

# 臺灣二〇〇八年國際科學展覽會

科 別：物理與太空科學

作 品 名 稱：水滴奇遇記-蓮花效應的真面目

得 獎 獎 項：佳作

學校 / 作者：國立臺南第一高級中學  
國立臺南第一高級中學

黃常銘  
洪仲凱

## 作者簡介



作者一：黃常銘

簡介：

我就讀台南一中數理資優班，喜歡游泳、拉二胡，並擔任游泳社長。對數理頗有心得，曾多次在全國性競試中獲獎。對事物充滿好奇，常在生活中發掘問題並設法解決。這次科展讓我深刻體會做研究需要創意和敏銳的觀察力，也學到面對困難障礙的正確態度，相信這經驗對學業與待人處世均有相當助益，同時非常感謝師長與家人的指導和鼓勵。

## 作者簡介



作者二：洪仲凱

簡介：

我是洪仲凱，就讀國立台南一中高中二年級數理資優班。從小因興趣廣泛，參與許多各方面的活動以及比賽，包含體育、音樂、棋藝、科學等。除了平時習慣閱讀科普資料外，寒暑假亦會參與科學相關的營隊，如今年暑假的 TTSA 高中物理營。與常銘志趣相投，高一下時共同投入蓮花效應之研究，除了深入了解蓮花效應，更學習到科學研究的方法以及處理問題的能力。

# 水滴奇遇記—蓮花效應的真面目

## The morphological character of lotus leaves and its effect on the self-cleaning property

### Abstract

Lotus self-cleaning effect arises because the leaves have the superhydrophobic surfaces. When rain falls onto a lotus leaf, water beads up as a result of surface tension. The water drops promptly roll off the surface, taking every dirt with them. This phenomenon is called the lotus effect. With the aid of a light microscope and an Environmental Scanning Electron Microscope, we observe and describe the morphology of the leaves of *Nelumbo nucifera* in detail. We successfully observe the real interface between air, water droplets and the papillae of a lotus leaf, and find the evidence of a composite surface that is formed by epicuticular wax crystals and air. These observations improve our understanding of the two-level composite surfaces that are formed by micro-scale papillae, nano-scale epicuticular wax crystals and air. We try the method of using the critical angle of a static drop beginning to roll on inclined surface to evaluate the self-cleaning ability. We then find out that it may be a more precise criterion compared to using the static contact angle for the evaluation of the lotus effect. Literature review shows that the earlier investigation lacks the height(H) and interval(I) of the projections on the lotus leaf surface. A close relationship between the self-cleaning property and the H/I ratio is found. In this study, we present the experimental data of the height and interval of the projections on four different species of plant leaves that all have lotus effect, which may be of great help to technological applications.

Key words: lotus effect, self-cleaning, contact angle

### 中文摘要

蓮花效應是指蓮葉表面具有超疏水性與自我潔淨的能力，當雨水落在葉面，因為表面張力的作用形成水珠，水滴迅速滾離葉面，把灰塵一起帶走。本實驗以光學顯微鏡和環境式掃描式電子顯微鏡觀察蓮葉，詳細描述其表面形態，成功的發現空氣、水滴和蓮葉乳突真實的接觸界面以及表面蠟和空氣構成複合表面的證據。實驗結果可以使乳突、奈米表面臘質和空氣構成的雙層次複合表面更容易被了解。我們嘗試以水滴傾斜滾動臨界角來評估自潔能力強弱，實驗結果比傳統使用靜止接觸角更為準確。表面高度和間距的比值與蓮花效應有很大的關係，查閱文獻顯示蓮葉缺乏這些資料，本研究提出四種有自潔能力的葉子的實驗數據，這些數據應該對科技應用有很大的幫助。

關鍵字：蓮花效應，自我潔淨，接觸角

## 研究報告

### 一、前言

#### (一)、研究動機

長期以來蓮被認為是純潔清高的象徵。然而對我來說，一直到在公園中親眼看到蓮葉，才真正被這神奇的特性震懾。水滴晶瑩的在葉面上滾動並吸附塵埃一併帶走，使葉子一塵不染。基於對此現象的好奇，我開始思索是什麼機制使蓮葉能如此自我清潔。

學校老師和國科會科普知識自然科學網站講述此現象是由奈米結構造成<sup>[1]</sup>，進一步查閱資料，發現蓮葉表面有微米與奈米雙層次結構<sup>[2]</sup>，因此具有疏水與自潔 (self-cleaning) 效果，即所謂的蓮花效應 (lotus effect)。但我仍舊十分好奇微米和奈米結構的細節，也十分困惑這兩層次分別對蓮花效應有何影響。

下雨天觀察巴克禮公園的水生植物以及自家頂樓陽台的盆栽，發現水滴在芋葉、水芙蓉和羊蹄甲的葉子上快速滾動，這些植物葉子表面也很乾淨，他們自我潔淨的機制是否與蓮葉相同？而同樣是水珠在葉面滾動，雨後蓮葉總是幾乎看不到水滴附著，但芋葉和羊蹄甲葉卻存在著局部且明顯的小水滴，這些現象的原因都是值得去探討的。

#### (二)、文獻回顧

蓮花效應的概念被廣泛應用在防污防塵上，透過人工合成的方式，將特殊的化學成分加入塗料和建材，使建築物的外牆、汽車的烤漆、衛浴設備的瓷釉上具有某些程度的自潔功能<sup>[1]</sup>。

德國植物學家 Barthlott (1997) <sup>[3]</sup> 針對植物表面的疏水性與自潔能力做了一系列實驗，發現表面粗糙者如蓮葉和芋葉具有超疏水性，落在葉面上的雨水，會因表面張力的作用形成水珠，水滴與葉面接觸角接近 160°，水珠迅速滾離葉面，順便把灰塵微粒一起帶走，葉子表面總是保持乾燥。他利用掃描式電子顯微鏡觀察蓮葉，發現其表面具有微米級乳突狀的表皮細胞，上面覆蓋奈米級表面蠟質結晶 (epicuticular wax crystal) <sup>[3,4]</sup>，這些粗糙表面是疏水性與降低顆粒附著的關鍵。該研究認為在蓮葉表面，空氣被封閉在表面蠟質之間，構成一個複合表面。反觀平滑的葉子疏水性比較差，水與葉面的接觸角小，沒有自潔效果。-

一般稱接觸角  $\theta < 90^\circ$  為親水表面， $\theta > 90^\circ$  為疏水表面<sup>[5]</sup>。葉子的上表皮由表皮細胞和外面的角質層 (cuticle) 組成，水生植物如蓮葉，其上表皮也有氣孔和氣孔兩側特化的保衛細胞。植物角質層是由不溶解於有機溶劑的角質膜，和滲入膜中或覆蓋在膜上可被溶解的蠟質組成<sup>[6]</sup>。

#### (三)、研究目的

- 1、觀察蓮花效應與蓮葉表面結構的關係，研究包括微米級乳突和奈米結構，希望能發現乳突、奈米結構、水滴和空氣真實的接觸界面。
- 2、探索自潔效應：觀察蓮葉、芋葉、水芙蓉和羊蹄甲葉四種植物的表面構造，希望能找出自潔效應的基本條件和影響自潔能力強弱的關鍵變數。
- 3、尋找比接觸角更準確的標準，來評估自潔能力強弱。

### 二、研究方法和過程

#### (一)、研究設備與器材

- 1、植物表面包括：蓮葉 *Nelumbo nucifera*、芋葉 *Colocasia esculenta*、羊蹄甲葉 *Bauhinia variegata*、水芙蓉葉 *Pistia stratiotes*。
- 2、設備與器材：載玻片、雙面膠布、透明膠布、蒸餾水、滴管、小水盆、玻片盒、TERUMO



U-100 INSULIN 1CC 針筒 29G×1/2" (0.33×13 mm) (蒸餾水一滴相當於 4 μl，直徑約 2 mm)、投影片印有量角器與直線各二張、厚紙板、桌上型月曆的壓克力架、切片刀(舒適牌防滑雙層輕便刀)、一小段皮帶、印有量角器刻度的紙、置物盒、數位相機(Sony Cyber-shot DSC-T100)、顯微鏡(Nikon SE 和 Olympus BX51)、環境式掃描式電子顯微鏡 (Environmental SEM, FEI Quanta 400F)、水平校正儀、自製量傾斜面角度之裝置。

