

跑步與能量

教練/導師：黃德誠

跑步與能量

跑步時肌肉能否繼續正常地運動下去，完全要視乎能量的補給是否充足。食物是肌肉活動所需能量的「間接」來源¹，在人體內經過一系列的化學反應後，食物被分解時所釋放的能量，就會被用來製造一種名為三磷酸腺苷（adenosine triphosphate，簡稱 ATP）的高能量化合物，並儲存於肌肉細胞之中，當 ATP 被分解的時候，就能夠提供能量作肌肉活動之用了。

ATP 的結構

ATP 其實是由一個結構非常複雜的腺苷酸（adenosine）部分和三個相對地較為簡單的磷酸鹽（phosphate）小組所構成。當 1 摩爾²（mole）ATP 被分解³的時候，就能夠產生 7 至 12 千卡⁴（kcal）的能量。

人體在作息或運動（如跑步）時所需要的能量，就是來自 ATP。可是，ATP 在肌肉內的儲存量極為有限⁵，人體全身的肌肉內只有 120 至 180



微摩爾⁶（mM）的 ATP，或 1.2 至 1.8 千卡的能量，僅足以維持三數秒的盡最大努力活動（all-out efforts）之用。所以，肌肉活動若要繼續進行下去，就得重新合成 ATP 了。可是，重新合成 ATP 原來也是要用上能量的。人體內就有三個供能系統，可以供應能量作為重新合成 ATP 之用。

供能系統

人體內的三個供能系統，其中兩個可以在沒有氧氣的情況下工作，所以是無氧系統（anaerobic systems）；另一個則要在氧氣充裕的情況下才能正常運作，所以是有氧系統（aerobic system）。

無氧系統

Anaerobic 本身是指沒有氧氣的意思，無氧系統（anaerobic system）亦即是能夠在沒有氧氣的情況下重新合成 ATP 的供能系統。人體內總共有兩個無氧系統，它們分別是三磷酸腺苷－磷酸肌酸系統（ATP-PC system）和乳酸系統（lactic acid system）。

ATP-PC 系統

ATP-PC 系統是一個較為簡單的無氧系統。在人體的肌肉細胞內，其實還儲存著另一種高能量化合物－磷酸肌酸（phosphocreatine，簡稱 PC）。當 PC 被分解⁷的時候，就會釋放出能量，而這些能量就可以用來重新合成 ATP。不過，PC

¹ 食物在人體內分解時所釋放出的能量，並不能直接應用於肌肉活動上，這些能量必須先用來製造一種名為三磷酸腺苷（adenosine triphosphate，簡稱 ATP）的高能量化合物，並儲存於肌肉細胞之中，只有 ATP 被分解時所釋放出的能量，才能直接被應用到肌肉活動當中。

² 1 摩爾（mole）是指某一化合物的重量，主要按組成該化合物的原子類別和數量而定。

³ ATP 被分解時，最末端的一個磷酸鹽（phosphate）分子便會脫離母體（ATP），並同時釋放出能量。

⁴ 1 千卡（kilocalorie，簡稱 kcal）相當於把 1 千克（kg）水升高攝氏 1 度（℃）所需的熱能。

⁵ 根據 Hultman（1967）及 Karlsson（1971），每千克（kg）的肌肉內有 4 至 6 微摩爾（mM）的 ATP，若以每 1 摩爾（mole，等於 1000 微摩爾）ATP 平均可釋放 10 千卡（kcal）能量計算，這相當於 0.04 至 0.06 千卡的能量。假設一個人的體重為 70 千克，則全身的肌肉重量約為 30 千克，所以全身肌肉內 ATP 的儲存量為 120 至 180 微摩爾，亦即相當於 1.2 至 1.8 千卡的能量。

