

沙漠中的動物為何能生存？

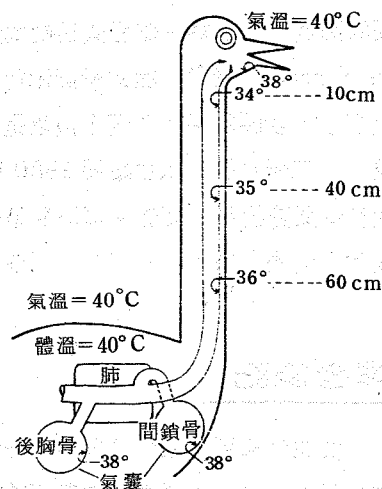
——探討一個特殊的生理現象——

史金燾 司君一

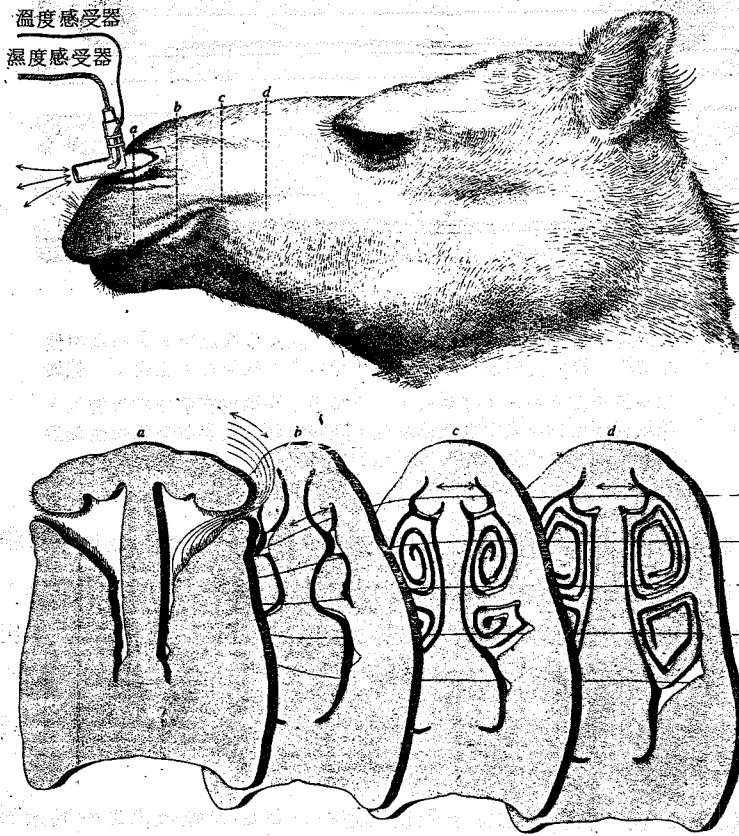
國立臺灣師範大學生物系

美國阿里桑那州沙漠裡的跳鼠 (Kangaroo rat)，能夠不喝水而僅藉著食物中有限的水份生活，實在是一個造化的奇蹟，也可以說是生物對環境適應的極致。如果我們以生理學的眼光來看這個事實，研究它是否有特殊的生理機制，有效地利用保存水份，則可從跳鼠呼出與吸入空氣的溫度與濕度來著手。跳鼠所吸入的空氣很乾燥，但是延著呼吸道由鼻孔送到肺時，即變暖變濕了。而呼出的空氣則相反，呼出氣在冷卻時，還放出一些熱量。例如氣溫是 30°C ，相對濕度在 25% 的情況下，跳鼠呼出氣是比體溫低 11°C ，也就是 27°C ，而相對濕度是 100%。在此過程中，由於空氣在 27°C 時所攜帶的飽和水蒸氣比 38°C 要少，因此跳鼠可收回部分用於使空氣變暖及變濕時所消耗的能量和水。此外，生活在半乾燥地區的駝鳥，也有特殊的生理能力以適應酷熱的沙漠生活。由於駝鳥龐大的體積，使它無法靠挖掘洞穴以躲避炎熱；同時它沒有汗腺，因此必須藉著呼吸系統不斷地進行蒸散作用將熱散送出去。圖(一)顯示，空氣與駝鳥的體溫均是 40°C ，在此情況下，駝鳥代謝作用產生的熱，無法以傳導或輻射的方式交換，因此熱必須藉著將水份蒸發而釋出。見圖(一)溫度較低處就是進行蒸散作用的位置。以此方式，駝鳥甚至能在 50°C 以上的環境中保持好幾小時熱量的平衡，但每分鐘必須蒸散 15 克以上的水份。由以上二種動物對環境的適應情形，可知沙漠生物的主要適應問題便是水份的保存與熱量的平衡。現在我們用科學家研究駱駝如何解決水份與熱量平衡的問題，作大約的介紹。

