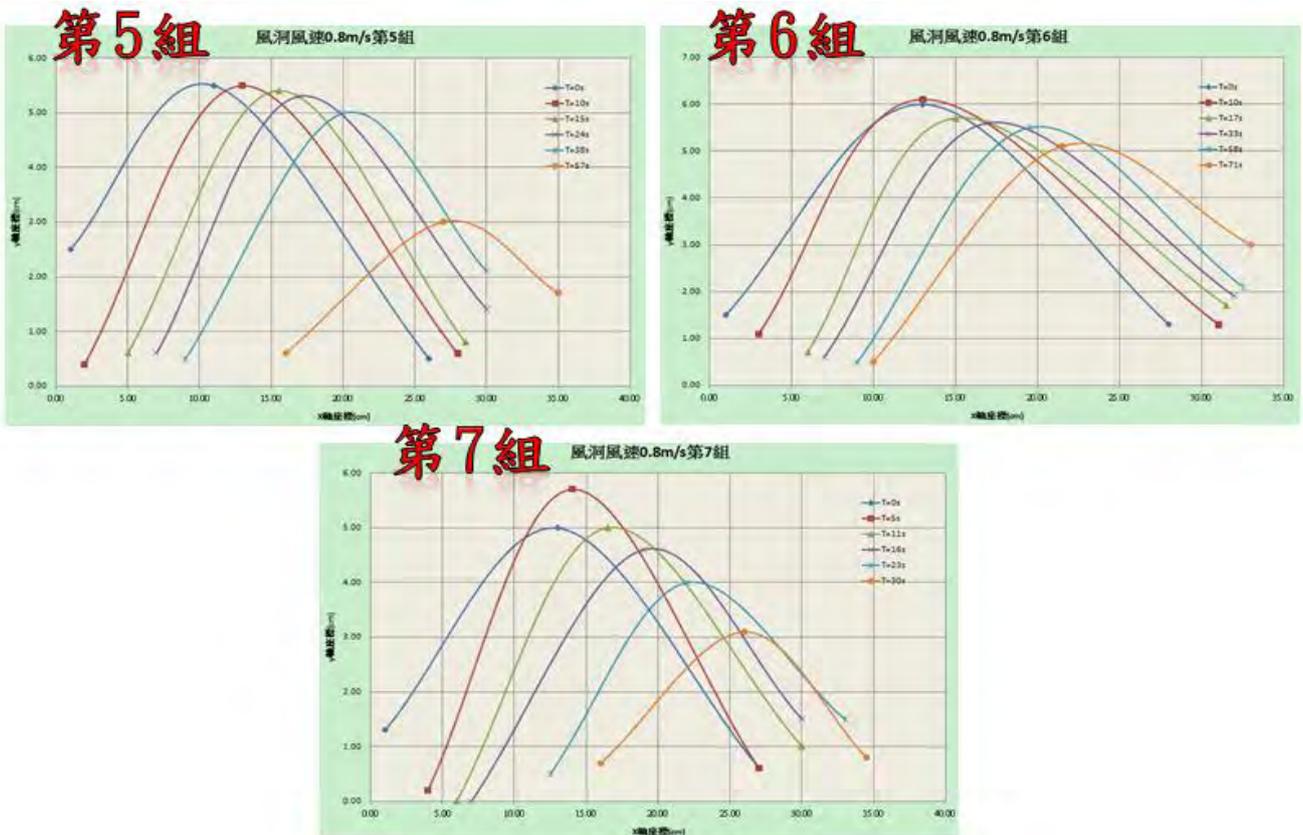
(一)實驗曲線圖：

1.風洞風速 $v=0.4\text{m/s}$



圖(八) 風速 $v=0.4\text{m/s}$ 單一沙丘移動位置對時間構成圖。

2.風洞風速 $v=0.8\text{m/s}$



圖(九) 風速 $v=0.8\text{m/s}$ 單一沙丘移動位置對時間構成圖。

(二)實驗三討論

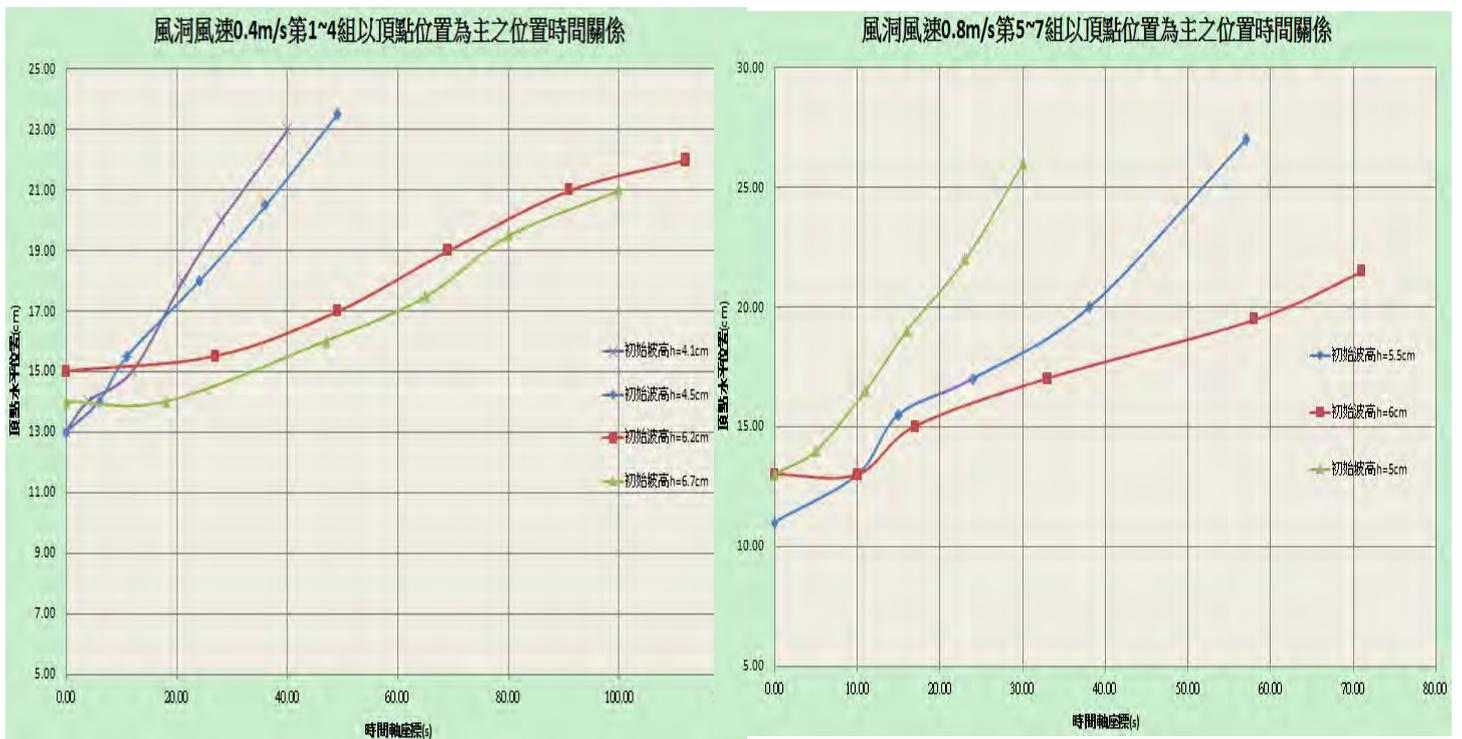
我們分別以風洞風速 $v=0.4\text{m/s}$ (第1~4組數據)、 0.8m/s (第5~7組數據)作為環境因素，量測出不同時間大量保麗龍粒隨風移動的情形，組成沙丘形成時間對軌跡構成圖，由圖(十九)(二十)可知，除了一開始由於風蝕現象比較強烈，導致迎風坡部分比較陡峭，後來的曲線就慢慢地穩定前進，且大致形狀並不會變化太大。由於沙丘移動是大量沙粒的總和運動，因此我們將以頂端位置移動，視作沙丘移動速度的計算標準，得到下列圖表：

第1組 $h=4.5$		第2組 $h=6.2$		第3組 $h=6.7$		第4組 $h=4.1$	
時間	頂點位	時間	頂點位	時間	頂點位	時間	頂點位
0.00	13.00	0.00	15.00	0.00	14.00	0.00	13.00
6.00	14.00	27.00	15.50	18.00	14.00	4.00	14.00
11.00	15.50	49.00	17.00	47.00	16.00	12.00	15.00
24.00	18.00	69.00	19.00	65.00	17.50	21.00	18.00
36.00	20.50	91.00	21.00	80.00	19.50	28.00	20.00
49.00	23.50	112.00	22.00	100.00	21.00	40.00	23.00
第1組 $v=0.214\text{cm/s}$		第2組 $v=0.063\text{cm/s}$		第3組 $v=0.070\text{cm/s}$		第4組 $v=0.250\text{cm/s}$	

