

中華民國第42屆中小學科學展覽會

::: 作品說明書 :::

高中-生物科

科 別：生 物 科

組 別：高 中 組

作品名稱：植物運輸水分的物理機制

關 鍵 詞：內聚力理論、水膜凹陷

編 號：040712

學校名稱：

嘉義縣私立協同高級中學

作者姓名：

周怡吟、徐郁潔、張允慈、林鈺婷

指導老師：

林主旭、張世欣



植物運輸水分的物理機制

壹、前言

長久以來植物生理學家探討高大樹木如何將水分運送到頂端，其中最主要的理論包括根壓，毛細作用，蒸散作用以及內聚力理論。1914 年 H. H. Dixon 所提出的理論結合了蒸散作用與水的內聚力，其理論主張水在木質部內移動的驅動力是來自葉片蒸散所產生的張力和負壓。水如一層薄膜覆蓋在葉肉細胞的表面，當水分因蒸散作用而散逸至大氣中時，水膜即退到相鄰細胞的細胞壁間，這個現象造成顯微的曲線表面，因而產生葉肉細胞內的負壓，將木質部的水分向上拉升。

由於在高中物理中，我們學到有關表面張力計算的技巧，因此在閱讀有關植物生理學中上述的理論時，我們發現作者引用的為一「球狀曲面」的表面張力公式，並且書中對於水膜凹陷產生負壓處是在海綿組織細胞的表面。我們以為負壓產生的位置主要是在維管束鞘表面，且水面的凹陷形狀應為「圓柱曲面」，在本實驗中我們以高中物理表面張力計算的技巧重新導出適合圓柱曲面，水膜形狀下的負壓大小，設計一個模擬實驗印證公式的正確性後，我們以一個豆科植物的電子顯微照片為實例，估計此一水分輸送的合理高度，發現所能輸送的高度約為 3.7 公尺高！

貳、實驗目的

提出新的圓柱薄膜凹陷模型替代一般植物生理學的球型薄膜凹陷模型，設計實驗印證公式並藉由電顯照片，實際估算出水膜凹陷程度與水分上升高度的關係。

參、理論與計算

一、一般植物生理學的球型薄膜凹陷模型：

以海棉組織細胞為水膜凹陷處推導出下列公式：

球體表面水膜張力大小為 T

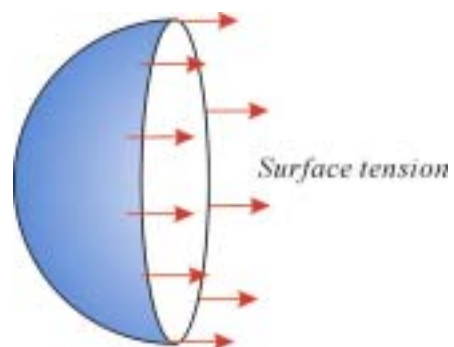
曲率半徑為 r

則 由高中物理球面張力產生的內外壓差 ΔP
與曲率半徑的關係式為：

$$\Delta P \times A = T \times 2\pi r$$

$$\Delta P \times \pi r^2 = T \times 2\pi r$$

$$\Delta P = \frac{2T}{r}$$



二、本實驗所提的圓柱薄膜凹陷模型：

以維管束鞘為水膜凹陷處推導出下列公式：

令薄膜張力為 T ，薄膜凹陷處兩端的間距 d ，管長 L ，

壓克力管半徑(相當於維管束半徑) R ，薄膜和兩管切點及兩管圓心連心線的水平夾角

α (如右圖所示)

