

那根有何用—— 仙人掌體溫恆定之研究

高中組生物科第三名

台灣省立新竹高級中學

作 者：陳世豪、陳 琦

指導教師：楊良平

一、研究動機

在溫差極劇的沙漠中，所能生存的生物必備有特殊的機制，以來抵禦炎熱及缺水的環境所帶來的不便。日夜溫差的劇烈，以及沙漠水份之缺乏，造就了沙漠植物之耐熱及抗旱性，仙人掌（Cactus）為典型存活在沙漠之植物，其必有能克服高溫及溫差大的構造和生存方式，為充分了解仙人掌的生存機構以及沙漠植物在困境中存活之法，以利人類在沙漠等特殊環境中活動，所以啟發實驗動機，著手設計實驗，並且特別就於仙人掌之針狀葉，討論其散熱特性，以彌補一般對於針狀葉功能之認識。

二、研究目的

使用在本研究之中所得的結果，如仙人掌之耐溫特性，及其生存方式與結構，開拓生物與人類，在溫差極大的環境之下，所能到達的範圍，加強生物在特殊環境中的生存能力，以及開發人類之新耕作食糧來源，以在下世紀中充分運用地球之每一份地力資源。

三、研究設備

有鑑於水銀溫度計之靈敏度不佳，僅能精確至 0.1°C ，故利用熱敏電阻源，使其接觸待測物表面，即可立即精確測量出待測物表面溫度之細微變化，且其精確值可達 10^{-3}°C 以上，是本實驗之重要實驗器材，所謂的熱敏電阻源，是運用半導體材料，在溫度變化的同時，其電阻值亦會有大小不同改變的特性，在測量電阻值大小後，將所得之電阻值，比對換算先前利用沸點作校準，而測量繪製的溫度與電阻關係圖，以精確得知生物待測體之溫度，而進行實驗，此電阻之性質從溫度與電阻關係圖中，得知為線性電阻，即為溫度與電阻值，呈線性函數關係，其換算方式如下。（電阻值之單位為 $\text{M}\Omega$ ，溫度值之單位為 $^{\circ}\text{C}$ ）

Ω 代表測得之電阻值

$$(\Omega - 15.07) \times 50 / 76.5 + 15 = \text{溫度值}$$

溫度與電阻之
關係換算公式

(一)材料：

仙人掌(仙人掌科·仙人掌球屬)

(二)設備：

熱敏電阻源	(適用範圍：4°C~60°C，精確度10 ⁻⁵ °C)	乙個
三用電表	(Yu-Fong，精確度0.8~3%)	乙個
電源供應器	(9V, 250mA 可持續72小時供電)	乙個
電源穩定器	(9V, 300mA)	乙個
顯微鏡	(光學及解剖顯微鏡，Nikon, 2000x)	各乙部
超音波加熱恆溫箱(SANYO, 40W, 60HZ)		兩台

四、研究過程

- (一)首先對於仙人掌在室溫之下25°C達成內外層溫度平衡，做一基本測量，作為接續實驗之比較，以此對照實驗，故取外至內CBA三取樣點，每隔0.8 cm取乙點，C點為仙人掌最外層之表層溫度取樣點，B點則為仙人掌海綿絲組織溫度之取樣點，而A點代表仙人掌中軸之溫度取樣點。其溫度測量方式為利用熱敏電阻深入取樣點，在表面立即取得三點溫度值，相隔4分鐘量測乙次。
- (二)將仙人掌置於事先即預熱至40°C達平衡之恆溫箱中，模擬高溫的環境，在仙人掌置入後48小時，對其平衡之高溫極限溫度做一測量。
- (三)將仙人掌置於事先即預冷至5°C達平衡之恆溫低溫箱，模擬沙漠之低溫環境，在置入後48小時以後，對其平衡之低溫極限溫度作一測量
- (四)先將仙人掌置於恆定為5°C之恆溫箱之中達成平衡後，再將其置入25°C之恆溫環境中，每間隔四分鐘，作A、B、C，三點之測量，由開始至實驗結束歷經48分鐘。
- (五)如(四)之實驗，將仙人掌置入維持在25°C情況之下的恆溫箱，達成平衡後，再將其置入40°C之恆溫環境，亦為每四分鐘測量三取樣點溫度乙次，至48分鐘後為止。
- (六)將仙人掌置於40°C之恆溫箱達平衡後，再將其置入25°C之恆定溫度中，每離四分鐘測量，A、B、C三取樣點，使其從高溫環境中降回室溫之溫度，至48分鐘後停止量測。