⁶ 1 微摩爾（mM）相等於 1/1000 摩爾（mole）。

⁷ 與 ATP 被分解時的情況相類似，PC 被分解時，最末端的一個磷酸鹽（phosphate）分子便會脫離母體（PC），並同時釋放出能量。

在人體內的儲存量也是極為有限⁸，人體全身的肌肉內只有 450 至 510 微摩爾 PC，或 4.5 至 5.1 千卡的能量，而且要重新合成 PC 的話，原來也是要用上 ATP 被分解時所釋放出來的能量，只不過這過程會在運動後人體處於恢復狀態之下才進行。因此，當 PC 在極高強度肌肉活動（如短跑）中被消耗殆盡時，便要等待運動結束後才可以得到恢復了。

以一個人的體重為 70 千克計算，全身肌肉的重量約為 30 千克，肌肉內 ATP 及 PC 的總存量為 $120 + 450 = 570$ 至 $180 + 510 = 690$ 微摩爾，亦即相當於 5.7 至 6.9 千卡的能量⁹，僅足以維持「不到 10 秒」的盡最大努力活動。由此可見，ATP-PC 系統所能提供的能量極為有限，但它的重要性並不在於所能夠提供能量的多寡，而在於能夠提供即時的能量作肌肉活動之用。因此，對於那些強度大、速度高，並且只需在數秒間完成的活動，如起跑、跳躍、投擲、舉重等，ATP-PC 系統的作用尤為重要。

由於 ATP-PC 系統並不需要把氧氣輸送到肌肉中才能運作，所需的燃料（ATP 及 PC）亦早已儲存於肌肉細胞之中，而且當 PC 被分解時所涉及的化學反應亦較另外兩個供能系統少，所以 ATP-PC 系統是人體內最迅速的能量來源。

乳酸系統

除了 ATP-PC 系統外，人體還可以在沒有氧氣的情況下，借助乳酸系統來產生能量供肌肉活動之用。首先要認識到人會把體內的碳水化合物（carbohydrates）先轉化為葡萄糖（glucose），然後供機體使用，或者以肝醣（liver glycogen）及肌醣（muscle glycogen）的形式，分別儲存於肝及肌肉內。

⁸ 根據 Hultman (1967) 及 Karlsson (1971)，每千克 (kg) 的肌肉內有 15 至 17 微摩爾 (mM) 的 PC，若以每 1 摩爾 (mole) PC 同樣可釋放 10 千卡 (kcal) 能量計算，這相當於 0.15 至 0.17 千卡的能量。假設一個人的體重為 70 千克，則全身的肌肉重量約為 30 千克，所以全身肌肉內 PC 的儲存量為 450 至 510 微摩爾，亦即相當於 4.5 至 5.1 千卡的能量。

⁹ Hultman (1967) 及 Karlsson (1971)。

在沒有氧氣的情況之下，乳酸系統會把這些醣元（以上各種糖類的統稱）分解，產生一種名為乳酸（lactic acid）的代謝產物，並同時釋放出能量。由於醣元未能被完全氧化（oxidized），所以乳酸系統在無氧醣酵解（anaerobic glycolysis）的情況下，產生的能量遠比在氧氣充裕的情況下作有氧醣酵解（aerobic glycolysis）來得少。例如，在無氧的情況下，1 摩爾或 180 克 (g) 醣元理論上可以產生 2 摩爾或 180 克乳酸及 3 摩爾 ATP，但在氧氣充足的情況下，同樣是 1 摩爾的醣元卻可以產生 39 摩爾的 ATP。

不過，由於運動時肌肉及血液只能承擔 60 至 70 克的乳酸，之後機體便會出現疲勞的現象¹⁰，影響正常的肌肉活動，所以在沒有氧氣的情況下，整個乳酸系統實際上只能提供 1 至 1.2 摩爾的 ATP¹¹，即相當於 10 至 12 千卡的能量¹²（約為整個 ATP-PC 系統的 2 倍）。