$$A = L \times d$$

$$d = 2R - 2R \cos \alpha$$

內外壓差所產生的力大小為

$$F = \Delta P \times A$$

其中

$$\Delta P = P_a - P_{in}$$

此一壓差所產生的力大小與水膜表面張力所產生的力大小平衡則

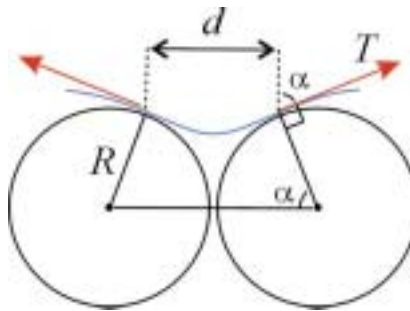
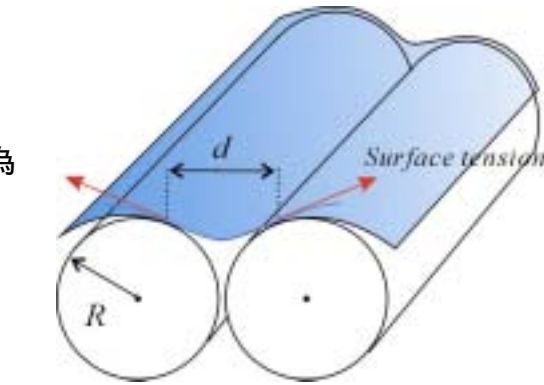
$$\Delta P \times A = 2T \cos \alpha L$$

$$\cos \alpha = 1 - \frac{d}{2R}$$

則

$$\Delta P L d = 2T L \left(1 - \frac{d}{2R}\right)$$

$$\Rightarrow \Delta P = \frac{2T}{d} - \frac{T}{R}$$



三、上述兩種模型所得公式的比較

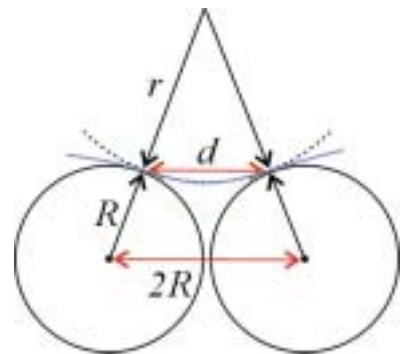
為了與植物生理學書上所提出的公式做比較，我們需先將壓克力管半徑 R ，換算成曲率半徑 r 。利用相似三角形的觀念推導如下式：

$$\frac{r}{R+r} = \frac{d}{2R}$$

$$\Rightarrow R = \frac{dr}{2r-d} \dots\dots(1)$$

將(1)代入我們所推導的公式可得

$$\Delta P = \frac{2T}{d} - \frac{T}{R} = \frac{1}{2} \left(\frac{2T}{R} \right)$$



由所得的計算結果，我們提出的模型為植物生理學上公式的 $\frac{1}{2}$ 倍。

肆、實驗器材

20cm 透明壓克力管、彈性薄膜、波以耳壓力計、針筒、
30cm×30cm 壓克力板、橡皮筋、游標尺、直尺、砂紙。

伍、實驗方法



首先用兩個鑽滿小洞的壓克力管，模擬植物導管，同時將薄膜覆蓋其表面，以代替植物導管外的水膜。改變壓克力管內的壓力並測量薄膜凹陷程度與壓力的關係。藉由此實驗，證明我們公式的可行性。

陸、實驗步驟

一、薄膜張力測量

- (一) 將兩段半徑 2 cm，管長 20 cm 的壓克力管並排固定，並在管上鑽滿小孔，使空氣可互相流通。
- (二) 以彈性薄膜套住兩管。
- (三) 以重 83g 的圓柱型重物置於兩管的薄膜上。
- (四) 用游標尺測量薄膜和兩管的間距，紀錄之。

利用兩管間距 d 和 W (物重) 計算出薄膜張力為 37.4 N/m

二、植物導管模擬

- (一) 將波以耳壓力計充滿水，以橡皮管的一端連接氣嘴。
- (二) 以游標尺量取薄膜附著於壓克力管的間距，記錄之。
- (三) 將針筒插入橡皮管內，抽取 25ml 的空氣，並量取薄膜附著於壓克力管的間距，記錄之。
- (四) 重複步驟 6 至抽取的空氣量，總和為 125ml。