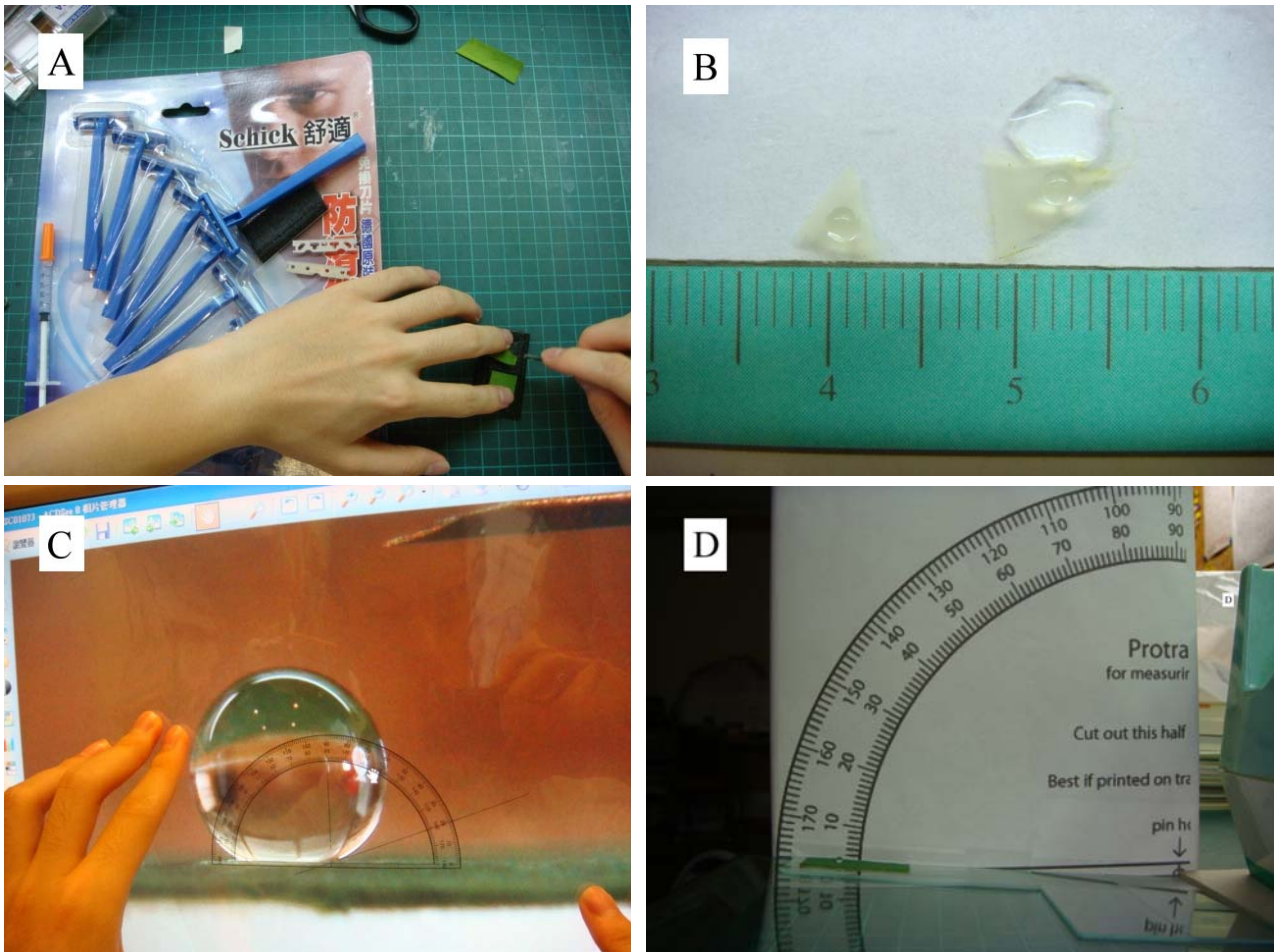


圖 1：研究方法和設備除了顯微鏡和電子顯微鏡以外，盡可能利用家裡現有的材料，(A) 葉子橫斷面製備方式和材料。(B) 載玻片上的蓮葉表皮薄膜與水滴，表皮薄膜是疏水表面，接觸角很大，右側薄膜邊緣有水痕。玻璃是親水表面，水滴會攤開來。(C)測量接觸角的方法：葉面水滴的照相圖檔於電腦放大，以印有量角器和直線的投影片各一張，直接量接觸角。(D) 水滴傾斜滾動臨界角的實驗裝置。

## (二)、研究方法和過程

### 1、組織學光學顯微鏡實驗

(A)、橫斷面製備 (圖 1A)：選取新鮮剛發育完成的蓮、芋、羊蹄甲和水芙蓉葉，將兩只切片刀刀口對齊合併，垂直切取橫斷面，再滴水讓組織攤平附著於載玻片上。

(B)、表面正面製備：蓮、芋和水芙蓉葉撕取表皮細胞以上的半透明薄膜；切取適當大小的羊蹄甲和水芙蓉葉。

(C)、觀察表皮細胞與突起構造，並且丈量和計算表面的突起高度和間距。

### 2、蓮葉表皮薄膜上水滴觀察實驗

(A)、蓮葉表皮膜透光良好，適合觀察其與水滴的界面。把表皮膜放在載玻片的正面邊緣，讓一部分貼在垂直面，以針筒抽取蒸餾水，快速前進後退噴打，微米級水滴掉落在表皮膜上會粘黏不動，傾斜 90°角時並不會滾動，甚至面朝下也不會掉落。在顯微鏡下觀察完整圓形輪廓之水滴並照相。

(B)、滴一滴蒸餾水在蓮葉表皮膜上，薄膜邊緣也滴水數滴，讓水自氣孔冒出來，顯微鏡下透過水滴，觀察水滴接觸界面的細微變化，探索水滴與奈米表面蠟的界面(圖 1B)，並間歇性連續拍照。

### 3、接觸角的量測實驗

選發育完成的新葉，避開大葉脈，切取葉片約 1 cm<sup>2</sup>，以雙面膠布平貼於玻片，室內空調設定 25°C，針筒靠近葉面垂直滴一滴蒸餾水，但不可接觸葉面，否則水滴體積會增大。待水滴靜止，以數位相機水平超近距離拍照，圖檔於電腦螢幕上放大，以印有量角器與直線的投影片各一張直接量接觸角(圖 1C)。

### 4、水滴傾斜滾動臨界角實驗

標本和條件同接觸角實驗，設計一個有量角刻度的垂直面，和可隨意改變角度的平台，貼有葉面的載玻片放在平台上，滴一滴水於葉面，待水滴靜止後，緩緩升高平台仰角，紀錄水滴開始滾動時的傾斜面角度，稱之為水滴傾斜滾動臨界角(圖 1D)。

### 5、環境式掃描式電子顯微鏡 (ESEM) 實驗

將新鮮蓮葉及經丙酮浸泡脫蠟之蓮葉鍍金，以掃描式電子顯微鏡觀察蓮葉表面的構造，包括乳突、氣孔、保衛細胞和覆蓋在角質層上的表面蠟。

### 6、實驗取得的數據，使用 excel 計算平均值和標準差。

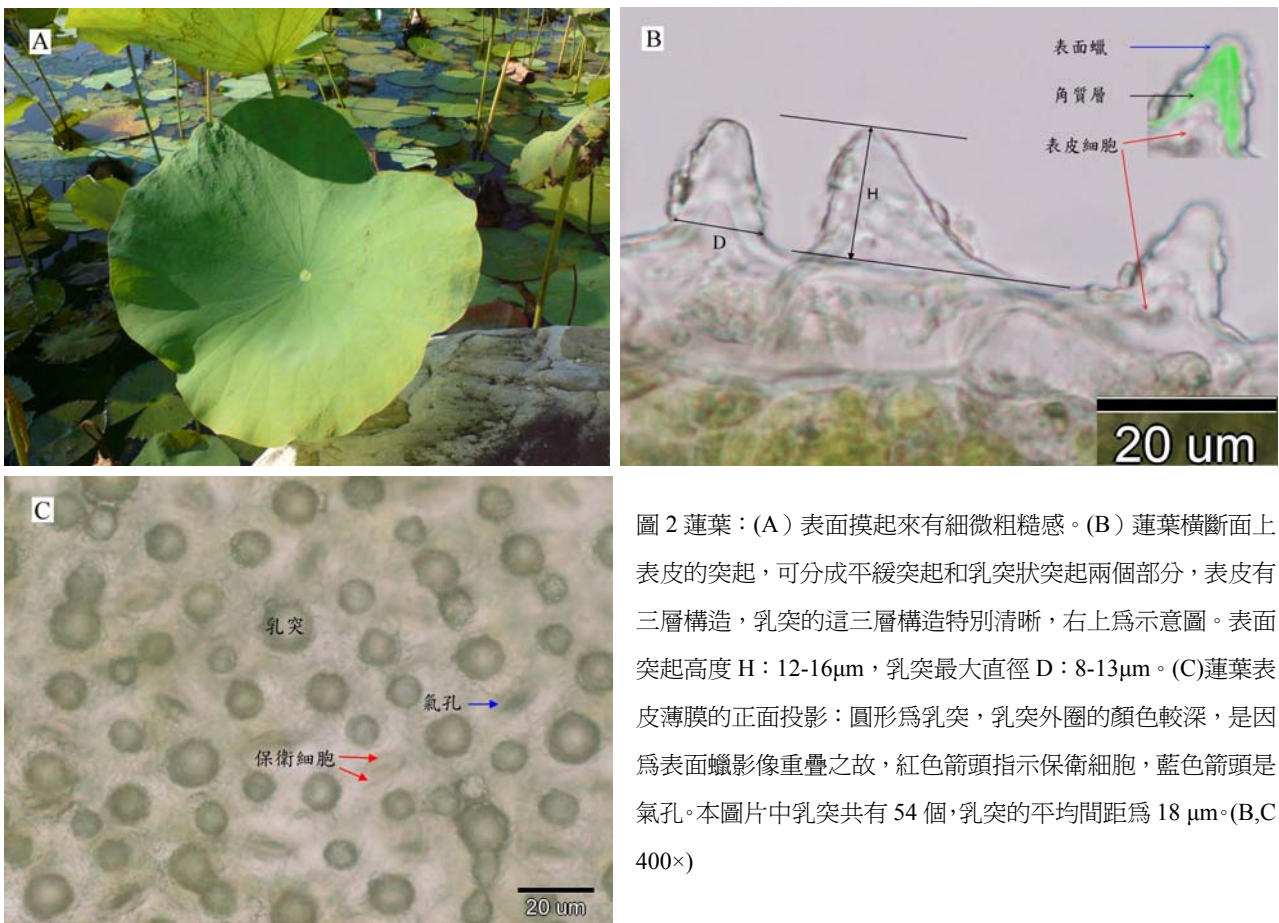


圖 2 蓮葉：(A) 表面摸起來有細微粗糙感。(B) 蓮葉橫斷面上表皮的突起，可分成平緩突起和乳突狀突起兩個部分，表皮有三層構造，乳突的這三層構造特別清晰，右上為示意圖。表面突起高度 H：12-16μm，乳突最大直徑 D：8-13μm。(C) 蓮葉表皮薄膜的正面投影：圓形為乳突，乳突外圈的颜色較深，是因為表面蠟影像重疊之故，紅色箭頭指示保衛細胞，藍色箭頭是氣孔。本圖片中乳突共有 54 個，乳突的平均間距為 18 μm。(B,C 400×)