正如 ATP-PC 系統一樣，乳酸系統可以在沒有氧氣的情況下產生 ATP，不同之處卻是用上了醣元作為燃料，並且在產生 ATP 的同時，亦產生了與疲勞有關的代謝產物—乳酸。雖然乳酸系統所能提供的能量也是非常有限，但其重要性也和 ATP-PC 系統一樣，就是能夠在很短的時間內提供能量作為肌肉活動之用。所以一些需要在 1 至 3 分鐘內完成的大強度活動，如 400 米及 800 米跑，均非常依賴 ATP-PC 系統及乳酸系統來提供能量。

¹⁰ 根據 Sahlin (1978) 及 Trivelpiece 與 Danforth (1966)，當肌肉的乳酸增加時，體液的酸鹼度便越趨下降，因而抑制了一些有助於無氧醣酵解（anaerobic glycolysis）的酵素（enzymes）正常運作，於是亦影響了肌肉的活動能力。

¹¹ 1 摩爾 (mole) 或 180 克 (g) 的醣元 (glycogen) 在無氧醣酵解 (anaerobic glycolysis) 下可產生 180 克乳酸 (lactic acid) 及 3 摩爾 ATP。因此，當只有 60 至 70 克乳酸能夠從醣元在無氧醣酵解下產生時，所能提供的 ATP 便只有 $3 \times 60 \div 180 = 1$ 至 $3 \times 70 \div 180 = 1.2$ 摩爾了。

¹² 若以每 1 摩爾 (mole) ATP 平均可釋放 10 千卡 (kcal) 能量計算，1 至 1.2 摩爾 ATP 便相當於 10 至 12 千卡的能量了。

有氧系統

在氧氣充足的情況下，1 摩爾醣元可以被完全氧化成二氧化碳（CO₂）和水（H₂O），並產生 39 摩爾 ATP¹³，整個步驟要用上 6 摩爾，即 134.4 升（L）的氧氣（O₂）¹⁴。換句話說，在有氧系統運作之下，若以醣元作為燃料，每重新合成 1 摩爾 ATP，人體便要攝取 $134.4 \div 39 = 3.45$ 升的氧氣了。在安靜的時候，這可能要用上 10 至 15 分鐘的時間，但從事劇烈運動的時候，則可能只是 1 分鐘以內的事罷了。

除了醣元之外，有氧系統還可以用脂肪（fats）及蛋白質（proteins）作為燃料來重新合成 ATP。就以棕櫚酸（palmitic acid，一種典型的脂肪酸）為例，1 摩爾的棕櫚酸（約半磅）經氧化後能夠產生 130 摩爾 ATP。不過要完全氧化 1 摩爾的棕櫚酸，人體就要攝取 23 摩爾，即 515.2 升的氧氣¹⁵。這也是說，在有氧系統運作之下，若以脂肪（如棕櫚酸）作為燃料，每重新合成 1 摩爾 ATP，人體便要攝取 $515.2 \div 130 = 3.96$ 升的氧氣。因此，有氧系統若以脂肪作為燃料，要產生同量的 ATP，便要比用醣元作為燃料時消耗多約 15% 的氧氣了。

至於蛋白質方面，一般認為除非身體是處於飢荒、醣元消耗殆盡或非比尋常的耐力項目（如歷時數天的超長距離跑）之中，否則蛋白質對提供能量作為肌肉活動的貢獻只是微不足道。在安靜及大部分的體育活動中，醣元和脂肪仍然是主要提供能量以重新合成 ATP 的燃料。

比較起另外兩個無氧系統來說，有氧系統在 ATP 的總生產量可說是難以估計，因為無論是醣

元、脂肪，甚至是蛋白質均可以用作重新合成 ATP。不過單從醣元方面計算，人體全身有肌醣 390 至 450 克¹⁶，肝醣 80 至 100 克¹⁷，再加上 5 至 6 克的血糖¹⁸，人體內醣元的總存量為 475 至 556 克，共可產生 102.9 至 120.5 摩爾 ATP，即相當於 1029 至 1205 千卡的能量¹⁹。