1979 年，科學家們用敏銳的溫度與相對濕度感受器，測量駱駝呼出空氣的溫度與濕度，圖(二)，結果令人驚奇，因為駱駝能呼出比體溫低而且濕度未達飽和的空氣。這有什麼意義？是否意味著駱駝具有特殊的生理機制或構造？原來駱駝的鼻子具有特殊的性質，說明了它為什麼能呼出濕度不飽和的空氣。駱駝鼻腔內有吸濕性的表面 (* hygroscopic surface)，它能夠吸收水蒸氣。當呼氣時，由肺呼出的潮濕空氣中的水分子就會被吸濕性的表面所吸收；吸氣時，乾



圖(一) 氣溫與體溫均是 40°C 時，駝鳥呼吸系統的溫度分布情形，由於體內，體外的溫度相同，熱無法以傳導的方式交換，因此藉著氣囊、氣管內水份的蒸發冷卻，駝鳥將代謝熱散發出去。



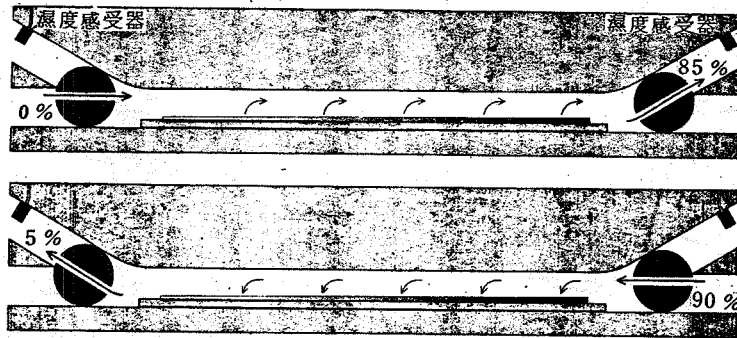
圖(一) 駱駝的鼻子，和溫度、濕度感受器裝置的情形，駱駝的鼻子，是熱量和水分進行逆流交換作用的位置。藉著插在駱駝鼻孔的感受器，可記錄駱駝吸入和呼出的空氣溫度和相對濕度。

乾燥的空氣又能將吸濕性表面上的水蒸氣帶至呼吸道裏，而使吸入的空氣變暖變濕，同時亦恢復吸濕性表面原來的性質。在這個過程中熱量的交換亦同時進行。

為了證明吸濕性表面能使濕度再生，科學家們設計了一個簡單的模型，藉鼻子模型，圖(二)，(長 30 cm，寬 7 cm，裏面相隔 2 mm)，空氣經過濕度的控制，能模擬駱駝的呼吸，還包括氣體可順逆流。

駱駝蜿蜒曲折的鼻道，能導引空氣的流動，同時也提供 1000 cm^2 以上的表面積。圖(二)。模型裏的表面積約為 100 cm^2 ，因此我們將單位時間內通過空氣的體積調整為駱駝的 $1/10$ ；通過模型的空氣每 10 秒鐘各順逆流一次，即模型每分鐘呼吸 6 次，約等於駱駝休息時的呼吸速率。

學者們嘗試以不同的鹽類或各種組合，如氯化鈣和其他吸濕性的鹽類，覆蓋在模型裏的表面上。事實上，有時以一般的濾紙也能表現鼻子模型的吸濕功能。圖(三)，實驗時，每一呼吸週期，令乾燥的



圖(三) 駱駝的鼻子模型

模型是一狹窄的長方形小室，模型內的濾紙模擬駱駝鼻子內吸濕性的粘膜。模型交替地“吸氣”和“呼氣”。吸氣時（上圖），乾燥的空氣由左方進入；呼氣時（下圖），潮濕的空氣由右方進入。濾紙從呼出的空氣中吸取的濕氣，在吸氣時由乾燥的空氣攜至模型的另一端。經此交換作用，呼出的空氣僅帶有5%的相對濕度。