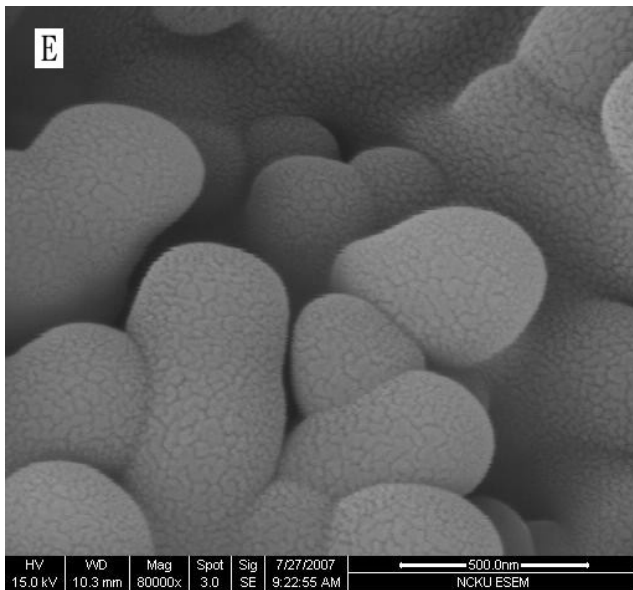
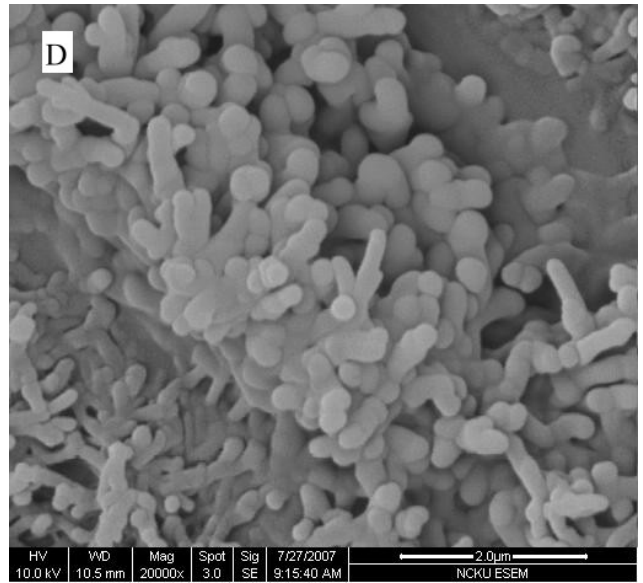
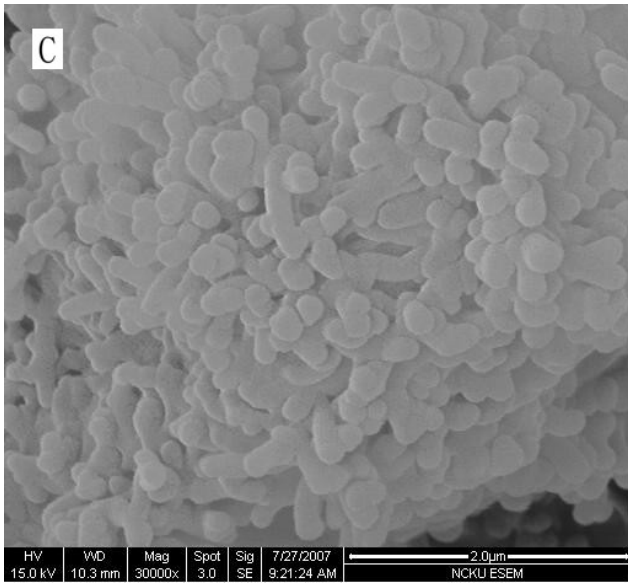
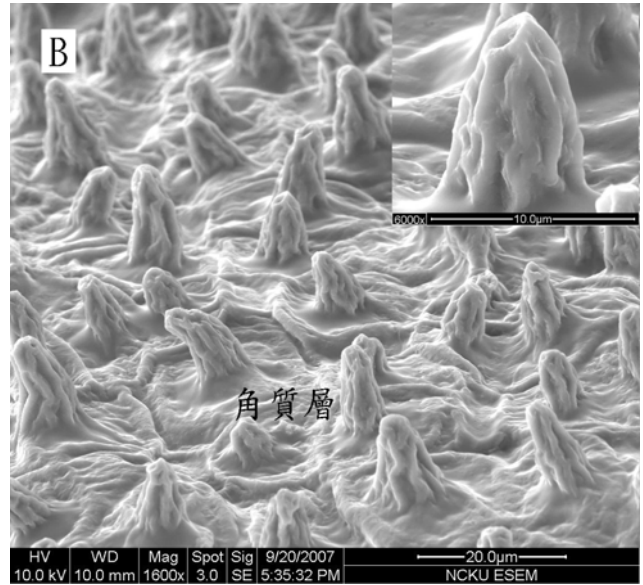
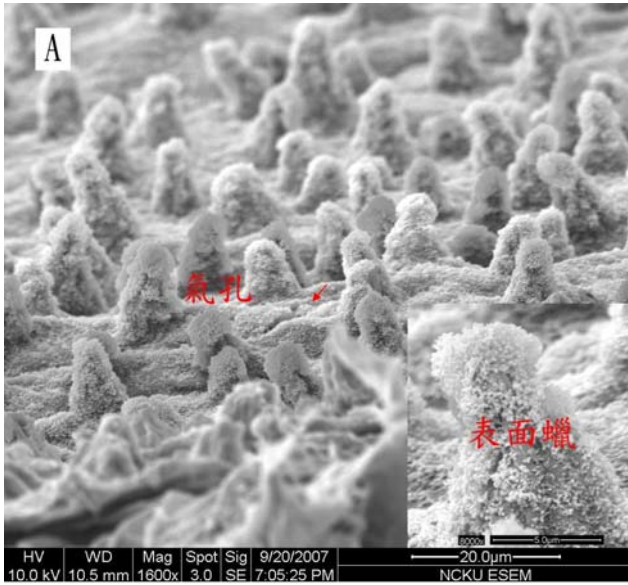


圖 3：(A)ESEM 下蓮葉表面覆蓋著奈米表面蠟，表面蠟在乳突頂部比較厚密，箭頭指示氣孔，右下角隱約看到乳突皺摺。(B)經過丙酮脫蠟的蓮葉，有皺摺的角質層覆蓋整個表面。(C)乳突頂部的表面蠟質結晶非常緻密。(D) 沿左上右下對角線是閉合的氣孔，表面蠟基底部融合在一起，蠟質結晶像分枝或出芽似的自底部從不同方向往上往外突起，少部分作水平延伸，形狀有桿狀、指狀和囊狀等，直徑 200-450 nm。(E)表面蠟質結晶如出芽似的自底部往上往外突起。



### 三、研究結果與討論

#### (一) 研究結果

在光學顯微鏡下(圖 2),蓮葉的上表皮先平緩突起,接著乳突狀突起。表皮有三層構造:表皮細胞、角質層和表面蠟,乳突的這三層構造特別清晰。表皮膜正面圖中,圓形的是乳突投影,在間距比較大的乳突之間,有保衛細胞和其間的氣孔。以環境式掃描式電子顯微鏡(ESEM)觀察蓮葉顯示(圖 3),表面蠟質結晶覆蓋在角質層之上,乳突頂部的表面蠟特別緻密。蠟質結晶像分枝或出芽似的,自底部從不同角度往上往外突起,少部分作水平延伸,形狀有桿狀、指狀和囊狀等,直徑 200-450 nm,長度 400-1700 nm。表面蠟之下有皺摺,經過丙酮浸泡後,表面蠟和角質層的蠟質消失,因此角質層皺摺更清楚,乳突的皺摺尤其明顯,恰似苦瓜表面,皺摺寬度約 850 nm。

取八個橫斷面影像完整的蓮葉表皮細胞,量取表皮細胞之間最低點至乳突最高點的高度,稱之為表面突起高度(H),範圍是 12-16  $\mu\text{m}$ ,平均值為  $14\pm 2 \mu\text{m}$ (附表一)。取七張表皮薄膜的正面投影照片,個別計算其乳突數目,求平均間距( $I$ )= $[\text{面積}\div\text{乳突數}]^{1/2}$ ,經計算得其平均值是  $16\pm 1 \mu\text{m}$ (附表二),H/I 值為 0.9。芋葉(圖 4)的求法和蓮葉相同,H/I 值是 0.4(附表三、四)。羊蹄甲葉(圖 5)則是直接量取其細胞高度和寬度,H/I 值為 0.2(如附表五、六)。水芙蓉葉的絨毛長度可達 550  $\mu\text{m}$ ,絨毛向末端彎曲,七節以上的絨毛垂直高度只有 244-385  $\mu\text{m}$ ,水滴只會接觸到長絨毛,因此估算平均間距時,只計算 40 倍影像之下未稍聚焦之長絨毛,得  $168\pm 5 \mu\text{m}$ ,H/I 概算值為 1.5-2.3(圖 6,附表七)。

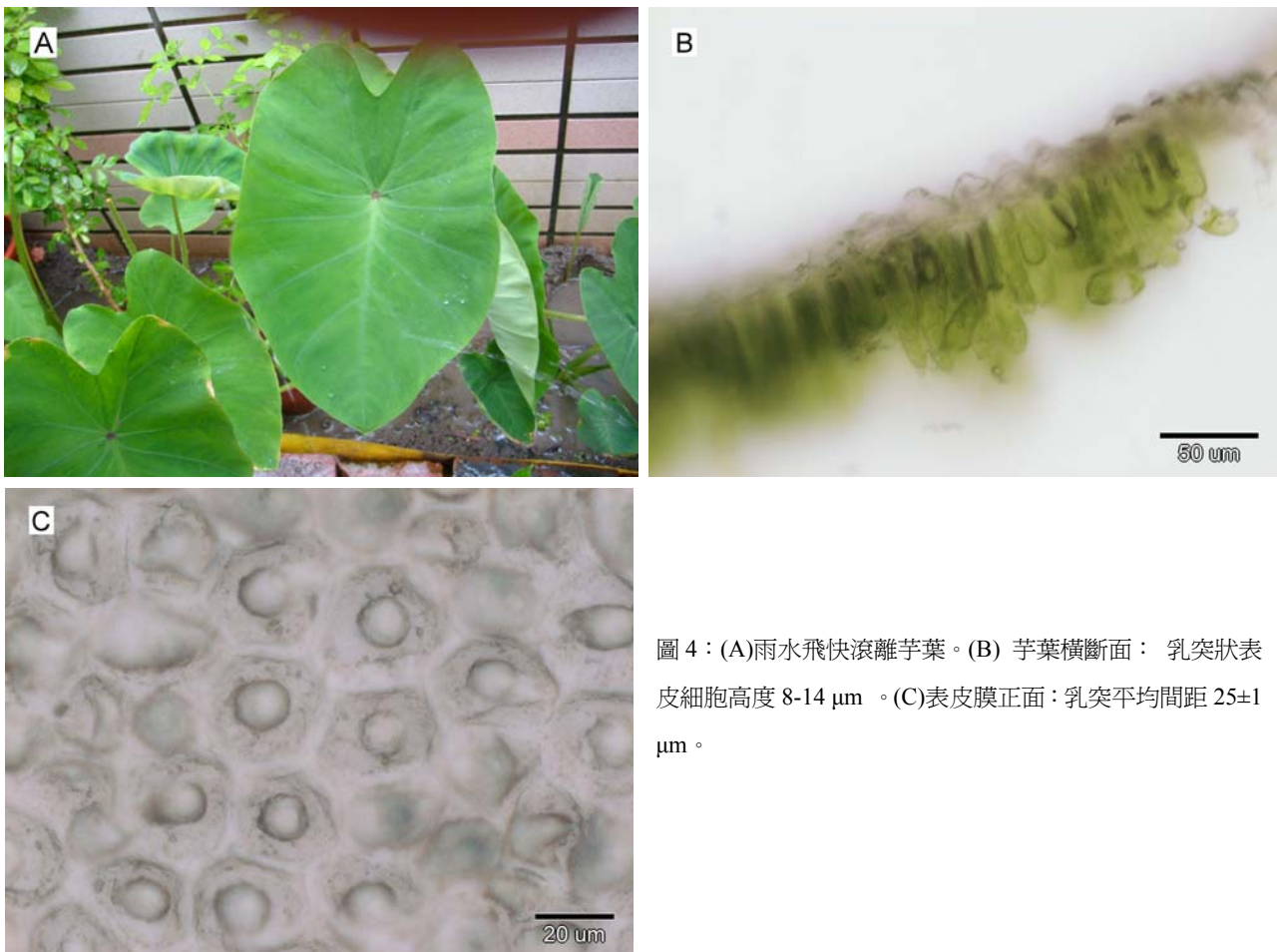


圖 4 : (A)雨水飛快滾離芋葉。(B) 芋葉橫斷面: 乳突狀表皮細胞高度 8-14  $\mu\text{m}$ 。(C)表皮膜正面: 乳突平均間距  $25\pm 1 \mu\text{m}$ 。