由於有氧系統能夠在大量合成 ATP 之餘而不會產生導致疲勞的代謝產物，所以是人體處於安靜狀態時供能系統的最佳選擇。此外，對於長時間的耐力性項目（如馬拉松長跑）來說，有氧系統因為能夠用上醣元和脂肪作為燃料，所以亦只有它可以供應充足的能量作這類活動之用²⁰。

安靜時的能量來源

人體處於安靜狀態時，因為心肺系統能夠供應充足的氧氣給肌肉細胞使用，所以能量主要是由有氧系統提供，而且無論是醣元或脂肪，均可以被用作供能的燃料。在安靜的情況下，約有三分之二的能量是來自脂肪的代謝，另外的一則是來自醣元的有氧醣酵解，而蛋白質的貢獻只是微乎其微。

運動時的能量來源

運動的時候，無氧系統和有氧系統均會供應能量作肌肉活動之用，只不過各個供系統的重要

¹⁶ 根據 Hultman (1967)，人體每千克（kg）肌肉內有 13 至 15 克（g）的肌醣。假設一個人的體重為 70 千克，則全身的肌肉重量約為 30 千克，所以肌醣的總量為 $13 \times 30 = 390$ 至 $15 \times 30 = 450$ 克。

¹⁷ Hultman 與 Nilsson (1971)。

¹⁸ 陳吉棣 (1983)。

¹⁹ 475 克醣元可產生 $475 \div 180 \times 39 = 102.9$ 摩爾（mole）ATP，以 1 摩爾 ATP 平均可產生 10 千卡（kcal）能量計算，即相當於 1029 千卡的能量。按同樣的計算原則，556 克醣元可產生 $556 \div 180 \times 39 = 120.5$ 摩爾 ATP，亦即相當於 1205 千卡的能量。

²⁰ 根據 Costill 與 Fox (1969) 及 Fox 與 Costill (1972)，要跑畢一次馬拉松長跑（比賽距離為 42.195 千米或 26.2 英里）可以用上近 150 摩爾（mole）的 ATP（約每分鐘 1 摩爾 ATP）。

¹³ 正如其他兩個無氧系統一樣，一切有關的化學反應均發生在肌肉細胞之內，但有氧系統涉及的化學反應都要比其他兩個系統來得多和複雜，而且都只發生在肌肉細胞的線粒體（mitochondria）之中。

¹⁴ 由於 1 摩爾（mole）的任何氣體在標準溫度及壓力（standard temperature and pressure）之下會佔上了 22.4 升（L）的體積，所以 6 摩爾便相當於 $6 \times 22.4 = 134.4$ 升的氧氣。

¹⁵ 同樣道理，23 摩爾便相當於 $23 \times 22.4 = 515.2$ 升的氧氣了。

性會按個別運動項目的種類、運動員的訓練狀態及膳食等方面而有所差異。原則上大部分的運動項目皆可被歸納為兩個類別：（1）時間短而強度大的運動，和（2）時間長而強度較小的運動。當然，還有其他的一些項目是未能歸入這兩個類別之中。

時間短、強度大項目

一切只可以維持 2 至 3 分鐘的運動項目，如 100 米、200 米、400 米及 800 米跑等，均可被視為時間短而強度大的項目。由於人體的攝氧能力始終是有上限（見表一），就以 100 米跑來說，往往便需求到每分鐘近 8 升的氧氣，單靠有氧系統根本是無法供應足夠能量作這類活動之用。再者，就算人體的攝氧能力可以達到如此的需求，機體仍需要 2 至 3 分鐘的時間，以作出各種有關的生物化學及生理上的調整。因為這類時間短而強度大的項目經常要求到機體在氧氣短缺（oxygen deficit）的情況下提供能量作肌肉活動之用，所以無氧系統（包括 ATP-PC 系統及乳酸系統）是這類項目的主要供能系統。