- (七)仙人掌置於 25°C 室溫之中達成平衡後，再將其置入 5°C 之低溫恆溫環境之中，如同(四)、(五)、(六)之實驗，在每隔四分鐘時測量三取樣點之溫度乙次。
- (八)分別拔除針狀葉叢，3、9及27叢，並依次將三株仙人掌置於 5°C 之恆溫環境之中，使其達成平衡後，再將三株仙人掌分別置入，已預先加熱至 40°C 的恆溫箱中，間隔三分鐘，量測其B點，即海綿絲組織之溫度變化，至熱敏電阻之電阻值達到 $40\text{M}\Omega$ 為止，結束實驗。
- (九)利用刀片刮除針狀葉表面的突起物，並重複實驗(四)~(七)，便得到一組數據。
- (十)以樹脂均勻塗滿仙人掌針狀葉叢，而重複實驗(四)~(七)，以取得仙人掌不是利用莖部散熱的證據。
- (十一)以透明樹脂將仙人掌球莖表面，完全塗均，如(十)之步驟，重複實驗(四)~(七)。
- (十二)將富含水份之仙人掌，由總重56.4克脫水至40.0克，重複實驗步驟(四)~(七)，以測得仙人掌所含之飽和水份多寡與其恆溫機制之關係。
- (十三)將紅墨水以針筒注入仙人掌之根部，觀察仙人掌之整體水份運輸之情形，並將拔除之針葉叢置於藍墨水之中，觀察墨水滲入針狀葉中軸之情況。
- (十四)分別使用光學及解剖顯微鏡，觀察解剖及切片後之仙人掌莖部，以及針狀葉叢之形成構造，以建立理想模型，來解釋其散熱作用。
- (十五)將加熱鋼棒插入仙人掌之中軸導管，即取樣點A，將鋼棒加溫，以量測出中軸導管所能承受之最高瞬間死亡溫度，並以呼吸作用，判定仙人掌之死亡。
- (十六)測量針狀葉叢及仙人掌脫水前後之重量所佔總仙人掌之重量比例，以求得仙人掌拔除針狀葉後，針狀葉之中所含之水份多寡佔整體之比例，以及仙人掌失去水份之多寡與增溫情況之量化關係，並證明針狀葉叢，的確具有水份之存在，並計算仙人掌球莖之總表面積，以及針葉叢所增加之散熱面積，合併求得總輻射表面積，及其分率。

五、實驗結果

(一)由調整恆溫箱之內部恆定溫度，以測得仙人掌恆溫作用之實驗中得知仙人掌在高溫環境中，仙人掌莖部的溫度並未隨著外界溫度上升以達成熱平衡，而是由內至外溫度漸增，但最外層之溫度，仍未達到外界環境之溫度，且在低溫環境中，其內部及外層之溫度接近，卻仍高於外界之溫度，維持體溫為 15°C 以上，亦即仙人掌本身具有恆溫的結構抵禦氣溫變化。由實驗中了解，仙人掌球形莖之內層掌心，在日夜溫差極大之情形下，其愈內部之恆溫性愈佳，在外界溫差急劇變化下，內部溫度變化量極小，但越外層則溫度差異愈大，最外層之表皮可將外部環境溫度，加以緩衝，使掌心內部可以維持生理