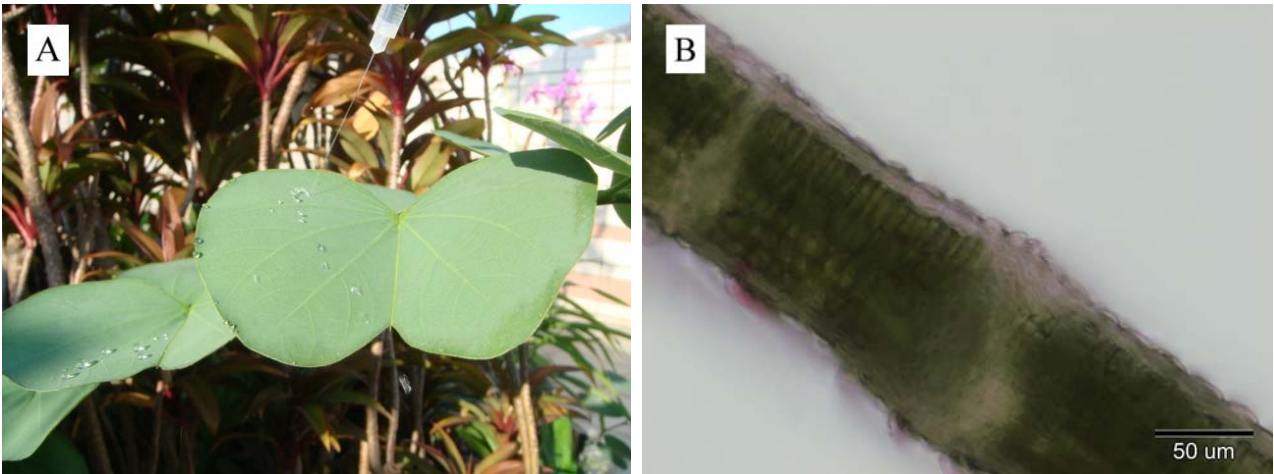


圖 5：羊蹄甲(A)嫩葉的葉脈比老葉不明顯，4  $\mu\text{l}$  之水滴輕易迅速滾動。(B)表皮細胞以 25-30°角突起 2.6-4.4  $\mu\text{m}$ 。

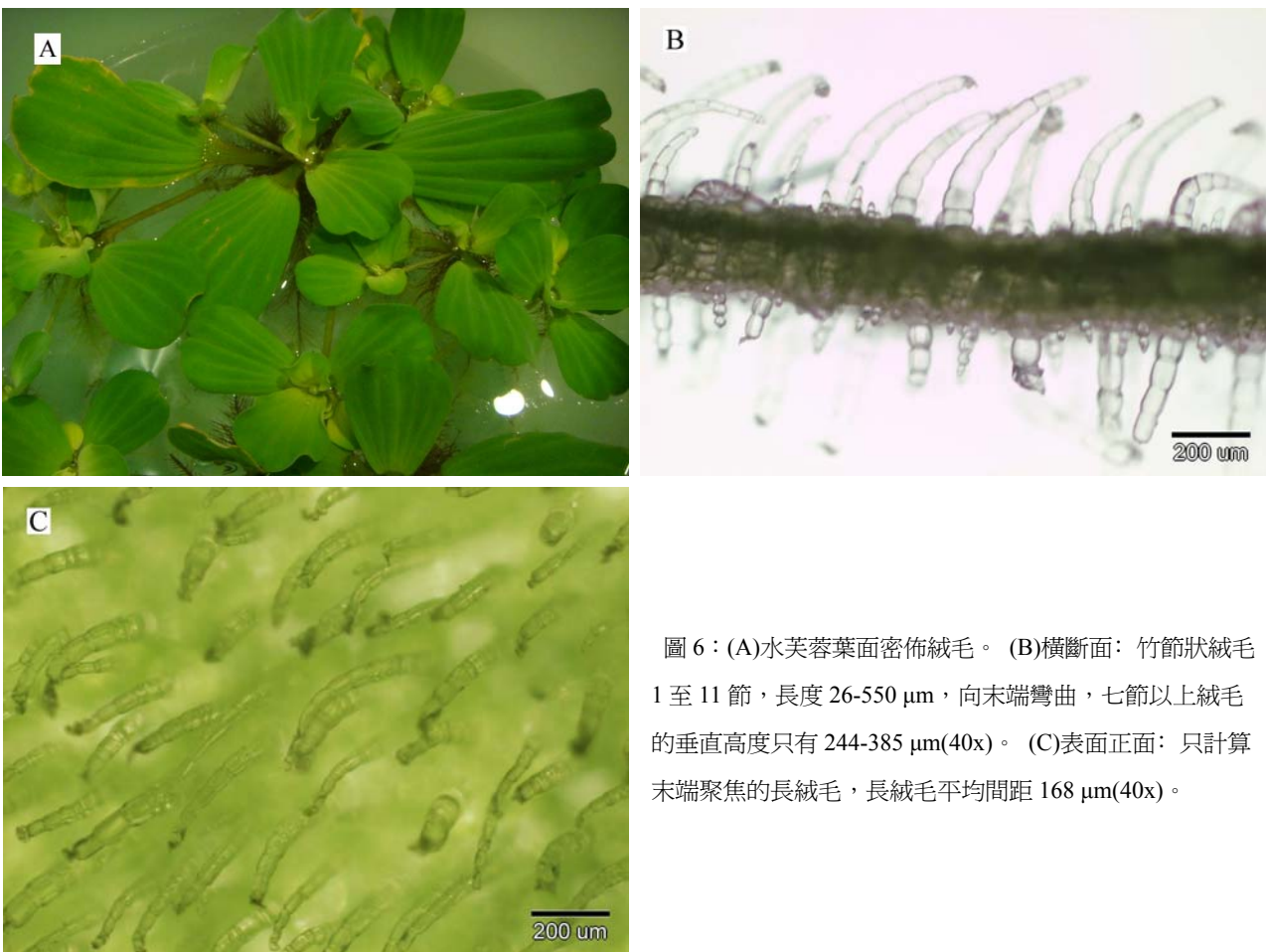


圖 6：(A)水芙蓉葉面密佈絨毛。(B)橫斷面：竹節狀絨毛 1 至 11 節，長度 26-550  $\mu\text{m}$ ，向末端彎曲，七節以上絨毛的垂直高度只有 244-385  $\mu\text{m}$ (40x)。(C)表面正面：只計算末端聚焦的長絨毛，長絨毛平均間距 168  $\mu\text{m}$ (40x)。

四種植物表面之水滴靜止接觸角的數據如下：蓮葉  $163^{\circ}\pm 5^{\circ}$ ，芋葉  $157^{\circ}\pm 4^{\circ}$ ，羊蹄甲葉  $147^{\circ}\pm 2^{\circ}$ ，水芙蓉葉  $161^{\circ}\pm 1^{\circ}$ （附表八-十一）。水滴傾斜滾動臨界角的數據：蓮葉  $5^{\circ}\pm 2^{\circ}$ ，芋葉  $7^{\circ}\pm 4^{\circ}$ ，羊蹄甲葉  $13^{\circ}\pm 6^{\circ}$ ，水芙蓉葉  $30^{\circ}\pm 10^{\circ}$ （附表十二）。這四種葉面的性質摘要於表一。

蓮葉表皮薄膜與微米水滴實驗中，顯微鏡下捕捉到水滴、乳突與空氣三者的真實接觸界面（圖 7）。水滴如飄浮似的只接觸到乳突上緣，位於水滴下方與乳突之間則是空氣。立於三或四個乳突之上的水滴呈現完整的球形，而當接觸寬度大於或等於二個乳突間距時，水滴下緣是由數個弧面連起來。大部分的水滴在蒸發過程中皆維持球形（圖 7C），直徑會逐漸縮小



表一、各種葉面性質比較表

特性 葉面	微米粗糙表面（表皮突起）			奈米粗糙表面 （表面蠟質結晶）	水滴靜 止接觸 角(CA)	水滴傾斜 滾動臨界 角( $\alpha_C$ )
	平均高度(H)	平均間距(I)	H/I			
蓮葉	14±2 μm (N=8)	16±1 μm (N=7)	0.9	桿狀、指狀或囊狀，以分枝或出芽似的向上突起，直徑 200-450 nm，長度 400-1700 nm，乳突頂部最緻密	163°±5° (N=27)	5°±2° (N=12)
芋葉	11±2 μm (N=14)	25±1 μm (N=5)	0.4	表面蠟質結晶 <sup>[3]</sup>	157°±4° (N=18)	7°±4° (N=12)
羊蹄 甲葉	4±1 μm (N=6)	19±2 μm (N=13) *	0.2		147°±2° (N=16)	13°±6° (N=12)
水芙蓉 蓉葉	七節以上絨毛垂直 高度為 244-385 μm	長絨毛平均間距 168±5 μm (N=5)	1.5-2.3 *		161°±1° (N=6)	30°±10° (N=12)

4 μl 蒸餾水的直徑約 2 mm(室溫 25°C)；H：表面突起高度；I：平均間距=[面積÷乳突數]<sup>1/2</sup>；N：樣本數；\*橫斷面表皮細胞寬度平均；\*只計算 40 倍顯微鏡下末稍聚焦之長絨毛，因絨毛有彎曲，概算方法與前三者不同。