第5組 $h=5.5$		第6組 $h=6.0$		第7組 $h=5.0$	
時間	頂點位	時間	頂點位	時間	頂點位
0.00	11.00	0.00	13.00	0.00	13.00
10.00	13.00	10.00	13.00	5.00	14.00
15.00	15.50	17.00	15.00	11.00	16.50
24.00	17.00	33.00	17.00	16.00	19.00
38.00	20.00	58.00	19.50	23.00	22.00
57.00	27.00	71.00	21.50	30.00	26.00
第5組 $v=0.281\text{cm/s}$		第6組 $v=0.120\text{cm/s}$		第7組 $v=0.433\text{cm/s}$	

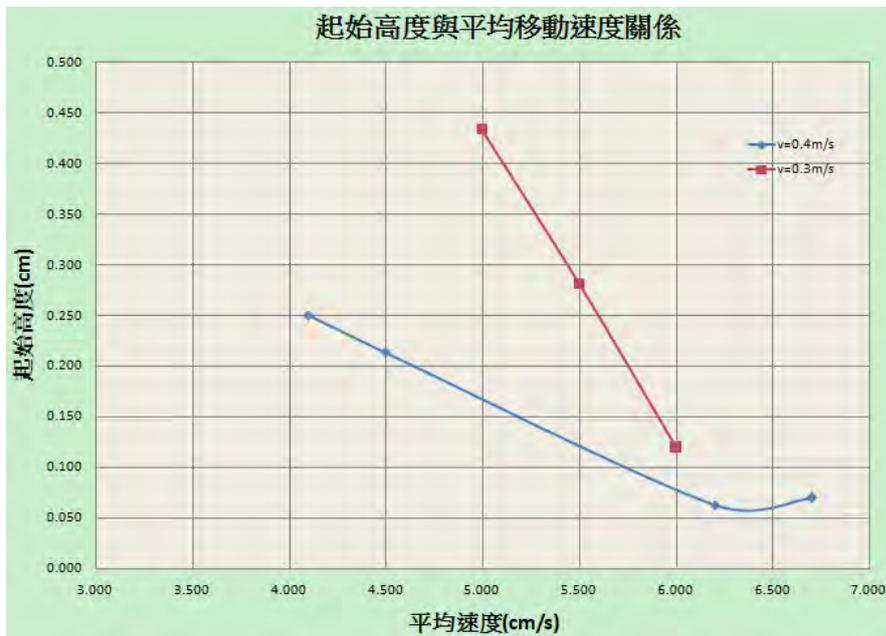
由左表得到的平均速度與利用Excel製作X-T圖(如下圖所示)的趨勢線的斜率相近，可知在不同風速下的沙丘，其起始沙丘高度愈大，則整體沙丘平均移動速度則越慢。

表(十)實驗三各組沙丘頂端位置與時間關係表



圖(十) 沙丘頂端位置對時間關係圖。

而根據現有論文已有的測量主要針對新月形沙丘。測量結果表明，新月形沙丘的移動速度通常與沙丘高度成負指數關係。例如：一個3m高的新月形沙丘每年大約沿主風向方向能移動15~60m，而一個15m高的新月形沙丘每年大約移動4~15m左右。



圖(十一) 單一起始高度沙丘與平均移動速度關係圖。

(三)實驗推論風與沙丘各項因素影響關聯

我們依據上述實驗大致推導出相關因素造成影響的關聯性，如下圖(十二)所示，風直接吹向坡面，因此大量沙子隨著坡面移動，而造成沙丘移動的現象。

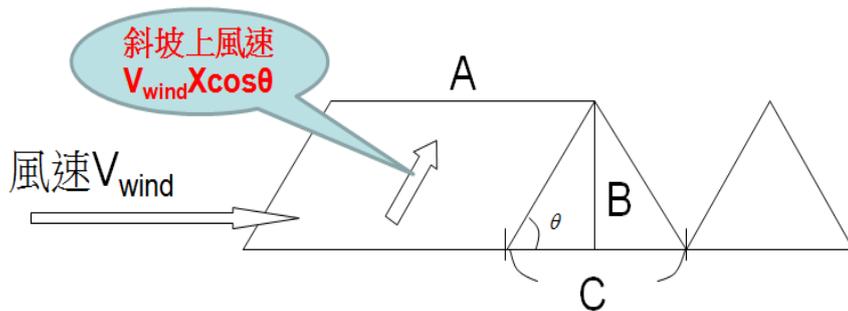
因此推導出下列公式：

$$M \propto \rho ABC$$

$$T \propto \frac{M}{Q} = \frac{\rho ABC}{VAB} = \frac{\rho C \tan \theta}{V_{wind} \tan \theta}$$

$$V_{sand} = \frac{C}{T} = \frac{C}{\frac{\rho C \tan \theta}{V_{wind} \tan \theta}} = K \frac{V_{wind}}{\rho \tan \theta}$$