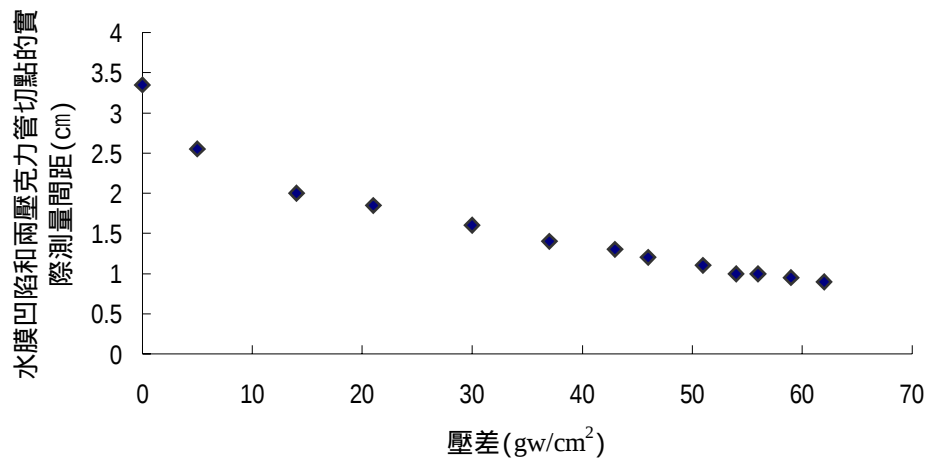


柒、實驗結果

一、實驗數據

壓差(cmH ₂ O)	0	5	14	21	30	37	43	46	51	54	56	59	62
水膜凹陷與兩壓克力管切點的實際測量間距(cm)	3.35	2.55	2.00	1.85	1.60	1.40	1.30	1.20	1.10	1.00	1.00	0.95	0.90
水膜凹陷與兩壓克力管切點的理論間距(cm)	3.60	2.99	2.30	1.95	1.63	1.44	1.32	1.26	1.18	1.14	1.10	1.06	1.03

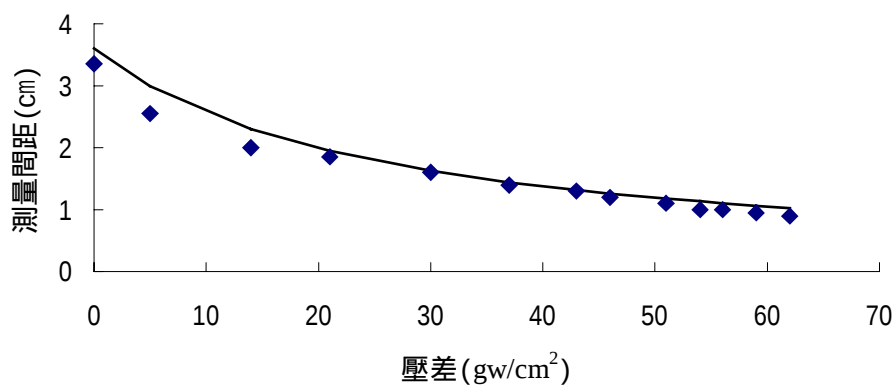
二、以圖表表示如下：



捌、數據分析

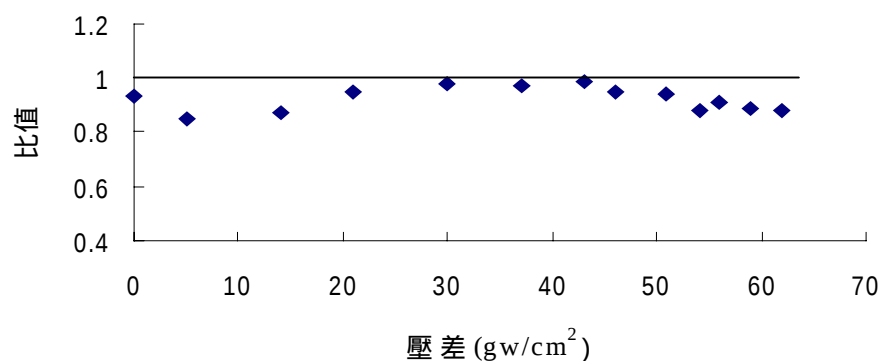
一、我們將模擬實驗所得的數據與前述理論計算中所得的公式相對照，繪圖如下。可以發現，實驗值與理論值的符合。當薄膜凹陷的程度愈大時，所產生的負壓作用就愈大，所吸引的水柱高度也就愈高。