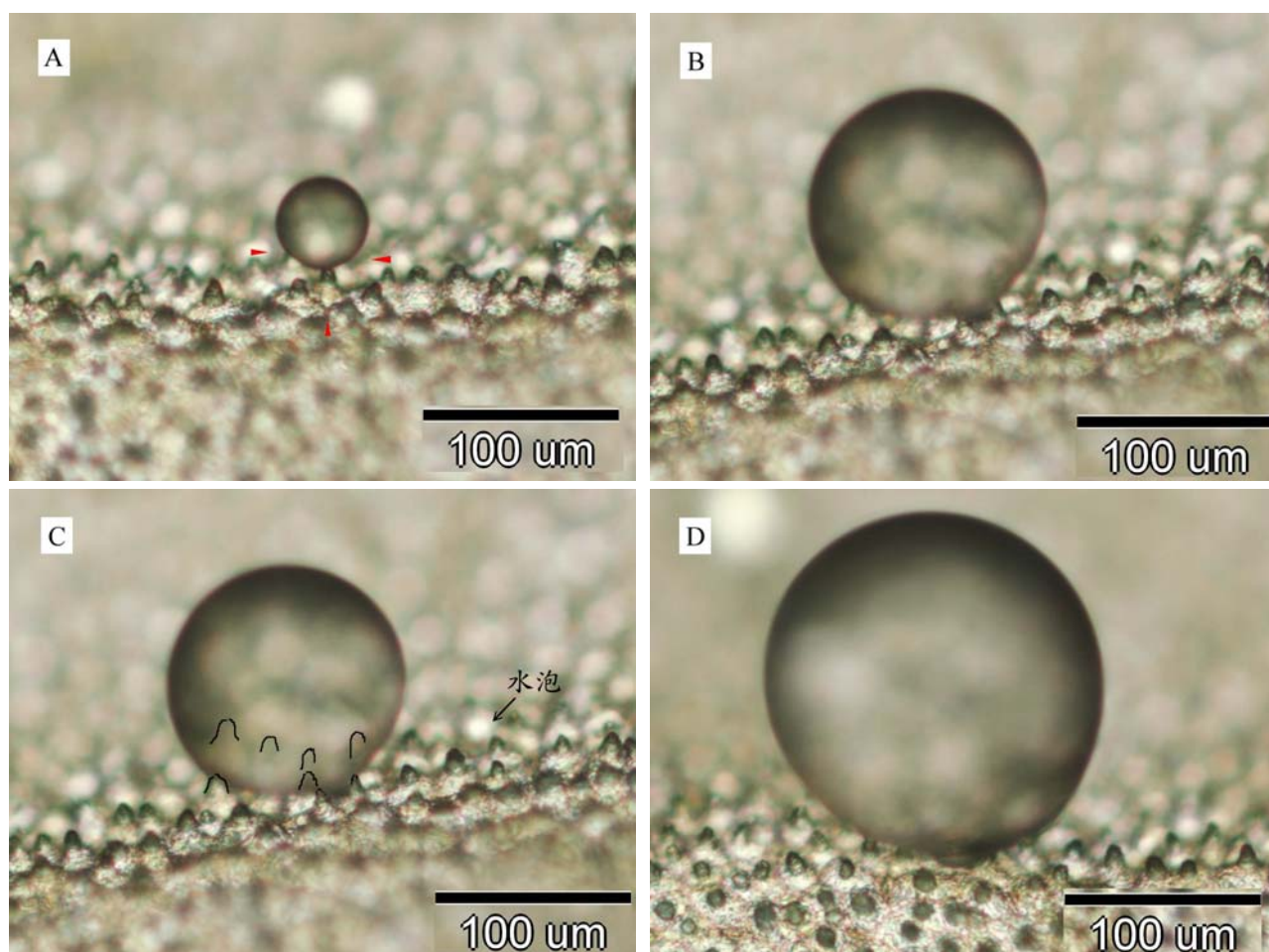


圖 7：蓮葉超疏水表面上水滴、乳突與空氣三者的真實接觸界面，(A)微米級水滴以完整球形輪廓立於三個乳突上方，其下是空氣。(B)接觸數個乳突時，水滴下緣不是球面，水滴與表面之間有空氣。(C)為圖 B 的乳突示意圖，箭頭指示直徑約 10 μm 的水泡位於乳突之間。(D)水滴與蓮葉表面之間有空氣。(100x)

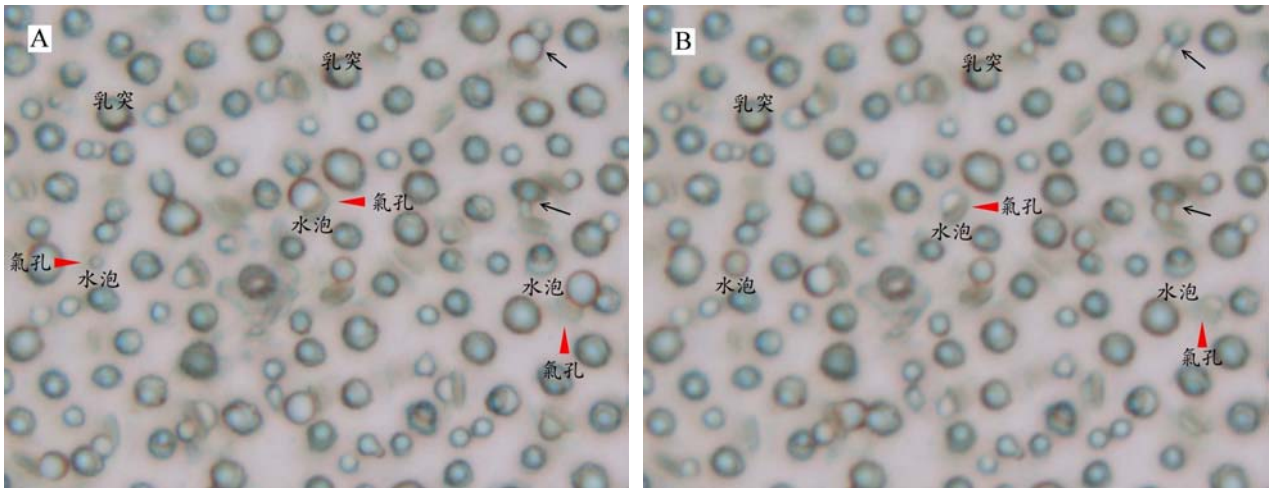


圖 8：(A,B) 透過直徑 2 mm 的水滴，觀察蓮葉表皮薄膜，紅色箭頭指出氣孔，氣孔旁邊或正上方有水泡（圖中共有 20 個），水泡變大到直徑約為乳突直徑時，會接觸到上方水滴而被吸引並瞬間變小，這個過程會重復發生。水只會潤濕直通載玻片的氣孔開口，水泡縮小時只有很少數一端黏住乳突（黑色箭頭），另一端黏住氣孔開口形成水柱，其他並無潤濕現象。

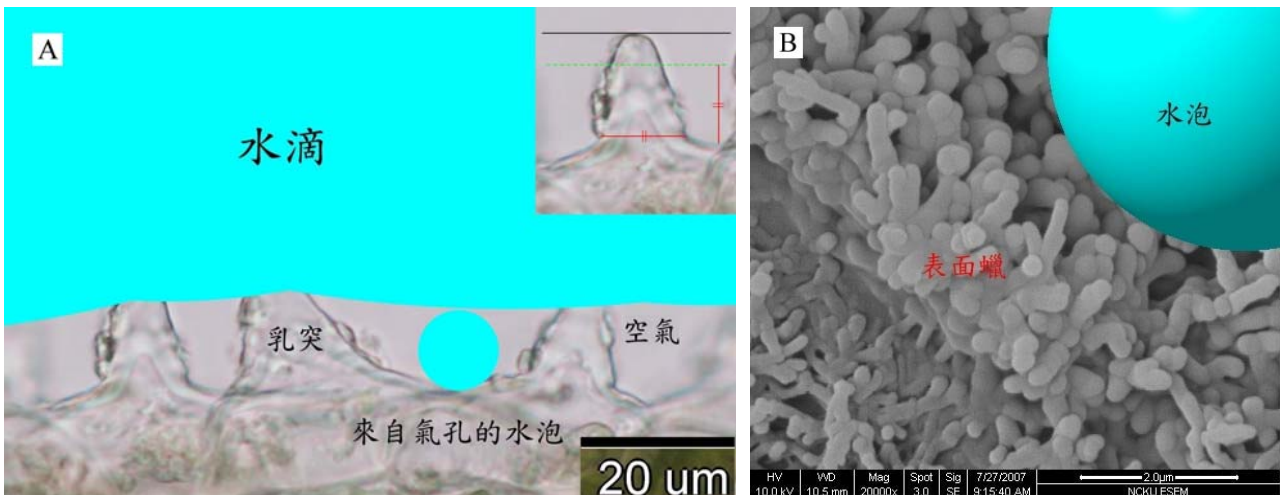


圖 9：蓮葉雙層次複合表面示意圖：(A)微米層次乳突、水滴和空氣界面，下方表示實驗中來自氣孔的水泡。當水泡碰到上方直徑 2 mm 水滴時，水泡高度 = 乳突最大直徑。水滴下緣係依照右上插圖推算位置（綠色虛線）所畫，水滴覆蓋至乳突上部約 3/10 處。(B)奈米層次氣孔旁直徑 5 μm 水泡的接觸界面，是表面蠟質結晶及其間隙的空氣，表面蠟質底下的角質層稍微有皺摺而不是完全平坦。

直到消失，只有少數在縮小過程中有局部潤濕乳突的現象。這個實驗結果顯示，奈米層次表面的蠟質結晶和空氣構成疏水複合表面。

顯微鏡下透過直徑約 2 mm 水滴，觀察自氣孔冒出來的水，發現氣孔旁邊或正上方有水泡，水泡變大到直徑約為乳突直徑時，會接觸到上方水滴而被吸引並瞬間變小，這個過程會重復發生（圖 8）。原本附著在載玻片和薄膜邊緣的水，因為壓力差，經過表皮薄膜與載玻片的間隙，再通過張開的氣孔，流到薄膜表面上後聚成水泡，沒有攤開。這表示奈米表面蠟質結晶和空氣構成了疏水複合表面，而且乳突之間充滿空氣。當水泡碰到水滴時，水泡高度 = 水泡直徑 = 乳突投影直徑 = 橫斷面乳突最大直徑 (D)。水泡底部應該接近於表面最低點，水泡高度/表面突起高度 (H) =  $D/H = 0.7$ （附表一），據此推算直徑 2 mm 水滴之最低點，應位



於乳突頂端以下 3/10 處。圖 9 是依照實驗結果所畫的蓮葉雙層次複合表面示意圖。

## (二)討論

蓮葉表面形態與自潔行為的關係重點在乳突，因為水滴如漂浮似的只接觸乳突上緣。蓮葉乳突有三層構造（圖 10）：最內層的表皮細胞提供支撐力，防止碰撞變形；中層角質層有皺摺能稍微提高表面的粗糙程度，減少蓮葉和水滴接觸面積的比例；最外層的奈米表面蠟能大幅減少蓮葉和水滴接觸面積的比例，讓水、黴菌、細菌和灰塵更不容易附著。本篇報告是首次利用光學顯微鏡與環境式掃描式電子顯微鏡詳細觀察與記錄本地蓮葉表面的形態特徵，特別是乳突的三層構造，表面蠟質結晶直徑為 200-450 nm，比文獻記載直徑為 100 nm 的蠟質結晶<sup>[2]</sup>還粗。