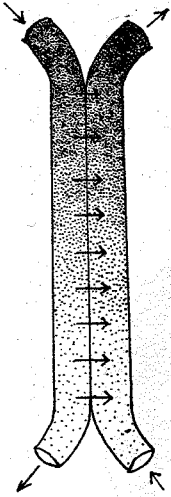
空氣向一方向流動5秒鐘（代表吸氣）；另外，使帶有90%相對濕度的空氣則以相對的方向流動5秒鐘（代表呼氣）。呼氣時，由“肺”內呼出的90%相對濕度，“呼出”的空氣，經過鼻道時，由於濾紙或鹽的吸濕作用，在鼻孔呼出時，僅帶有5%的相對濕度，也就是說，“呼出”空氣中所帶有的大部分水分子，均由於濾紙的吸濕性功能而留在模型內了。相對的，完全乾燥的“吸入”空氣，在進入“肺”以前，將濾紙上的水蒸氣帶走，因此當它到達模型的另一端時，帶有85%的相對濕度。因此，鼻子模型藉著吸濕性表面的吸濕功能，而保存了許多水份。

濾紙改變空氣濕度的原理，在駱駝的鼻子內也可進行。當氣候乾燥而長時間未喝水時，駱駝的鼻膜變乾而外覆一層乾的粘膜和細胞碎片，這層粘膜具有吸濕性，作用和鼻子模型內的濾紙功能相同，能夠吸收水蒸氣。因此，用鼻子模型呼吸的實驗，說明了駱駝為何能呼出濕度未達飽和的空氣。

駱駝如要獲得1公升的氧進入體內，則須吸入20公升的空氣。假使這種生理現象是在夜間進行，氣溫是28°C，相對濕度是40%，如果呼出35°C和100%相對濕度的空氣，駱駝將損失568毫克的水；如果呼出28°C，100%相對濕度的空氣（熱交換作用），駱駝將損失322毫克的水；如果呼出28°C，75%相對濕度的空氣（熱交換與吸濕作用），駱駝將損失187毫克的水。由於駱駝生理代謝1公升的氧約能產生600毫克的水（代謝水），因此駱駝在夜間由呼吸道散失的水份（187毫克），僅為其代謝水的1/3，因此它比跳鼠更能保存水份。

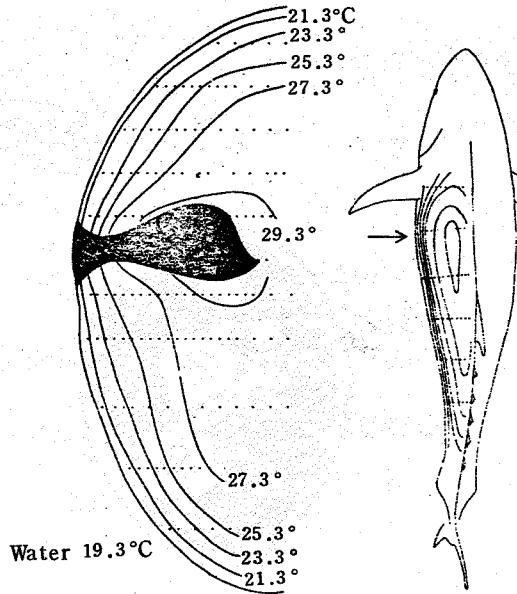
綜合以上的結果，如以動物保持體熱的原理而言，主要便是逆流交換作用（counter current exchange），亦即兩條鄰近而流向相反，圖四，或單一的管道內（如駱駝），氣體或液體在流動時，隨著時間改變，而在不消耗能量的情況下，將熱量或水份保存下來，提供動物使用，使它們能在惡劣的環境中生存下去。

此外生活在海中的鮪魚，利用逆流交換作用，使得它的身體經常保持溫暖，而能在不同溫度的海域生活覓食，並且使它成為海中游速最快的動物之一。（記錄顯示，鮪魚能在40天，由美國佛羅里



