

長時間高強度競技運動奪標的關鍵角色

——肌肉肝醣

林秋騰 南投縣立富功國民小學學務主任

前言

人體中的能量大多是以脂肪型態儲存，一般人只有不到百分之五的能量是以肝醣的方式儲存 (Dodd, Powers, Callender, & Brooks, 1984)。就能量的儲存效率來說，脂肪的單位重量所蘊含之能量是醣類的數倍；但就單位時間產生能量的效率來說，醣類絕對是優於脂肪。肝醣分別儲存於肝臟和肌肉中，儲存於肝臟之肝醣稱之為肝臟肝醣 (liver glycogen) 約佔總肝醣量的1/5，它用來調節血液中的葡萄糖含量；儲存於肌肉之肝醣稱之為肌肉肝醣 (muscle glycogen) 約佔總肝醣量的4/5，它通常是作用肌群能量代謝的直接來源。當肌肉和血液中的醣類耗盡時，將會導致疲勞，無法再持續運動強度 (Harris等, 1976)。

長時間高強度的競技運動中，面對著既要提高運動強度，又怕過早耗竭肝醣，造成疲勞產生的兩難狀況。策略性的調整競賽各階段的強度，以便將剩餘的肌肉肝醣，使用在決賽勝負的衝刺上，是選手們常用的方法。在競賽最後階段，肌肉肝醣的儲量，關係著進行衝刺時間的長短。由此可知肌肉肝醣在長時間高強度的競技運動中，扮演著重要關鍵角色。

運動強度與肌肉肝醣的關係

肌肉肝醣是中、高強度 ($> 70\% \text{VO}_2 \text{ peak}$) 運動的主要能量來源 (Brooks & Mercier, 1994)。Bergstrom, Hermansen, Hultman, 與 Saltin (1967) 發現以70~75% $\text{VO}_2 \text{ max}$ 的強度騎腳踏車，當肝醣的值低於25毫莫耳/公斤濕肌肉重以下時，就無法再維持這種運動強度。其可能的原因是當人體中醣類含量減少時，醣類的能量基質來源減少，此時糖酵解作用進行的速率就會下降，這時肌肉中丙酮酸 (pyruvate) 的濃度也會跟著降低 (Green, 1991)，檸檬酸環 (Citric acid cycle) 的中間產物減少，使得ATP的合成速率降低，因而限制肌肉無法持續進行運動 (Sahlin, Katz, & Broberg, 1990)。亦即人體在運動過程中，逐漸感受到疲勞現象的發生與肌肉肝醣消耗的程度有關，一旦肝醣耗盡，肌肉就很難維持高強度及耐力運動。在競技運動中，尤其是強度較高且時間較長的項目，肌肉肝醣的儲量往往是決定勝負的關鍵。

Brooks等 (1994) 發現在大於2小時的長時間運動後，肌肉中的肝醣儲存量會降到非常低。因此有些選手在運動前或運動中會補

充一些碳水化合物，其主要目的是增加醣類的可利用率，進而延緩醣類的耗竭，藉以提升耐力運動可進行的時間（Karlsson & Saltin, 1971）。在運動前，骨骼肌肉中含有較高的肝醣含量，將更有利於運動中醣解作用的進行（Hargreaves, 2004），如此將有助於提高耐力運動之表現。同時在長時間的運動過程中補充碳水化合物，可維持血糖濃度，增加運動時所需的能量來源，如此就能延緩肝醣的損耗（Jeukendrup等，1999），對提升運動表現有所助益。

運動訓練後的肌肉肝醣恢復及超補現象

運動減少肌肉肝醣的儲量，所損失的肌肉肝醣可透過血糖的運送，進入肌肉細胞再合成。其合成步驟分為兩個階段：第一階段為快速合成階段，此階段不需胰島素參與作用，因而稱之為非胰島素依賴期（insulin-independent phase）。運動時肌肉收縮造成「葡萄糖運輸蛋白」- GLUT4 轉位，它與胰島素造成的GLUT4蛋白轉位的機轉有所不同。運動後肌細胞膜上仍存有大量的GLUT4，它大大的增加了肌細胞膜對於葡萄糖的通透性，使得來自血液的葡萄糖得以大量進入細胞內。

當葡萄糖穿過細胞膜進入肌細胞之後，隨即被六碳糖激酶（hexokinase）磷酸化成為葡萄糖-6-磷酸（glucose-6-phosphate, G6P）G6P濃度增加，進而刺激肝醣合成酵素（glycogen synthase）的活性，幫助肌肉肝醣的儲存。Nielsen等（2001）研究發