其中M是整體沙丘質量，ρ是沙子的密度，ABC各代表沙丘邊長，T是移動時間間隔，θ是沙丘斜坡的角度，Q是移動的沙量，t是單位時間。



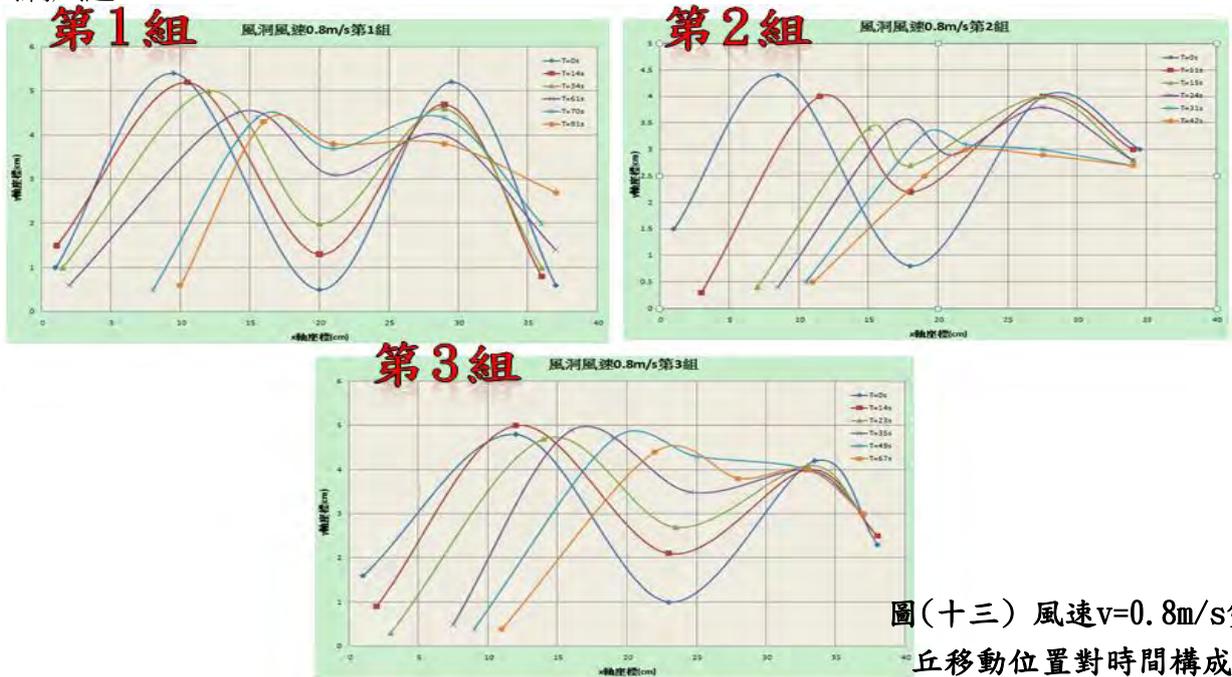
圖(十二)沙丘移動速率與風速作用示意圖。

由上式可以與實驗二、三對照，首先可驗證實驗二，相同起始高度的沙丘其移動速度與風速成正成長的關係；其次，可驗證實驗三，在相同風速下沙丘起始高度與沙丘移動速度成負成長的關係。