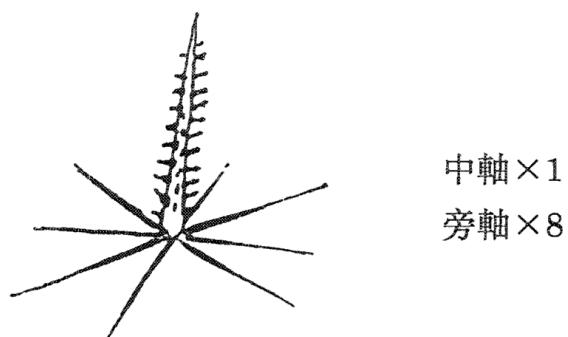
作用，而不致死亡，即外層必有特殊保溫結構。

- (二)由拔除針葉叢，以測定其針狀葉結構，對於仙人掌之體溫恆定，是否造成影響的實驗中證實，仙人掌之針狀葉叢數量增減的多寡，確實和仙人掌體溫恆定之效果有密切的關係，以及仙人掌針葉叢具有散熱之功能，在恆定高溫環境下，拔除的針狀葉叢愈多，則其仙人掌莖部體溫上升速率，相較於拔除前之上升速率，提高許多，因此得知仙人掌針狀葉叢數量愈少，則其在高溫環境中生存的能力越低，同時證明得知，針狀葉叢具有將熱能輻射散失的功能。且得到針狀葉叢之數量，與其仙人掌內部增溫改變量關係，更進一步確認針狀葉之功能，但在降溫環境中，拔除針狀葉叢與否，影響不大。
- (三)根據觀察，沙漠耐旱植物，為了減少水份散失，所以在高溫日照環境下，將氣孔閉合，因此便無法藉由氣孔進行蒸散作用，以排出多餘之熱量，這種現象，可從將仙人掌莖表面塗以樹脂，測定其恆溫能力之實驗中得知，仙人掌之莖部表層的增溫情形，在塗抹樹脂前後，其溫度變化差異不大。因此可以證明仙人掌莖部表面之蒸散作用，對於其整體恆溫機制並無重大的影響。必定由另外之結構進行其散熱作用，為證明針狀葉結構為利用輻射方式進行散熱作用，故將針葉叢表面塗以樹脂進行實驗，在結果中發現，塗抹樹脂前後，對恆溫機制無影響，因此仙人掌之針狀葉必不使用蒸散作用來進行其散熱行為，但在低溫環境中，針狀葉未能發揮其輻射功能，必為表層結構，具有保溫作用。
- (四)從仙人掌之縱及橫剖面中發現仙人掌之球狀莖結構，其中心為一環螺紋導管，在其外包覆有一層海綿絲組織，可吸收大量水份。為了解仙人掌之水份運輸情形，在根部注入紅墨水，使其在仙人掌內部運送，結果發現仙人掌之水份運輸，由根部之螺紋導管輸送至球狀莖，而後經由周圍極類似植物枝幹的分支狀結構，深入海綿絲組織中，使墨水被海綿組織吸收，而運送至表層接近針叢處，由一類似火山噴口的突起海綿組織延伸至針葉叢根部，繼而輸導至針狀葉之中軸，這便是仙人掌主要之水份流動情形。
- (五)由仙人掌表層的解剖實驗中，發現其表層具有四層可恆定體溫的構造，在表層為具有保衛細胞之臘質，從實驗中得知，在外界環境溫度改變極為劇烈之情形下，此層具有將外界溫度隔離的功能，使在高溫或寒冷環境之中，利用此層使熱能無法有效傳導的特性，作為第一步隔離外界溫度之屏障。接著是一層綠色柵狀組織，光合作用主要在此進行，此層可吸大部分可見光，將光能在此即被吸收，無法繼續穿透至內層，而使外界之輻射能量終止其加溫效應，亦抵禦外界之低溫，更內則為柵狀組織及海綿組織過渡帶，更增強仙人

掌之恆溫能力，最後，便是富含水份的仙人掌莖，以大量水份保持體溫恆定。

(六)在光學及解剖顯微境的觀察之下，針狀葉在其表面有許多微小突起物，極類似電腦散熱板的結構，也就是運用其凹凸不平的構造，增加散熱的總表面積；以及應用尖端大量輻射能量之特性，增加散熱效率，使用此兩種原理，可以在高溫環境中，輻射大量熱能，且因為針狀葉為深色尖端，使其物理高輻射率特性，更能在仙人掌之體溫恆定機制中顯現其重要性，從拔除針葉叢及刮除微小突起物，以比較其溫度上升速率的實驗裡，更能證明突起結構在散熱機制中所具有之重要功能。

每叢針葉結構：(每株約78叢)



針狀葉散熱面積估算：(平均值)

$$\text{圓錐面積 } A = \pi r h r$$

	中 軸	橫 軸
厚度 (2r, cm)	0.03	0.025
高度 (h, cm)	1.0	1.0
表面積 (cm ²)	0.047	0.039
每叢個數	1	8
每叢面積 (cm ²)	0.361	
每株面積 (cm ²)	28.166	

針狀葉所佔總表面積之比例：

$$28.166 \quad \div \quad 78.41 \\ (\text{平方公分，針狀葉面積}) \quad (\text{平方公分，總表面積})$$

$$= 35.92\%$$

每株仙人掌之針狀葉總重量：

$$\begin{array}{rcl} 0.12 & \times & 78 \\ (\text{克}, \text{每叢重量}) & & (\text{叢}, \text{每株叢數}) \end{array} = 9.36 \text{ (克)}$$