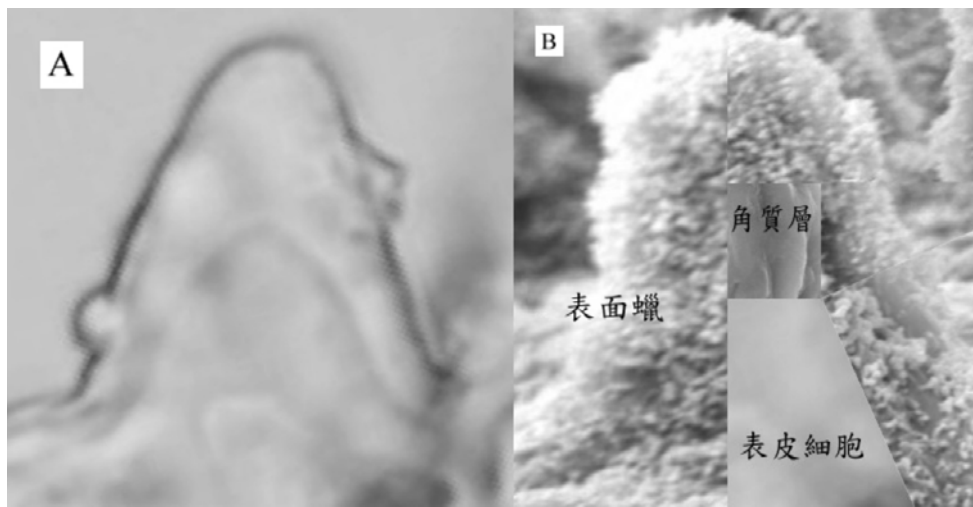


圖 10：(A)蓮葉乳突三層構造，由內到外：表皮細胞，角質層和表面蠟。(B)電腦繪製的模型圖

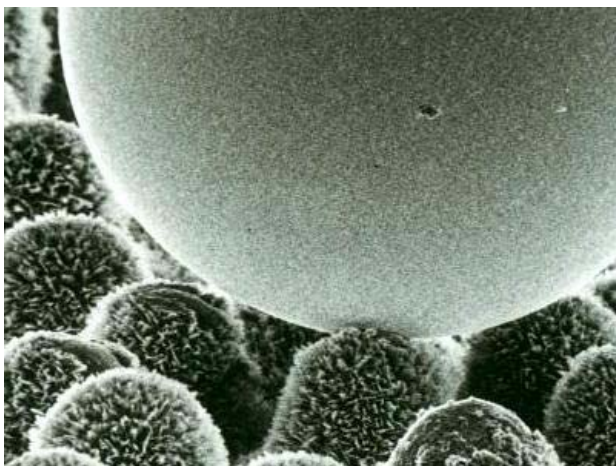


圖11：芋葉疏水粗糙表面和汞滴（Barthlott）



圖12：電腦繪製的蓮葉表面與水滴圖（取自維基百科）

關於蓮葉與水滴的接觸界面，Barthlott 是以芋葉和汞滴來說明疏水複合表面（圖 11）<sup>[3]</sup>，而維基百科中的蓮葉與水滴圖則是利用電腦繪製而成（圖 12）<sup>[7]</sup>。德國巴塞爾大學以 ESEM 觀察旱金蓮葉上的水滴<sup>[8]</sup>，也沒有看到接觸界面突起間的空氣（圖 13）。我們利用 Google 進行圖片搜尋以及查閱 lotus effect 相關論文時並沒有找到水滴、蓮葉和空氣接觸面的真實照

片，因此推測本研究所發現的水滴、空氣和蓮葉乳突接觸界面之真實照片（圖 14），就目前所能查到的資料文獻而言，應是世界之首例報告。圖 14 之中顯示，水滴如飄浮似的只接觸乳突上緣，水滴下方乳突之間則是空氣。在乳突頂部，奈米表面蠟質結晶及其間隙的空氣，構成複合表面與水滴接觸。微米級乳突、奈米級表面蠟質結晶和空氣三者構成超疏水雙層次複合表面，這是蓮葉自潔的基本構造條件，也就是蓮花效應的真面目。

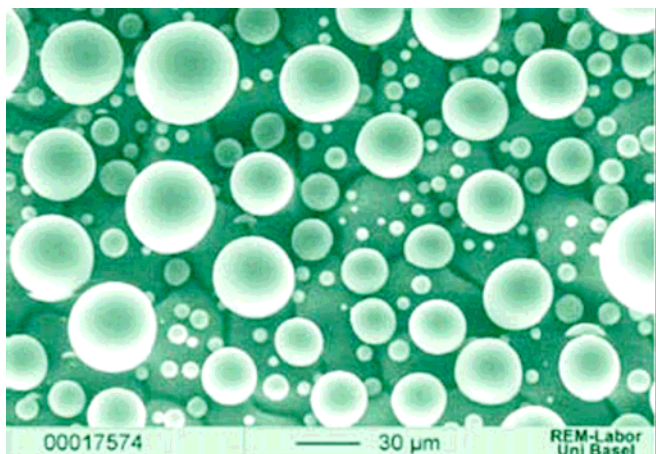


圖 13：早金蓮葉上的水滴（ESEM，德國巴塞爾大學）

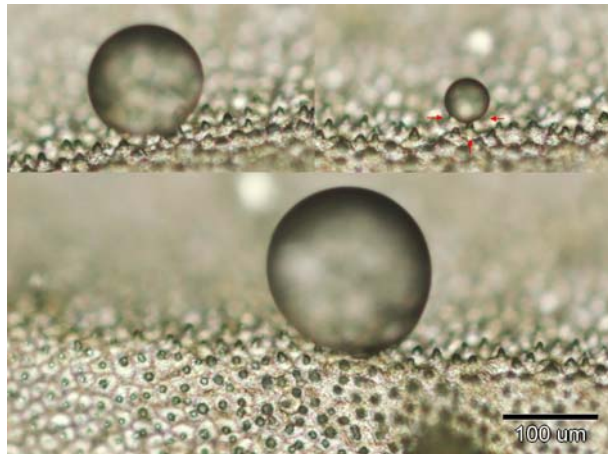


圖 14：蓮葉上的水滴、空氣和乳突接觸界面

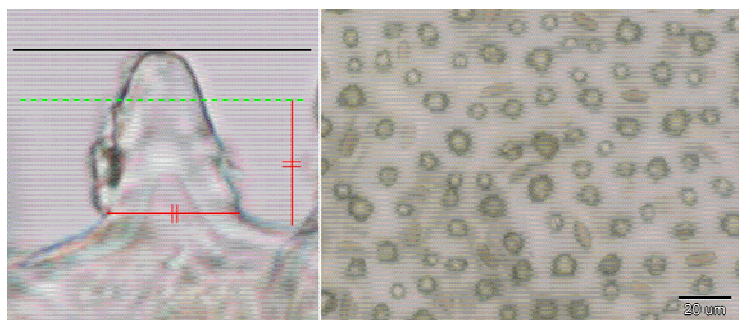


圖 15： $f_1$  在乳突層次之概算：（左圖）水滴與乳突的接觸面積只有綠色虛線以上，其面積 $\leq$ 乳突投影面積。（右圖）乳突數目有 83 個，平均直徑為  $8 \mu\text{m}$ ，圖片面積 =  $17749 \mu\text{m}^2$ 。水滴與乳突的接觸面積 + 水滴與葉面的接觸面積 = 右圖乳突投影面積總和 + 右圖片面積。  
 $f_1 \approx 16\pi \times 83 \div 17749 \approx 0.2$ 。

至於蓮葉雙層次複合粗糙表面對接觸角以及固體界面比例的影響，可以利用 Cassie 及 Baxter 提出的方程式來說明<sup>[9]</sup>，此方程式適用於同時有氣態和固態的複合表面：

$$\cos\theta' = f_1 \cos\theta + f_2 \cos\theta_{\text{air}} \quad [1]$$

其中， $\theta$  是液滴與固體平滑表面的接觸角， $\theta'$  是液滴與複合表面的接觸角， $\theta_{\text{air}}$  是水與空氣的接觸角，這個值為  $180^\circ$ ， $f_1$  是固體界面的比例， $f_2$  是空氣界面的比例。

$$\cos\theta_{\text{air}} = \cos 180^\circ = -1 \quad \text{代入 [1] 得}$$

$$\cos\theta' = f_1 \cos\theta - f_2 \quad [2]$$

$$f_1 + f_2 = 1 \quad \text{代入 [2] 得}$$

$$\cos\theta' = -1 + f_1 (\cos\theta + 1) \quad [3]$$

蓮葉的  $f_1$  值在乳突層次我們以圖 15 來概算：水滴與乳突的接觸面積只有乳突的上 3/10， $<$  乳突投影面積，所以接觸面積總和  $<$  乳突投影面積總和，乳突投影面積總和 =  $16\pi \times 83 \mu\text{m}^2$ ，水滴與葉面的接觸面積 = 右下圖片面積 =  $17749 \mu\text{m}^2$ ，所以  $f_1$  在乳突層次 = 乳突投影面積總和  $\div$  圖片面積 = 0.2。Cheng (2006)<sup>[10]</sup> 利用 Fourier 轉換紅外線光譜儀研究顯示棕櫚蠟與蓮葉表面蠟的參考光譜相似，棕櫚蠟平滑表面的接觸角  $74^\circ$ ，本實驗實際測量的水滴接觸角為  $155^\circ$



至  $170^\circ$ ， $\cos\theta' = -1 + f_1 (\cos 74^\circ + 1)$ ，因此雙層次的  $f_1$  值範圍大約介於 7% 至 1%。

自潔能力的理論基礎<sup>[9]</sup>，是水滴於葉面上滾動而非滑動（圖 16）。污染微粒沉積在蓮葉表面時，微粒與蓮葉界面有空氣存在於乳突間隙和表面蠟質結晶的間隙。當水滴滾過時，水滴與微粒完全接觸的吸附力，大於蓮葉與微粒極小部分接觸的吸附力，於是水滴滾離葉面的過程中會吸附帶走微粒。因此表面上的水滴容易滾動和滾動速度比較快的，其自潔能力比較好。Cheng（2005）<sup>[11]</sup>的研究發現水蒸氣凝結在蓮葉表面有可能讓蓮葉失去自潔能力。本實驗中蓮葉上的水滴直徑在 1 mm 以下就很難滾動，即使呈現球形輪廓仍有很大的接觸角（圖 17）。微米級水滴即使傾斜  $90^\circ$  角也不會滾動，甚至表面朝下也不會掉落，這代表讓微米級水滴附著在蓮葉表面的力，大於讓水滴移動的重力。因此蓮葉上需要足夠大的水滴才能發揮自潔效應，而文獻<sup>[3,9]</sup>的示意圖有暗示微米水滴會滾動之嫌。