現，此時期由於肌肉收縮增加細胞膜對葡萄糖的通透性與胰島素敏感性之提升，因此在這階段肝醣合成的速率，會遠大於肌肉收縮與胰島素作用的影響。這階段肌肉肝醣合成速率以每小時約12-30毫莫耳/公斤濕肌肉重，時間持續約30-60分鐘（Price等，1994）。

第二階段為慢速合成階段，此階段的肝醣合成與肌肉細胞對胰島素敏感度的變化有關。有運動科學學者發現，運動後第二階段的肝醣合成過程，GLUT4基因表現明顯增加，使得肌細胞有更多的GLUT4蛋白可供遷移至細胞膜表面，來運輸葡萄糖以供肝醣合成（Kuo, Hunt, Ding, & Ivy, 1999）。Wojtaszewski等（2000）研究也發現，此階段的肝醣合成與肌肉對胰島素反應的增加有關，因此需要胰島素參與。在運動過程中，肝醣消耗程度愈多愈能使胰島素刺激葡萄糖轉運體（glucose transporter, GLUT4）轉位至細胞膜表面，以利進行葡萄糖運送至細胞內，同時促進骨骼肌肉肝醣含量提升（Kawanaka等，1999）。由此得知，藉由運動訓練可以促使GLUT4蛋白轉位至細胞膜上，提高肌肉肝醣之合成量。

肌肉肝醣的儲量在競賽中如此重要，所以如何藉由調整訓練強度，以提升肌肉肝醣的儲量，便成為各運動教練及選手所亟欲追求之目標。基於此目的，於是各項肌肉肝醣的超補法便應運而生。運動訓練後，將可以使肌肉肝醣合成量超過運動前的儲存量（Bergstrom, Hermansen, Hultman, & Saltin,

1967)，此過程稱為「肝醣超補償」現象（glycogen supercompensation）這研究是各項肌肉肝醣超補法的濫觴。

Ivy（1977）發現在運動之後肌肉組織會有一段長期的肌肉肝醣超補的過程。Neary, Martin, Reid, Burnham, 與 Quinney（1992）也發現在超負荷期後訓練減量（tapering training）有助於肝醣超補。此現象與胰島素作用增強有關，運動後的肌肉可發現其肝醣合成增加（因肝醣合成酶活性增加、葡萄糖攝取增加）（Nielsen等，2001）。一般未受過訓練者每公斤肌肉肝醣含量僅有80-90mmol，而經過訓練的運動員每公斤肌肉肝醣含量增加至大約120-130mmol（Gollnick, 1985）。

運動訓練後的飲食對肌肉肝醣儲存的影響

運動後的碳水化合物膳食補充，無論是在質、量以及時機等因素上，均會對肌肉肝醣的回補，產生截然不同的影響。在運動後攝取碳水化合物，是為了補充在運動過程中，所消耗掉的肝臟或肌肉中的肝醣含量；另一方面，則要提高肌肉肝醣再合成之速度（Burke, Collier, & Hargreaves, 1998），以利迅速恢復體能，保有較佳的體能狀態，方能使身體於能量充足情況之下，應付一連串激烈的運動訓練與比賽。

早期在1970年代發展的馬拉松運動營養增補方式包括：醣類負載法（carbohydrate loading），即進行連續7日高醣飲食；或是

先進行3~4日超負荷訓練輔以低醣飲食，之後再於3~4日進行高醣飲食並減量訓練。到了1980年代，修正版的醣類負載法發現只要3日的高醣飲食配合訓練減量就能達到肌肉肝醣顯著增加的效果（Sherman, Costill, Fink, & Miller, 1981）。最近的研究則發現，運動員在嚴格訓練後停止訓練的連續3日給予含高碳水化合物飲食（按體重10公克／公斤／日），一天內肌肉肝醣即從原來的95毫莫耳／公斤濕肌肉重，增加至180毫莫耳／公斤濕肌肉重，增加率為90%；之後兩天給予同樣高碳水化合物飲食，增加率也與第一天相近似（Bussau, Fairchild, Rao, Steele, & Fournier, 2002）。Fairchild等（2002）也有類似的發現，在單次高強度原地腳踏車運動（130% $\dot{V}O_2$ peak 踩踏150秒加30秒全力踩踏至耗竭）後給予含高碳水化合物飲食（按體重10.3公克／公斤／日），可使肌肉肝醣由109毫莫耳／公斤濕肌肉重增至198毫莫耳／公斤濕肌肉重，增加率為82%。