表一、最大攝氧量比較

最大攝氧量 (每分鐘)	受訓練運動員	一般人
男 (升)	5.0 ²¹	3.2 ²²
女 (升)	3.0 ²³	2.2 ²⁴

對於時間極短而強度非常大的項目而言，ATP-PC 系統是主要的無氧供能系統。雖然 PC 會於很短時間之內下降至非常低的水平，並一直維持於該水平至運動結束為止，不過在運動結束後的數分鐘內，PC 便可以完全恢復。

當乳酸系統逐漸取代 ATP-PC 系統而成為主要的無氧供能系統後，無氧醣酵解的活動迅速活躍起來，隨之而來的也就是同樣急劇的乳酸積

聚，這情況特別以 2 至 10 分鐘內完成的項目為顯著，乳酸的濃度甚至曾記錄得高出正常情況下（10 mg%²⁵）的 20 倍之多²⁶。因此，乳酸濃度也是乳酸系統活躍程度的最佳指標。在 PC 接近衰竭及乳酸濃度不斷提高的情況下，活動亦只得停止下來或改以較低的強度繼續進行。

時間長、強度小項目

任何可以維持較長時間（10 分鐘或以上）的運動項目，都可以被歸納於這個類別之中。有氧系統是這類活動的主要供能系統。20 分鐘以內的運動項目主要以醣元作為燃料，脂肪次之。當運動持續下去（如 1 小時或以上），醣元的儲備明顯下降時，脂肪便會逐漸取而代之成為有氧系統的主要燃料。

對於這類時間長而強度較小的項目來說，ATP-PC 系統及乳酸系統只在運動開始的階段，即機體的攝氧量進入穩定狀態（steady state）之前（通常需要 2 至 3 分鐘），或運動中途及尾段要作加速或最後衝次時，才會起著積極的作用。因此，雖然血液內的乳酸濃度亦可以相當之高，但通常不及乳酸系統主導時般嚴重。

時間較長的項目如馬拉松長跑（一般需要 2.5 小時以上），運動員於比賽完結時血液內乳酸的濃度往往只是安靜時（10 mg%）的 2 至 3 倍²⁷。對於這類運動員來說，導致疲累的原因包括：（1）肝醣耗盡以致血糖濃度下降，（2）肌醣耗盡而出現局部的肌肉疲勞，（3）水分和電解質流失導致體溫上升，及（4）心理上感到沉悶等²⁸。

時間更長的項目如步行、哥爾夫球或日常的勞作等，因為單憑 ATP-PC 系統已足夠應付機體進入穩定狀態前額外的能量需求，所以血液內乳酸的水平一般與安靜時無異，而且疲勞的情況亦得以壓後或甚至不會出現。

²¹ Saltin 與 Astrand（1967）。

²² Fox, Billings, Bartels, Bason 與 Mathews（1972）。

²³ Drinkwater（1973）。

²⁴ Drinkwater, Horvath 與 Wells（1975）。

²⁵ 10 mg%是每 100 毫升（mL）血液內含有 10 毫克（mg）的意思。

²⁶ Robinson（1974）。

²⁷ Costill 與 Fox（1969）。

²⁸ Costill（1974）。

其他項目

除了以上兩個類別的項目外，還有一些運動項目是介乎於兩者之間的，這類項目的特點，就是需要到有氧系統及無氧系統的同時或交替運作。就以 1500 米及 3000 米為例，在活動的加速及衝次階段，無氧系統是主要的供能系統。另一方面，在活動的中段或穩定狀態階段，能量則主要由有氧系統供給。其實，不單止是徑賽項目如此，其他的運動項目如游泳、自行車，甚至是球類活動等，都有類似的情況出現。

供能系統的選擇

其實，供能系統的主導地位，主要是根據運動項目實際進行時的速度和時間而定。運動進行時的速度越高，強度通常也越大，能夠維持的時間亦越短。因為機體沒有足夠的氧氣補給，亦沒有充足的時間過渡至穩定狀態，所以能量只有靠無氧系統供給。速度越高，強度越大，ATP-PC