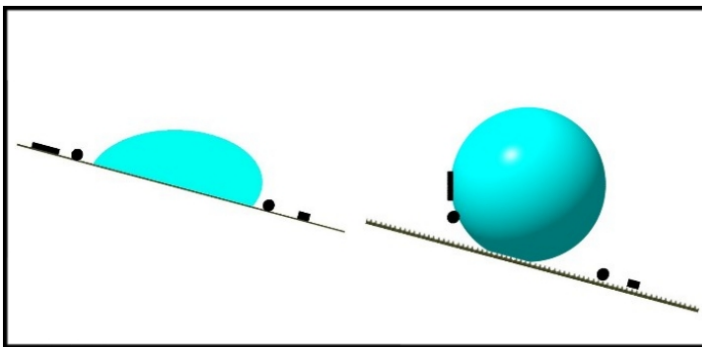


圖 16：左圖表示水滴滑過表面後，微粒只是重新分佈。右圖為有自潔能力的表面上，微粒與蓮葉接觸界面有空氣存在於突起的間隙，微粒會附著於滾過表面的水滴，水滴滾離表面時一併帶走微粒。

蓮葉乳突層次和奈米層次是否各別有自潔性質呢？根據 Cheng（2006）的研究<sup>[10]</sup>，破壞奈米表面蠟而只保留乳突的乾燥蓮葉，其水滴接觸角為  $126^\circ$ ，水滴粘黏蓮葉而不會滾動，乳突的作用相當於使棕櫚蠟的平滑表面的水滴接觸角自  $74^\circ$  提昇到  $126^\circ$ 。這個結果顯示微米乳突層次可以留住空氣並構成複合表面，但是不能自潔。本實驗發現水自氣孔冒出來後聚成水泡，水滴在蒸發過程中皆維持球形直到消失，這證明奈米層次的表面蠟質結晶和空氣構成複合表面，使水滴有很大接觸角，至於是否具有自潔性質，仍需進一步探討。

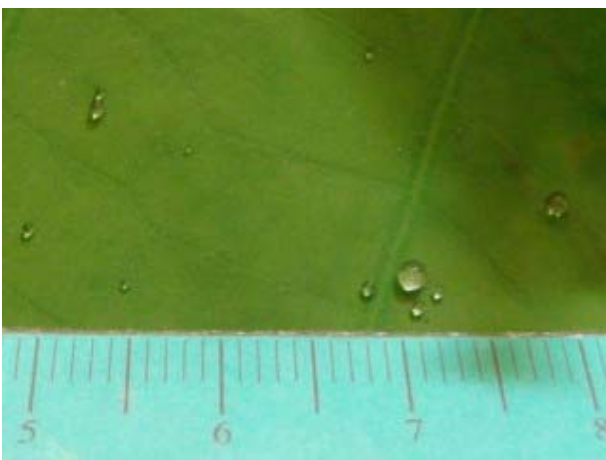


圖 17：小水滴附著於  $45^\circ$  至  $60^\circ$  傾斜的蓮葉

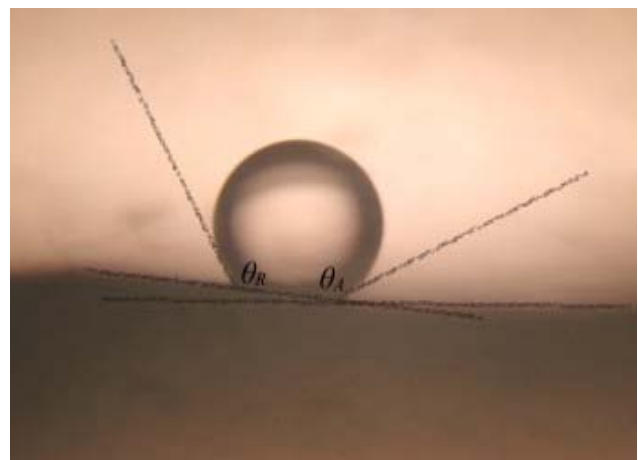


圖 18：水滴在傾斜表面：後退接觸角  $\theta_R <$  前進接觸角  $\theta_A$

水滴的接觸角在水平表面時是常數，在傾斜表面（圖 19），後退接觸角  $\theta_R <$  靜止接觸角  $\theta_s$

<前進接觸角  $\theta_A$ 。前進接觸角和後退接觸角的差，稱為接觸角遲滯效應(contact angle hysteresis)： $\Delta\theta = \theta_A - \theta_R$ 。遲滯效應是用來測量液滴粘黏表面的能力，因此有自潔能力的表面必須遲滯效應很低<sup>[9]</sup>。本實驗測得四種植物葉面的  $\alpha_C$ ：蓮葉  $5^\circ \pm 2^\circ$ ，芋葉  $7^\circ \pm 4^\circ$ ，羊蹄甲葉  $13^\circ \pm 6^\circ$ ，水芙蓉葉  $30^\circ \pm 10^\circ$ 。水芙蓉葉雖然接觸角高達  $161^\circ$ ，大於芋葉和羊蹄甲葉，但是因為絨毛又長又彎曲，水滴於葉面不容易滾動。Miwa(2000)的研究<sup>[12]</sup>發現具有比較高靜止接觸角的表面不一定擁有比較低的滑動角 (sliding angle)。我們稱呼靜止的水滴開始滾動的傾斜面角度為水滴傾斜滾動臨界角( $\alpha_C$ )，這個名稱比滑動角更貼切。對於超疏水表面而言，以水滴傾斜滾動臨界角，來評估自潔能力強弱，比傳統用接觸角更準確。

探討四種葉面有不同程度自潔能力的原因，可以參考 Johnson and Dettre (1964)<sup>[9]</sup>研究橫切面是正弦曲線的理想粗糙表面的結果，表面之高度/間距比值大於 0.6 者可以構成複合表面，其高度/間距比值越大，則固體界面比例越低。但比值低到 0.2 時就不具複合表面的特性。大部份有自潔能力的葉子具有雙層次粗糙結構，只需比較低的突起斜度就能形成複合表面<sup>[9]</sup>。蓮葉和芋葉確定有奈米表面蠟<sup>[3]</sup>，羊蹄甲葉有自潔能力和很低的 H/I 比值(0.2)，應該是具有奈米表面蠟的雙層次粗糙表面。這三種葉面橫切面突起型態類似正弦曲線 (圖 19)，造成自潔能力不同的原因，除了表面蠟成份的疏水性質不同之外，H/I 比值的差異也是重要因素。水芙蓉葉 H/I 比值很高可以減少固體界面的比例( $f_1$ )，但是絨毛彎曲卻又使  $f_1$  大幅增加，此兩種因素的互相抵消遂降低其自潔能力。

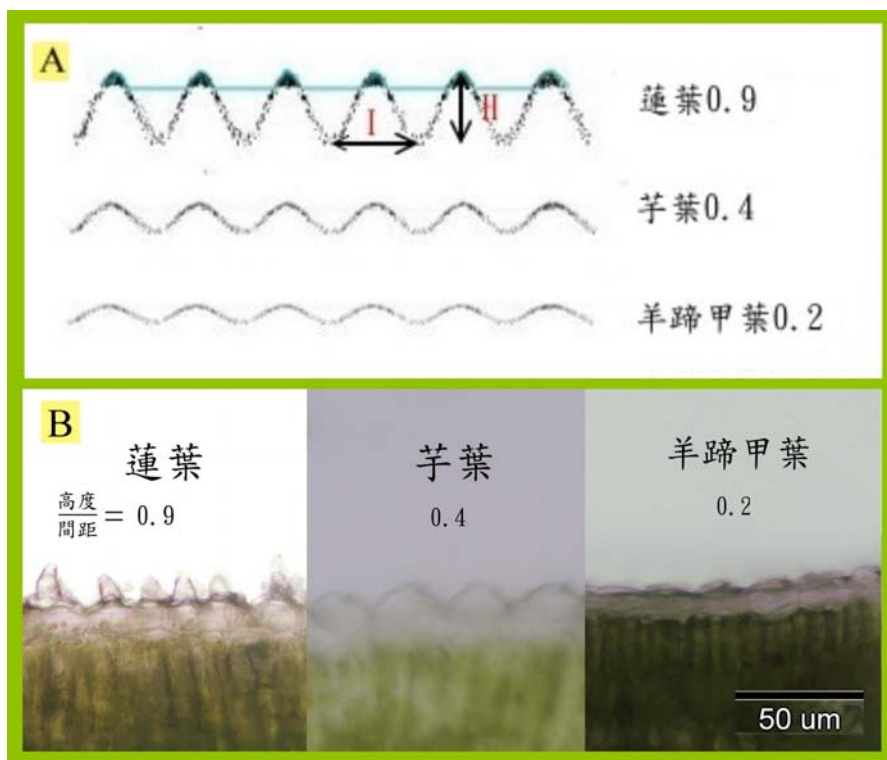


圖 19：(A) 以正弦曲線示意蓮葉、芋葉和羊蹄甲葉之雙層次複合表面之橫斷面 H/I 比值，H 是突起高度，I 是間距。(B) 雨滴碰到蓮葉時產生彈性變形，蓮葉表面突起高度和高度/間距比值比較高，提供比較長的距離，來緩衝雨滴對表面構造的撞擊，減少奈米表面蠟質結晶的耗損。(200x)

在豪大雨後，蓮葉表面不留水滴，其他葉面則常有水滴附著。除了乳突上端奈米表面蠟質結晶特別厚密，經得起大雨撞擊之外，更可能的關鍵因素是由於動能和表面張力的作用，雨滴碰到蓮葉時產生彈性變形，蓮葉的表面突起高度和 H/I 比值比較高，提供比較長的距離來緩衝雨滴對表面構造的撞擊，因而減少奈米表面蠟結晶的耗損。因此蓮葉不只比芋葉和羊蹄甲葉有比較強的自潔能力，其自潔能力也比較耐久。



關於蓮葉表面微米構造，文獻只提到約5~15  $\mu\text{m}$ 突起的表皮細胞<sup>[2]</sup>，乳突高度為5~10  $\mu\text{m}$ <sup>[13]</sup>。我們根據葉子橫切面與正面圖片量測的數據求得蓮葉、芋葉、羊蹄甲葉和水芙蓉葉四種有自潔效應的表面的高度(H)、間距(I)和H/I值。因為實驗有別於物理學者研究表面常用的方法，而且我們查閱文獻和網路搜尋還沒有找到相關資料，因此這些實驗數據應該很有價值。未來製造疏水防塵表面只要使用疏水材質，模仿微米與奈米雙層次粗糙突起，再依照實用粗糙程度需求，選擇H/I比值介於蓮葉(0.9)和羊蹄甲葉(0.2)之間，應該就會有自潔功能。這些實驗結果可以廣泛應用在瓷磚、衛浴設備、漱口杯、建築物的玻璃以及外牆的塗料和汽車烤漆等等。可以先噴塗微米顆粒再噴塗奈米層，也可以嘗試先製造微米突起基板，再定期噴灑奈米顆粒以維持自潔功能。我們也可以只做可見光波長(400 nm)以下的奈米單層，並應用於汽車玻璃上，汽車行進的震動就足以抖落與玻璃小部分接觸的水滴和灰塵了。