針狀葉所佔總重之比例：

$$\begin{array}{rcl} 9.36 & \div & 56.4 \\ (\text{克}, \text{針狀葉總重量}) & & (\text{仙人掌總重}) \end{array} = 16.5\%$$

$$\text{PS : 總表面積} = \text{莖部面積} (4\pi r^2) + \text{針狀葉面積}$$

(七)經由墨水滲透針狀葉中軸之實驗，以及烘乾針狀葉前後的重量比較得知，針狀葉中軸必具有流動水份的存在，如此便可藉由流動液體的輸導，將表層及內部多餘熱量，藉由針狀葉中軸之基部液體輸導，導送熱量至針狀葉之中軸，繼而從針狀葉表面之突起物，及針狀葉的尖端，將熱量輻射至空氣中，達成散熱效果，類似人類皮膚表層散熱作用，但是使用輻射的方式，而不是運用蒸散的方法，來達成散熱的效果。

(八)從解剖仙人掌莖部之實驗中得知，因為仙人掌之莖部，有海綿絲的結構，使其莖部能富含水份，而在乾旱中生存，且運用水本身之比熱極大和蒸散熱高的特性，將多餘之熱能吸收，使得仙人掌本身的體溫不致於上升過於劇烈，而導致死亡，並且從實驗中得知，一株缺水的仙人掌其本身之恆溫能力，便不如富含水份的仙人掌強，一旦置於高溫中，其體溫便迅速上升，並且立即死亡。

(九)從置於恆溫箱中，富含水份的仙人掌，對於外界環境溫度改變時，仙人掌莖部之溫度變化的實驗中得知，仙人掌心之恆溫範圍，在模擬的沙漠環境之中，恆維持在 25°C 時，掌心之溫度值的攝氏正負2度差之間，而其餘仙人掌莖較外層之結構，愈往外則其溫度變化愈劇烈，但掌心之溫度恆維持穩定，且由仙人掌中莖軸加熱實驗中得知，仙人掌中莖軸一旦加熱至 26.4°C 以上時，會立即死亡，所以仙人掌中莖軸在仙人掌生存時，倘使處於高溫下，便會導致生理作用之停擺，而使得仙人掌不能進行正常之生理反應，所以仙人掌心之恆溫機制，關係著仙人掌之生存與否，因此仙人掌之體溫恆定，對於仙人掌之生存機制有極為重要之影響地位。

七、結論

- (一)仙人掌之體溫，不會與外界溫度達成熱平衡，在低溫時，體溫恆維持在15°C以上，外層表皮可將環境溫度加以緩衝，使其體溫恆定。
- (二)仙人掌之針狀葉叢，在高溫環境中，具散熱之功能，但低溫時則否，此散熱功能嚴重影響其生存能力，改變仙人掌體溫上升速率極鉅。
- (三)仙人掌之主要散熱方式，為透過針狀葉之突起及尖端，輻射熱量。
- (四)仙人掌可藉由主動水份流動方式，將熱能運送至針狀葉根部，而利用中軸，使之均勻分佈於針狀葉表面突起，而輻射熱量至空中。
- (五)仙人掌之表層可禦寒，隔熱且吸收可見光，以水份保持體溫恆定。
- (六)針狀葉突起表面，類似電腦散熱板，具深色尖端可輻射大量熱能。
- (七)仙人掌莖部，有海綿絲結構，富含水份，使體溫不易上升而致死。
- (八)仙人掌球莖具有四層可恆定體溫之構造，使其增溫及降溫能和緩。
- (九)仙人掌心之恆溫範圍，恆維持在25°C時，掌心溫度值的攝氏正負2度差之間，而其餘較外層仙人掌莖構造，愈往外則其溫度變化愈劇烈。
- (十)仙人掌中莖軸，如加熱至26.4°C以上時，便立即死亡。故倘使處於高溫情況下，便會導致仙人掌生理作用之停擺，而造成死亡，仙人掌心之恆溫機制，關係著仙人掌生存與否，因此仙人掌之體溫恆定，對於仙人掌之生存機能有極為重要的地位。

八、參考資料

- (一)Plant Physiology P.04~20 WADSWORTH
- (二)Plant Physiology P.46~62 茂昌圖書
- (三)牛頓科學研習百科<植物>仙人掌科 牛頓出版社
- (四)最新生物學 P.23~47 藝軒圖書
- (五)熱與熱力學 P.81~98 徐氏基金會
- (六)物理學 P.54~72 南山堂出版社
- (七)物理學(圖解課程書) P.16~44 徐氏基金會
- (八)光復科學圖鑑 仙人掌部份 光復書局
- (九)最新物理手冊 P.53~68 徐氏基金會
- (十)植物生理學 P.71~85 徐氏基金會
- (十一)環華百科全書 P.89~97 環華出版社

評 語

本作品針對仙人掌的組織細胞構造進行觀察，並進而探討其溫度的控制機制，而發現的中軸部份及控制仙人掌對照最重要的構造，研究結果合理而有創意，頗值鼓勵。