四、實驗四:沙丘間的互動關係

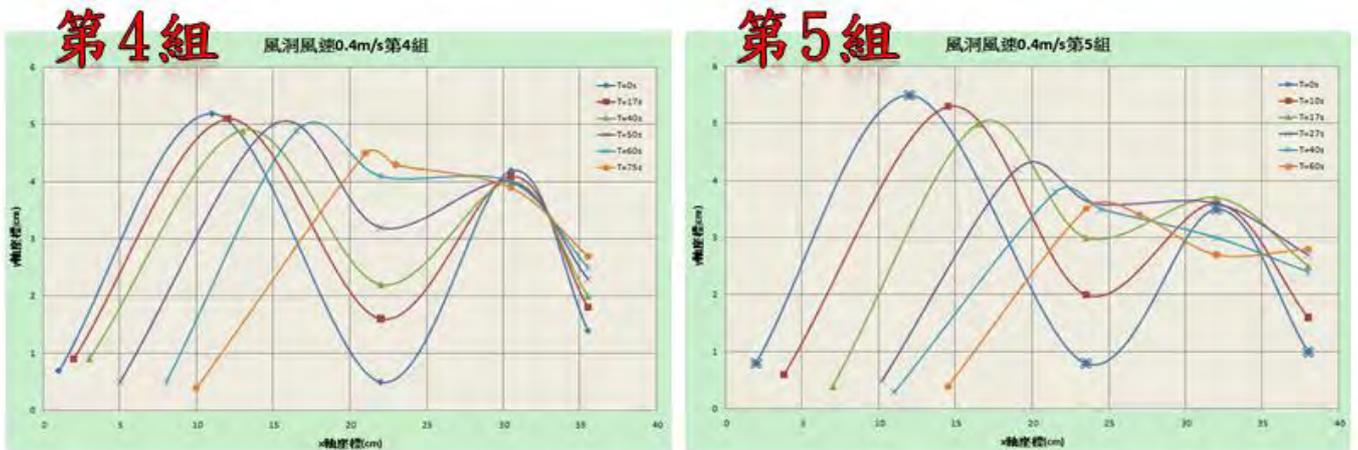
(一)實驗曲線圖：

1.風洞風速 $v=0.8\text{m/s}$



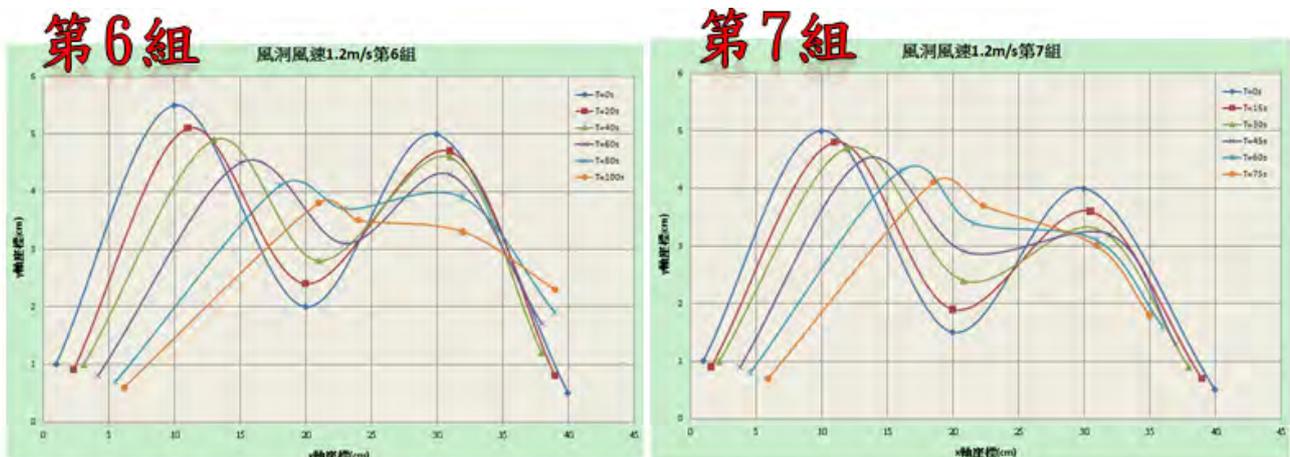
圖(十三) 風速 $v=0.8\text{m/s}$ 雙重沙丘移動位置對時間構成圖。