#### 四、結論與未來展望

- (一)、本實驗以光學顯微鏡和環境式掃描式電子顯微鏡詳細觀察紀錄蓮葉的表面形態，提出蓮葉上表皮由三層構造—表皮細胞、角質層和表面蠟所構成，和奈米蠟質結晶之直徑約 200 至 450nm，文獻報導中並未曾發現如此詳實之觀察結果。
- (二)、本研究所發現的水滴、空氣和蓮葉乳突接觸界面之真實照片，就目前所能查到的資料文獻而言，應是世界之首例報告。加上奈米表面蠟質結晶與空氣構成複合表面的證據；以及雙層次複合表面讓水滴與固體接觸面積的比例減到大約 1-7%，這就是蓮花效應的真面目。這些研究結果可以使乳突、奈米表面蠟質結晶和空氣構成的超疏水雙層次複合表面更容易被了解。
- (三)、具有雙層次粗糙表面的植物葉面擁有自潔能力，其表面突起高度和間距與自潔效應關係很大。本研究報告蓮葉、芋葉、羊蹄甲葉和水芙蓉葉之表面突起高度(H)、平均間距(I)及 H/I 的比值，查閱過的文獻沒有報告蓮葉表面高度與間距比值的相關資料。
- (四)、發現水滴太小會粘黏葉面，因為讓微米級水滴附著在蓮葉表面的力大於讓水滴移動的重力。蓮葉需要足夠大的水滴才能發揮其自潔功能，這個觀念與文獻的示意圖有所不同。
- (五)、自製測量水滴傾斜滾動臨界角( $\alpha_c$ )的裝置，實驗結果發現  $\alpha_c$  比靜止接觸角更適合評估自潔能力強弱。建議把水滴傾斜滾動臨界角當作研究中的人造表面與市售商品評估自潔能力的標準之一。
- (六)、未來可以選擇 H/I 比值介於蓮葉(0.9)和羊蹄甲葉(0.2)之間，模仿微米與奈米雙層次粗糙突起的疏水材質，製造有自潔功能的表面。可以廣泛應用在瓷磚、衛浴設備、漱口杯、建築物的玻璃以及外牆的塗料和汽車烤漆等等。

#### 五、參考文獻

- 【1】柯賢文(民 96 年 3 月)。”表面張力的應用”。民 96 年 6 月 17 日，取自：國科會 科普知識自然科學，<http://www.nsc.gov.tw/>
- 【2】蘇俊鐘(民 92 年)。”蓮花效應”。民 96 年 6 月 17 日，取自：  
[http://nano.nchc.org.tw/dictionary/lotus\\_effect.html](http://nano.nchc.org.tw/dictionary/lotus_effect.html)

- 【3】 Barthlott, W. and Neinhuis, C.(1997)” Purity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces”. *Planta* 202 : 1–8
- 【4】 蔡智賢 (無日期)。”植物解剖學專有名詞”。民 96 年 6 月 17 日，取自：  
<http://web.ncyu.edu.tw/>
- 【5】 ”The lotus effect”. Retrieved June 17, 2007, from  
[http://lotus-shower.isunet.edu/the\\_lotus\\_effect.htm](http://lotus-shower.isunet.edu/the_lotus_effect.htm)
- 【6】 ”Plant cuticle”. Retrieved June 17, 2007, from [http://en.wikipedia.org/wiki/Plant\\_cuticle](http://en.wikipedia.org/wiki/Plant_cuticle)
- 【7】 ”Lotus effect”. Retrieved June 17, 2007, from [http://en.wikipedia.org/wiki/Lotus\\_effect](http://en.wikipedia.org/wiki/Lotus_effect)
- 【8】 “纳米技术明日世界之创新技术”民 97 年 1 月 17 日，取自：  
[ftp://ftp.cordis.europa.eu/pub/nanotechnology/docs/nano\\_brochure\\_zh.pdf](ftp://ftp.cordis.europa.eu/pub/nanotechnology/docs/nano_brochure_zh.pdf)
- 【9】 ”Theoretical background 2.1 The principles of a self-cleaning surface”. pp 9-22. Retrieved June 17, 2007, from <http://dissertations.ub.rug.nl>
- 【10】 Cheng, Y.T., Rodak, D. E., Wong, C. A. and Hayden, C. A. (2006) “Effects of micro- and nano-structures on the self-cleaning behaviour of lotus leaves”. *Nanotechnology* 17 : 1359–1362
- 【11】 Cheng, Y.T. and Rodak, D. E.(2005) ”Is the lotus leaf superhydrophobic?”. *Applied Physics Letters* 86, 144101
- 【12】 Miwa, M., Nakajima, A., Fujishima, A., Hashimoto, K., and Watanabe, T. (2000 ) “Effect of the surface roughness on sliding angles of water droplets on superhydrophobic surfaces”. *Langmuir*, 16, 5754–5760
- 【13】 ”The lotus effect keeps the leaf surface clean”. Retrieved June 17, 2007, from  
<http://www.corporate.basf.com>

## 六、附表

附表一：蓮葉表面尺寸(400×，尺標 20μm)

	粗糙表面高度 (H) (μm)	粗糙表面高度 /平均間距 (H/I)	乳突最大直徑 (相 當於投影直徑)(D) (μm)	乳突高度(μm)	乳突最大直 徑/乳突高度	乳突最大直 徑/表面高度 (D/H)
1	(24/38)×20=12.6	0.78	(17/38)×20=8.9	(19/38)×20=10.0	0.9	0.7
2	(25/38)×20=13.2	0.82	(15/38)×20=7.9	(20/38)×20=10.5	0.75	0.6
3	(30/38)×20=15.8	0.98	(20/38)×20=10.5	(25/38)×20=13.2	0.8	0.67
4	(27/38)×20=14.2	0.88	(19/38)×20=10.0	(24/38)×20=12.6	0.8	0.71
5	(29/38)×20=15.3	0.95	(20/38)×20=10.5	(24/38)×20=12.6	0.8	0.69
6	(23/38)×20=12.1	0.75	(20/38)×20=10.5	(24/38)×20=12.6	0.8	0.87
7	(30/38)×20=15.8	0.98	(25/38)×20=13.2	(25/38)×20=13.2	1.0	0.83
8	(31/38)×20=16.3	1.01	(20/38)×20=10.5	(25/38)×20=13.2	0.8	0.64
平均 值	14.4±1.6	0.89±0.10	10.3±1.5	12.2±1.3	0.8±0.08	0.7±0.09

乳突平均間距為 16.1±1.2μm (N=7)

附表二：蓮葉乳突的平均間距（= $[\text{面積} \div \text{乳突數}]^{1/2}$ ）

	面積( $\mu\text{m}^2$ )	乳突數目	平均間距
1	17749.22	54	18.13
2	17749.22	70	15.92
3	17749.22	78	15.08
4	17749.22	83	14.62
5	17749.22	68	16.16
6	17749.22	59	17.34
7	17749.22	73	15.59
平均值			16.1±1.2

附表三：芋葉乳突平均間距

樣本	面積( $\mu\text{m}^2$ )	乳突數目	平均間距( $\mu\text{m}$ )
1	17749.22	31	23.93
2	17749.22	28.5	24.96
3	17749.22	27	25.64
4	17749.22	27	25.64
5	17749.22	30.5	24.12
平均值			24.9 ± 0.8

附表四：芋葉的表面突起高度

樣本	表面突起高度( $\mu\text{m}$ )	樣本	表面突起高度( $\mu\text{m}$ )
1	10.6	8	8.1
2	12.8	9	9.9
3	9.6	10	14.2
4	10.6	11	13.1
5	10.9	12	12.5
6	8.1	13	13.5
7	8.1	14	10.5
		平均值	11±2

附表五：羊蹄甲的表皮細胞高度

樣本	表皮細胞高度( $\mu\text{m}$ )
1	3.5
2	2.6
3	4.4
4	3.5
5	4.4
6	3.5
平均值	3.7±0.7

附表六：羊蹄甲的表皮細胞間距

樣本	剖面表皮細胞寬度(間距) (μm)	樣本	剖面表皮細胞寬度(間距) (μm)
1	21	7	17
2	21	8	19
3	21	9	19
4	18	10	22
5	22	11	23
6	22	12	23
平均值			19±2

附表七：水芙蓉長絨毛的平均間距

樣本	面積(μm <sup>2</sup> )	長絨毛數目	平均間距(μm)
1	1488148	50	173
2	1488148	52	169
3	1488148	57	162
4	1488148	50	173
5	1488148	56	163
平均值			168±5

附表八：蒸餾水水滴(25°C, 4 μl)與蓮葉葉面之接觸角

樣本	接觸角	樣本	接觸角	樣本	接觸角
1	170°	11	171	21	158
2	167	12	162	22	163
3	169	13	158	23	165
4	166	14	161	24	163
5	169	15	160	23	165
6	168	16	163	24	163
7	168	17	160	25	162
8	161	18	163	26	155
9	168	19	163	27	156
10	168	20	156	平均值	163±5



附表九：蒸餾水水滴（25°C, 4 μl）與芋葉葉面之接觸角

樣本	接觸角	樣本	接觸角
1	160	10	161
2	154	11	165
3	160	12	156
4	152	13	159
5	160	14	158
6	156	15	156
7	152	16	155
8	152	17	157
9	161	18	159
		平均值	157.4±3.7

附表十：蒸餾水水滴（25°C, 4 μl）與羊蹄甲葉面之接觸角

樣本	接觸角	樣本	接觸角
1	144	9	148
2	146	10	145
3	144	11	147
4	147	12	148
5	148	13	147
6	149	14	148
7	148	15	147
8	148	16	146
		平均值	147±2

附表十一：蒸餾水水滴（25°C, 4 μl）與水芙蓉葉面之接觸角

樣本	接觸角
1	160
2	160
3	162
4	161
5	163
6	160
平均值	161±1

附表十二：水滴傾斜滾動面臨界角（蒸餾水 4  $\mu$ l 於 25°C）

	蓮葉	芋葉	水芙蓉葉	羊蹄甲嫩葉
實驗 1	5	3	33	8
實驗 2	4.5	8	22	7
實驗 3	7	5	43	9
實驗 4	4.5	6	21	7
實驗 5	5	4	33	16
實驗 6	5.5	3	40	23
實驗 7	4	10	30	20
實驗 8	4.5	13	21	20
實驗 9	7	4	15	13
實驗 10	9	5	22	8
實驗 11	3.5	6	32	11
實驗 12	5.5	17	44	18
平均值	5.4 $\pm$ 2	7 $\pm$ 4	30	13 $\pm$ 6

## 評語

優：運用高科技解決大眾感興趣的問題。

缺：1) 爲一已知的問題。

2) 雖然實驗很精采但未提出新的結果。