實驗值與理論值



二、透過實驗值與理論值的比值繪圖，可以發現我們的誤差是在 10% 以內，證明我們所提出圓柱形修正公式可適用在實際的實驗中。

實驗值與理論值的比值



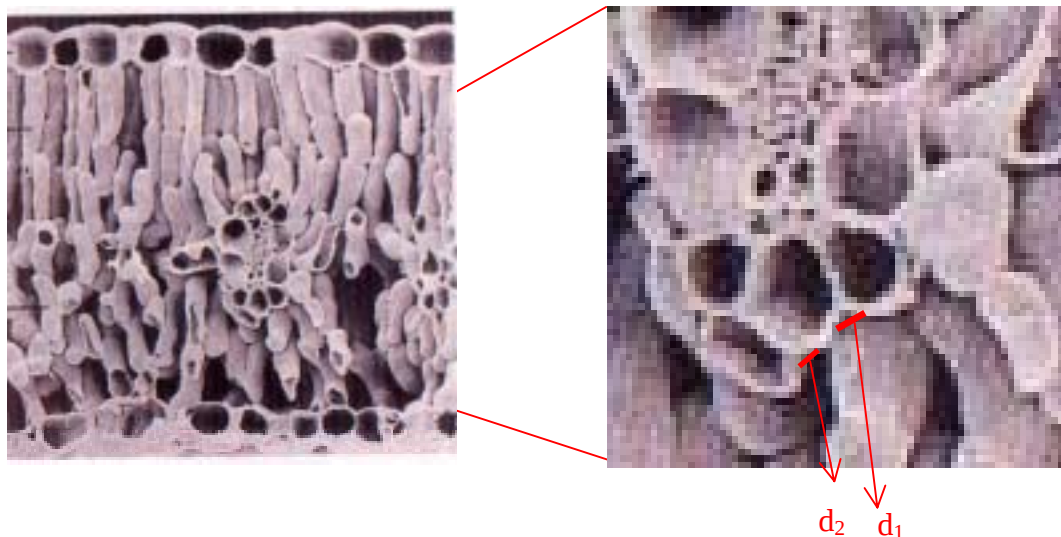
玖、以豆科植物（*Thermopsis montana*）為實例估計水分輸送的高度

一、水膜凹陷與水分運輸高度的關係：

經過實驗我們得知植物水分運輸的高度與其葉片內維管束外表面的水膜凹陷有關，當植物導管外的水膜經因蒸散作用散失到葉片空腔氣室時，水膜會在導管表面或與海綿細胞接觸的縫隙間形成水膜凹陷。水膜的凹陷會造成導管內的負壓，即為拉動水分上升的動力。

由所得公式 $\Delta P = \frac{2T}{d} - \frac{T}{R}$ 可知：當導管外的水膜越為凹陷，所得的 d 值（水膜凹陷時與導管切點的間距）也就越小，此時導管所產生的負壓就越大，水即可被拉至更高處。然而，並非所有植物導管表面的水膜凹陷曲率一致，使水上升至同樣高度，不同的導管半徑會使水分上升的高度不同，當植物的導管半徑愈大，對於水膜凹陷所產生的負壓，影響愈小，反之則影響較劇。