2.風洞風速 $v=0.4\text{m/s}$



圖(十四)風速 $v=0.4\text{m/s}$ 雙重沙丘移動位置對時間構成圖。

3.風洞風速 $v=1.2\text{m/s}$



圖(十五)風速 $v=1.2\text{m/s}$ 雙重沙丘移動位置對時間構成圖。

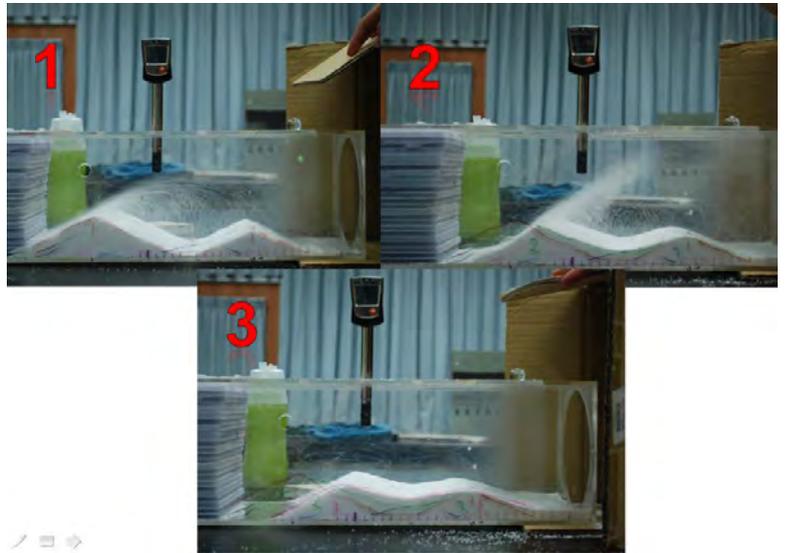
(二)實驗四討論：

由圖(十二)~(十四)所知，風的氣流由左向右通過，因此左側沙丘可視為迎風沙丘，而右側沙丘則視為背風沙丘。原本預估迎風沙丘應與先前單一沙丘表現近似，而背風沙丘的速度應較迎風沙丘為慢，但沒有想到有些頂端位置反而往左側移動，整體數值比較，幾乎可以視作被風沙丘固定不動。

由圖(十五)可以看到，從整流區吹出的風帶走左側迎風沙丘的保麗龍粒，並藉由『跳躍移動』方式，往後方行進，造成迎風沙丘移動的情形；同時間，右側背風沙丘由於迎風沙丘擋住大部分的風力，其頂端位置幾乎沒有變動，甚至因為迎風沙丘的沙粒造成頂端位置向左移動的不合理現象。

經過討論可以知道這可能是由於風洞的風向水平且範圍受限，與大自然現象的不同，亦即以後必須討論更符合大自然現象的環境條件。

但即使如此，因為迎風沙丘頂端高度大部分都大於背風沙丘的頂端高度，一但兩者高度差不多時，背風沙丘就會受風力作用，頂端高度降低，由此可知，後方沙丘由於前方沙丘擋住大部分的風力，造成後方沙丘逐漸被前方沙丘趕上。當然在地表上，風仍舊會有小部分作用在後方沙丘上造成行進，但整體來說，受風因素的確在沙丘移動上占了絕大部分的作用行為。



圖(十六) 雙丘移動實驗的操作示意圖。

柒、結論

一、實驗一: 驗證沙丘形成過程:

我們利用風洞與煙霧機來演示氣流形成沙丘時不同風速、氣壓的分布特點(如圖十七所示), 沙堆頂風速大、氣壓小, 而背風坡風速小、氣壓大, 沙堆背風坡形成渦流, 將沙粒堆於沙堆背風坡的兩側, 並形成背風坡兩尖角間的馬蹄形小凹地, 凹地繼續擴大, 雛形新月形沙丘形成。不斷堆積, 沙丘增大, 背風坡的沙粒因重力下滑, 渦流再吹向兩側, 發展兩翼, 便形成典型新月形沙丘。



圖(十七) 新月形沙丘氣流流動情形示意圖。

進一步利用小抱枕裡的細碎保麗龍模擬砂子的運動過程(如圖十八所示), 不過保麗龍的重量更輕, 形成新月形沙丘的速度也更快, 且風與粒子間互動的效果更加明顯。而根據文獻中風洞實驗與野外觀測可知, 在不同粒徑的沙漠中, 都有新月形沙丘的形成。既然保麗龍粒也具有相同現象, 考量其實驗效果更顯著, 便以保麗龍粒來進行實驗。



圖(十八)風洞內保麗龍隨氣流移動情形示意圖。

二、實驗二: 風速與相同高度單一沙丘移動速度的關係:

得到風洞對近似高度沙丘的影響, 是風速與沙丘移動速度有正指數關係, 這一點與論文中的觀測資料相同, 在風速較快的季節裡, 沙丘移動速度也會變得比較快。而在 0~10 秒的起始期間中, 由於保麗龍與地面的係數不變(為論文中地面植被因素相同之意), 所以『啟動速度』(亦即 x-t 圖的斜率)大致上相同。

三、實驗三: 單一沙丘的形狀與移動速度的關係:

利用控制風洞風速, 並調整起始高度沙丘, 獲得與觀測資料相同的結果, 也就是新月形沙丘的移動速度通常與沙丘高度成負指數關係, 並推導出其關聯性:

$$V_{sand} = \frac{C}{T} = \frac{C}{\rho C \tan \theta} = K \frac{V_{wind}}{\rho \tan \theta}$$

四、實驗四:沙丘間的互動關係：

雖然實驗結果不如預想，但後方沙丘由於前方沙丘擋住大部分的風力，造成後方沙丘逐漸被前方沙丘趕上。當然在地表上，風仍舊會有小部分作用在後方沙丘上造成行進，可整體說來，受風因素的確在沙丘移動上占了絕大部分的作用行為。

捌、未來展望

- 一、本實驗雖重現保麗龍粒形成新月丘的現象，卻因為風洞風力不足以把不同粒徑的沙粒吹起，未來希望可以觀察不同粒徑的沙粒形成沙丘的詳細情況，研究其詳實的運動關連。
- 二、本實驗雖然得到『風速與相同高度單一沙丘移動速度的關係』，但也發現『啟動速度』的存在，未來希望可以把地面植被的係數加入實驗架構中進行測試，得到不同地面摩擦係數的關聯性，進一步了解沙漠化的行進方向與遏制因素。
- 三、本實驗雖然得到沙丘的高度與移動速度的關係，並推算公式來描述相關現象。但未來希望可以把各項參數加以完善，建立更完整的推演公式。
- 四、本實驗雖然得到雙重沙丘的移動數值，但卻因為風洞的風向水平且範圍受限，與大自然現象有所差異，造成其運動現象與觀測數值不同，雖然也能大致了解其現象，但未來希望可以建立起更符合大自然現象的風洞，來更加了解複雜沙丘移動的現象並觀察其關聯性。

玖、參考資料(參考書籍、資料、網站)

- 一.普通地質學 (何春蓀 編著 國立編譯館)
- 二.鬼斧神工--雙春海濱公園的風吹沙(89年嘉義市國中地科科展作品 翁維駿、楊晴惟 陳詩宇、柳映竹 著)
- 三.返家十萬里---雁行理論分析(101年台南市高中物理科科展作品)
- 四.沙漠探秘—沙丘、綠洲、沙塵暴 (阿尼達.加奈利 文 陶杰 譯)
- 五.力學與沙塵暴(鄭曉靜 王萍 編著)
- 六.如鷹展翅上騰-重新得'力' (黃柏涵、陳佳瑜、蕭雅馨、陳頌潔)
- 七.(日)中學第一分野-簡易風洞實驗器P1~P2 (八木陸郎 著)
- 八.高中物理及大學普通物理教科書
- 九.流場可視化定性觀察及產品設計應用(游云豐 97年7月)
- 十.棒球場上的物理學(李中傑 真理大學助理教授 著)
- 十一.撒哈拉沙漠(時代-生活叢書 世界原野奇觀)
- 十二. Endo N, Taniguchi K, Katsuki A. 『Observation of the whole process of interaction between barchans by flume experiments』 【J】 , Geophys.Res.Lett. , 2004 , 31:L12503
- 十三. Elberrhiti H, Claudin P, Andreotti B. 『Field evidence for surface-wave induced instability of sand dunes』 【J】 , Nature , 2005 , 437:720-723
- 十四.維基百科

附錄

一、風洞建立情況：

(一)驗證風洞中實驗區為穩流

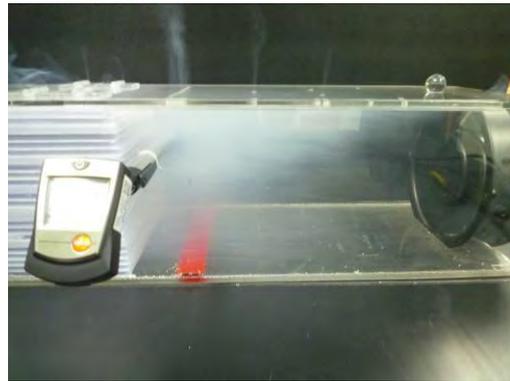
1. 風速為實驗中的控制變因，以風速器測量，並且調整可變電阻，使風速的變化不超過0.10 m/s。
2. 測量風洞內不同平均風速之實驗區中的壓差變化（用微壓差計），藉由壓差變化驗證流場是否均勻。(風洞最大風速約 4.17m/s)