圖(四) 逆流系統

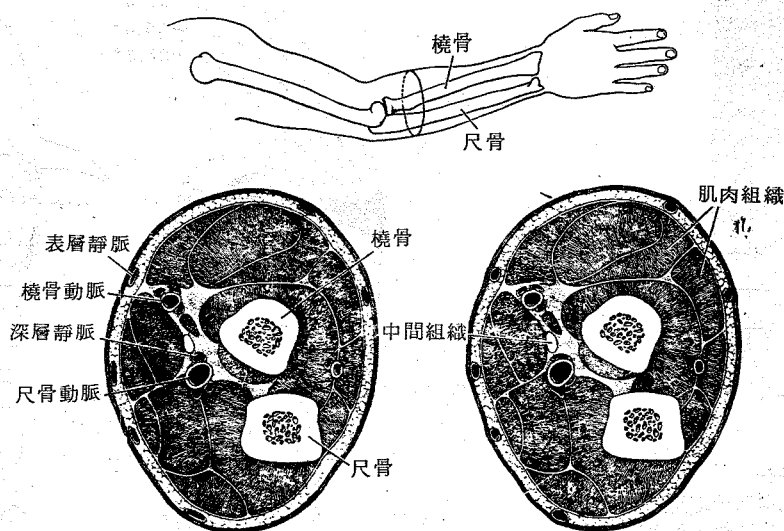
熱量在兩條毗鄰而流向相反的管子內交換。熱水由左上方流入，冷水由右下方流入，由於兩條管子毗鄰，因此熱量由左方的管子移至右方的管子，而在右方的管子中，由上至下，呈現出一溫度階梯。（顏色由深至淺）。



圖(五) 鮪魚肌肉的溫度分布情形，愈深層的肌肉，溫度愈高。左圖是右圖箭頭指示處之橫切面。

達州邁阿密附近游至挪威)。鮪魚的循環系統與鳥類和哺乳類不同，鮪魚的肌肉內有一對由鰓分枝出來，而延著體壁兩側走向的側動脈（lateral arteries），側動脈與靜脈構成熱交換血管（heat exchanger）。熱交換血管由體側的肌肉流向深層的肌肉時，分枝成許多小靜脈與小動脈，這些小靜脈與小動脈間交替地纏繞著，而使得動脈與靜脈血液間的熱交換作用達到頂點。由圖(五)顯示，經此逆流熱交換作用，順著熱交換血管的走向，愈深層的肌肉溫度愈高，而呈現出一溫度階梯（temperature gradient）。人類的前臂，也有逆流交換血管（圖六），天氣冷時，（圖六，左），由心臟出來的血（ 37°C ）流入前臂，經由肌肉深層而與毗鄰的靜脈相距很近，由於靜脈血是向心臟流動，因此靜脈血液能自毗鄰的動脈處，經由逆流交換作用而得到熱量，而使得流回心臟的血液溫度與體溫相近，不致因流回低溫的血液而危害心臟正常的生理功能。天氣熱時，（圖六，右），血液則由皮膚下層的靜脈流回心臟，不經過深層的熱交換血管，而使得流回心臟的血液溫度不致高過體溫。因此藉逆流交換作用，可達到調節體溫，維持熱平衡的目的。

除了上述幾個例子之外，自然界裏，動物藉體內的逆流交換作用，維持水份和熱量平衡的例子還很多，例如極帶海域的鯨魚，可藉逆流交換作用保持鰭狀肢和尾鰭的溫度；東非草原的長頸鹿藉此作用可使得 $1/5$ 的日須水量，不致因呼吸作用而散失；大黃蜂藉此作用，使飛行肌肉的溫度高於 30°C ，因此在氣溫近於零的天候下仍能飛行；人類運用逆流交換作用的原理，發明出人工逆流交換器，使得經氣管切開手術後的病人，免於氣管因乾燥而產生硬膜的危險。此外，連我們每天排泄的尿液，也是藉著在腎臟進行的逆流交換作用，而達到使尿液濃縮和維持水份平衡的目的。



圖(六) 人類前臂的逆流交換作用
天氣冷時 (左) , 流入前臂的血液, 經由深層與靜脈毗鄰, 因此靜脈血可自動脈處得到一些熱量, 而使流回身體的血液變暖。天氣熱時, (右) , 血液由皮膚下層的靜脈流回身體, 因勿須進行熱交換之故。
※注意圖中靜脈的形狀。

因此, 動物體內的逆流交換系統, 使得二種液體間, 以相反的方向流動; 所產生的結果, 促使許多動物能在惡劣的環境下, 仍能舒適地生存, 而繁衍後代。

參考書籍

1. Scientific American Vol. 244 (5) p. 100-106.
2. Introduction to Comparative Physiology, Leon Goldstein p. 505-506, p. 512-513.
3. 科學教育月刊: 42 期, p. 59-61. □