下圖所示為豆科植物（*Thermopsis montana*）的電顯照片。



已知豆科植物的維管束鞘半徑為 $5.5\mu\text{m}$ ，由電顯圖對照得知，合理的 d 平均值（兩導管間水膜凹陷與導管切點的間距）是 $2.78\mu\text{m}$ 。因此，利用我們所推導出的公式，假設常溫下水的表面張力大小為 $73 \times 10^{-3} \text{N/m}$ 。

$$\begin{aligned}\Delta P &= \frac{2T}{d} - \frac{T}{R} \\ &= \frac{2 \times 73 \times 10^{-3}}{2.78 \times 10^{-6}} - \frac{73 \times 10^{-3}}{5.5 \times 10^{-6}} = 3.93 \times 10^4 \left(\frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right) \\ &= 400 \left(\frac{g^w}{\text{cm}^2} \right)\end{aligned}$$

此一壓差相當於 4.0 m 的水所產生的壓差，對此豆科植物就此一單一效應而言所能產生水分輸送的高度約為 4.0 m 。

二、需有其他的機制才能完整解釋為何高大的樹木存在：

這是一個令人驚訝的結果，我們發現利用導管之間的水膜凹陷情形所推導的理論

與計算僅可以使植物水分到達 3~4m 高，顯然不足以產生足夠的高度，而毛細現象作用所能提供的水高也只有 0.5m，顯然必定存在有其他的機制而是我們所未知的。

拾、結論

一、我們認為蒸散作用即內聚力為植物水分輸送的主要動力；其造成的水膜凹陷之壓差發生在導管與導管之間而非細胞與細胞之間。

二、蒸散作用在導管間所造成因水膜散失而產生內外壓差。公式為：

$$\Delta P = \frac{2T}{d} - \frac{T}{R} = \frac{1}{2} \left(\frac{2T}{r} \right)$$

三、經由電顯照片我們估計出此一機制所能輸送水分的高度約 3~4m。

四、由於內聚力理論所推導的公式無法給予植物水分輸送一個合理的解釋，故我們認為，除了內聚力所提供的力量外定有其他力量存在。

拾壹、參考書籍

一、Lincoln Taiz and Eduardo Zeiger, 1991, Plant Physiology, The Bengamin/Cummings Publishing Company, Inc. p91

二、主編者：施河 中華民國九十年八月 生命科學上冊 南一圖書企業股份有限公司 第三章

三、高中物理教材物質科學篇 物理篇上

附錄：

目前植物學界普遍接受的理論如下：

(一) 根壓理論

假設充分澆水的草本植物莖，切斷它的上部，木質部汁液會由切面流出，可以持續幾小時，這表示在木質部中存在一來自根部的正向壓力，這個壓力稱為「根壓」。

根壓的基礎是根由土壤中主動吸收無機鹽類與根的構造。根部由土壤吸收礦物離子，離子被運送進入中心柱，在中心柱內離子的濃度大，所以滲透壓大而土壤內的無機鹽類就不斷的流進植物體內，形成一股推力。又由於植物根部的內皮層細胞具有特性的加厚發育成卡氏帶，防止水自由的流回皮層，產生一個正向的流體靜壓在木質部導管中，綜合以上，也就是「根壓」的來源。

然而，根壓是否可以解釋樹體內汁液的上升？首先，木質部汁液並不是很濃，所測量的根壓也很低，值大約在 0.1 到 0.5Mpa，是最高樹體運送水分至最頂端所需的 16 %。此外，不是所有的植物都可以測到根壓，甚至真正有根壓的植物也未必能測到，而且其速度相對於蒸散作用很慢。總而言之，根壓不能當做是植物體內所有汁液上升的機制，但無論如何根壓還是可以使及矮小的植物的汁液向上運移。

(二) 蒸散作用

蒸散作用是水分以氣態的方式從植物體內散逸到大氣中的現象。蒸散作用主要是來自葉片氣室內的飽和蒸氣壓與外界的蒸氣壓差所造成的擴散現象。葉片的海綿組織內擁有寬闊的氣室，是蒸氣壓形成的良好條件，當葉片氣孔張開時，水蒸氣的向外擴散，促使葉肉細胞及導管內的水也向氣室擴散，進而產生一股拉力將水往上传送，故蒸散作用為水分上升的一大動力。