(二)利用煙霧機產生的煙霧檢驗流體是否均勻

在許多論文上找到圓形的風洞，皆是利用不同大小的吸管作為整流，但中間的空隙大小不一，常為令人質疑穩流效果是否良好，我們找到煙霧的方法來看見流場。



圖(十九)利用煙機觀看風洞內流場均勻程度



圖(二十)濃度較低時風洞內流場圖

二、沙丘在地理角度的形成原因

新月形沙丘最初只是一種較小的盾形沙丘，風沙是在固定的風向作用下，遇到了草叢或灌木的阻擋而堆起的小沙堆，以後風從迎風坡面上發生吹蝕，在背風坡形成漩渦進行堆積。如圖(二十一)同時，沙堆的左右兩側形成向內迴轉的氣流，使兩翼不斷擴展，逐漸形成了新月丘的弓形形狀。如圖(2)。

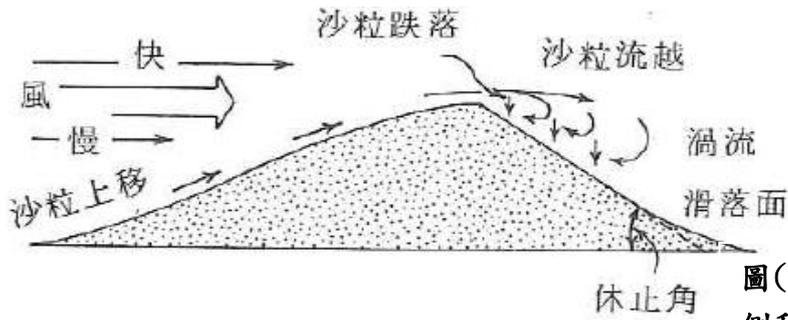


圖(二十一)沙堆經風吹蝕後形成的各個現象



圖(二十二)氣流影響新月丘的形成

風則從向風面自由疾吹而過，沙粒被風吹動沿著向風面斜坡跳躍而上。當風吹過頂端的時候，沙丘被風的一邊可以產生渦流，致使風速頓減。所以沙粒一旦到了丘頂，就被吹落到背風面上比較靜止的空氣裡面而自然堆積起來。漸漸地丘頂就形成一道稜線，其背風較陡的一面名為滑落面(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。因此沙丘的剖面是不對稱的，在向風的一邊通常長而平緩；背風的一邊則斜度較陡，就是滑落面。當坡度達到沙子的最大休止角(34°)時，沙體發生剪切運動，部分沙粒崩墜，形成小落沙坡，發育為雛形新月形沙丘。



圖(二十三) 沙丘縱剖面，表示其向風側和背風側所造成的不同地質作用。

三、沙丘型態的定義

若將沙丘橫斷面看成三角形，則可利用兩個參數來表徵其波狀型態特徵，如圖(二十四)所示。

(一)沙波紋指數 $RI = \text{底邊}L / \text{高度}h$

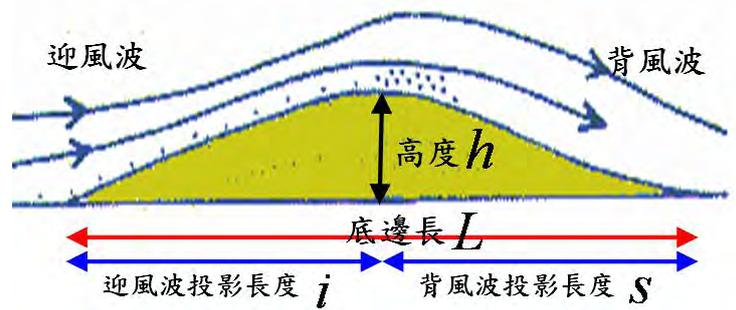
此指數用以表示沙波紋的起伏程度，沙波紋指數越大，起伏程度越小，反之則越大。

(二)沙波紋對稱指數

$RS = \text{迎風坡投影長度}i / \text{背風坡投影長度}s$

此指數用以表示沙波紋迎風坡與背風坡的對稱程度；對稱指數越接近 1 則說明迎風坡與背風坡越對稱。

(三)所以透過高度 h 、沙波紋指數 RI 及沙波紋對稱指數 RS 便可得知單一沙丘的大致形狀



圖(二十四) 沙丘縱剖面的各項參數符號。

【評語】 040114

沙丘理論為重要的物理問題，本實驗設計簡單的裝置，觀察到沙丘形成與風速的關係，並詳細測量沙丘的演變，實驗內容豐富，學生也能適當回答委員問題。若能考慮沙粒與保麗龍之差異，結果分析會更加完整，也更能獲得更多物理內含。