系統在提供能量上越加重要。當活動的時間持續，PC 接近耗盡的時候，乳酸系統便取而代之成為主導的供能系統。反過來說，耐力性項目或當活動的速度放緩，強度下降，機體得到充分的氧氣補給，並進入穩定狀態後，能量便可以單靠有氧系統來供應。不過當運動的速度或強度再度增加時，無氧系統又會重新投入工作，甚至再次成為主導的供能系統了。

供能系統的鍛煉

既然跑步時肌肉的收縮必須要靠供能系統不斷補充能量才可以維持正常的運作，供能系統的鍛煉當然是不容忽視了。一般來說，中長跑運動員主要用兩種方法來鍛煉其供能系統：（1）持續跑，及（2）間歇跑。

有關持續跑及間歇跑的訓練詳情，請繼續留意講義五內容。



參考資料

- Costill, D. L. (1974). Muscular exhaustion during distance running. *Phys Sportsmed.*, 2(10), 36-41.
- Costill, D. L., and Fox, E. L. (1969). Energetics of marathon running. *Med Sci Sports*, 1, 81-86.
- Drinkwater, B. L. (1973). Physiological responses of women to exercise. In J. L. Wilmore (ed.), *Exercise and Sport Sciences Reviews, Volume 1*. New York: Academic Press, pp. 125-153.
- Drinkwater, B. L., Horvath, S. M., and Wells, C. L. (1975). Aerobic power of females, ages 10 to 68. *J Gerontol.*, 30(4), 385-394.
- Fox, E. L., and Costill, D. L. (1972). Estimated cardiorespiratory responses during marathon running. *Arch Environ Health*, 24, 315-324.
- Fox, E. L., Billings, C. E., Bartels, R. L., Bason, R., and Mathews, D. K. (1972). Fitness standards for male college students. *Int Z Angew Physiol.*, 31, 231-236.
- Fox, E. L., Bowers, R. W., and Foss, M. L. (1993). *The Physiological Basis for Exercise and Sport* (5th ed.). Dubuque, IA: Wm. C. Brown.
- Hultman, E. (1967). Studies on muscle metabolism of glycogen and active phosphate in man with special reference to exercise and diet. *Scand J Clin Lab Invest (Suppl 94)*, 19, 1-63.
- Hultman, E., and Nilsson, L. H. (1971). Liver glycogen in man: Effect of different diet and muscular exercise. In B. Pernow and B. Saltin (eds.), *Muscle Metabolism during Exercise*. New York: Plenum Press.
- Jensen, C. R., and Fisher, A. G. (1979). *Scientific Basis of Athletic Conditioning* (2nd ed.). Philadelphia: Lea & Febiger.
- Karlsson, J. (1971). Lactate and phosphagen concentration in working muscle of man. *Acta Physiol Scand (Suppl)*, 358, 1-72.
- Robinson, S. (1974). Physiology of muscular exercises. In V. B. Mountcastle (ed.), *Medical Physiology* (13th ed.), Volume 2. St. Louis: Mosby, p. 1279.
- Sahlin, K. (1978). Intracellular pH and energy metabolism in skeletal muscle in man. *Acta Physiol Scand (Suppl)*, 455, 1-56.
- Saltin, B., and Astrand, P.-O. (1967). Maximal oxygen uptake in athletes. *Journal of Applied Physiology*, 23, 353-358.
- Sharkey, B. J. (1986). *Coaches Guide to Sport Physiology*. Champaign, IL: Human Kinetics.
- Triveldi, B., and Danforth, W.H. (1966). Effect of pH on kinetics of frog muscle phosphofructokinase. *Journal of Biological Chemistry*, 241, 4110-4112.
- 陳吉棣 (1983): 運動與糖。曲綿域 (主編), *中國醫學百科全書: 運動醫學*。上海: 上海科學技術出版社。