(三) 毛細現象

假如玻璃毛細管（管徑很小的玻璃管）被插入水中，管內的水會上升而超過周圍的水面，這個現象稱為毛細上升或毛細作用。

毛細上升是因為許多力量的相互作用，這包括附著力和內聚力。附著力是由流體分子與表面間的吸引力所產生的；水分子吸引著毛細管管壁，引起水在管壁上往上爬。當水沿著管壁往上流時，水分子間的強內聚力作用，將大量的水分往上拉到管的內腔，這將會持續到提舉的力量與作用在水柱上的重力平衡時。

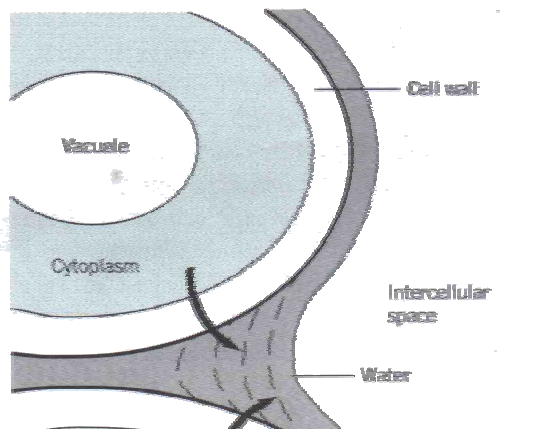
水在毛細管中的上升和管徑成反比。在大的管胞或小的導管細胞中（半徑 25 μm ），水可升到約 0.6 米的高度；大的導管細胞（半徑是 200 μm ），毛細作用只能使水升的 0.08 米的高度。經由數據的推算，一棵 100 米的樹木若要藉著此作用，毛細管的管徑必須小到約 0.15 μm ，這遠小於最小的管胞管徑。因此，毛細作用並非是木質部汁液向上運送的一般性機制。

(四) 內聚力理論

首先引據「物理馬戲團」裡的一小段話。

「上個世紀的人以為樹幹裡的汁液是靠大氣壓力拉上來的，現在知道並不然，我們現在相信他是來自一種負壓，當水分子由樹葉蒸發以後，另一個水分子就移到樹葉表層取代原先水分子的位置，分子之間有股很強的力量，將水柱從根部開始往上拉動。」

所謂的內聚力也就是指分子與分子之間的一股互相吸引的力量，也就是這股力量使得水分子與水分子在植物的整個輸送機制裡面能夠連續而不斷裂。接著是負壓，植物內部的壓力大部分都小於外部的大氣壓力，所以外界能藉由壓差使得水分順利的輸送到樹頂。不同的植物水分輸送理論都會有其不同的驅動力假設，而在內聚力理論中所假設的動力來源就是透過葉片內水分蒸發所帶來的張力及負壓。



如圖所示，葉片表面細胞與細胞之間會有一層水膜覆蓋，水膜的來源則是透過輸送水分的導管的孔壁傳導到附近的每一個細胞表面，使其水膜覆蓋。事實上並不只細胞與細胞之間會有水膜，而導管與導管之間，導管與細胞的接觸面亦會有水膜覆蓋。當水分由於葉片的蒸散作用而散失到植物體外以後，覆蓋在細胞表面的水會減少，這表示細胞與細胞之間的水膜凹陷程度會增加，也就是說水膜在細胞與細胞之間的連結曲率半徑會變小，這使得水膜所造成的張力變大，而張力的向外分力亦會增大，造成內外壓力差值的增大。如下圖的力量分析：

當我們假設兩個細胞維簡單的兩個球體，半徑為 R ，水膜與細胞的切點到圓心的連線與圓心到圓心的連線所夾的角為 α ， T 為水膜張力，而 T 的向外張力是一股向外的力量，可視做細胞內與細胞外的內外壓力差。這個壓差使得水分能夠受到強大的牽引力量，進而在導管內上升。

當水膜的凹陷程度越大， T 就越大， $T \cos \alpha$ 也就越大，因而造成強大的壓差，使水分往細胞內擴散，這也是為