不同類型的碳水化合物，對體內能量代謝的反應有所不同，因此體內對於各類型碳水化合物的吸收效率也會有所差異。研究發現，攝取高昇糖指數（glycemic index, GI）飲食後，肌肉肝醣合成速率愈快，而且肝醣增加量可超過50%（Burke, Collier, & Hargreaves, 1993）。由此可見，碳水化合物補充的種類也是肌肉肝醣合成的重要因素之一。

Ivy 等（1988）研究認為，運動訓練後兩小時，肌肉肝醣的合成率每小時可達

7-8%。為了提高肌肉肝醣再合成之速率，應於運動後立即補充高碳水化合物飲食，以利肝醣快速合成。在訓練後4-24小時期間，肝醣合成速率就比較不會受到醣類指數高低的影響。Reed等(1989)研究發現，運動後0-4小時這段期間，攝取25克碳水化合物，肝醣合成速率每小時為2%；若攝取50克，肝醣合成速率每小時可達5%。隨後4-24小時期間，碳水化合物攝取增加至100克、125克或225克時，肝醣合成速率也僅維持在5-6%左右，並沒有因碳水化合物攝取量增加，而提高肌肉肝醣合成率。這兩項研究說明了運動後，碳水化合物補充關鍵時機的重要。

結語

高強度的運動，人體的代謝途徑會偏向醣類。但是直接供應能量到作用肌的肌肉肝醣有限，肌肉肝醣耗盡會造成疲勞的結果，進而降低運動強度。在競爭激烈的競賽中，想要儘快抵達終點，就得提高運動強度。當運動強度超過70%VO_{2 peak}時，就會動用到佔人體總能量儲存不到5%的肝醣能量，一旦肝醣耗盡，疲勞就接踵而至。如果想要節省肝醣的消耗，動員人體能量儲存的大倉庫——脂肪，就得降低運動強度，但這又顯得有點緩不濟急。在這強度與肝醣不可兼得的情況下，除了策略性的調整競賽各階段的強度外，平日的加強訓練及善用各項肝醣超補策略，以增加肌肉肝醣的含量，在長時間高強度競技運動能否奪標的諸多條件中，扮演著極關鍵角色。

參考文獻

- Bergstrom, J., Hermansen, L., Hultman, E., & Saltin, B. (1967). Diet, muscle glycogen and physical performance. *Acta Physiol Scand*, 71(2), 140-150.
- Brooks, G. A., & Mercier, J. (1994). Balance of carbohydrate and lipid utilization during exercise: the "crossover" concept. *J Appl Physiol*, 76(6), 2253-2261.
- Burke, L. M., Collier, G. R., & Hargreaves, M. (1993). Muscle glycogen storage after prolonged exercise: effect of the glycemic index of carbohydrate feedings. *J Appl Physiol*, 75(2), 1019-1023.
- Burke, L. M., Collier, G. R., & Hargreaves, M. (1998). *Glycemic index--a new tool in sport nutrition? Int J Sport Nutr*, 8(4), 401-415.
- Bussau, V. A., Fairchild, T. J., Rao, A., Steele, P., & Fournier, P. A. (2002). Carbohydrate loading in human muscle: an improved 1 day protocol. *Eur J Appl Physiol*, 87(3), 290-295.
- Dodd, S., Powers, S. K., Callender,

- T., & Brooks, E. (1984). Blood lactate disappearance at various intensities of recovery exercise. *J Appl Physiol*, 57(5), 1462-1465.
- Fairchild, T. J., Fletcher, S., Steele, P., Goodman, C., Dawson, B., & Fournier, P. A. (2002). Rapid carbohydrate loading after a short bout of near maximal-intensity exercise. *Med Sci Sports Exerc*, 34(6), 980-986.
- Gollnick, P. D. (1985). Metabolism of substrates: energy substrate metabolism during exercise and as modified by training. *Fed Proc*, 44(2), 353-357.
- Green, H. J. (1991). How important is endogenous muscle glycogen to fatigue in prolonged exercise? *Can J Physiol Pharmacol*, 69(2), 290-297.
- Hargreaves, M. (2004). Muscle glycogen and metabolic regulation. *Proc Nutr Soc*, 63(2), 217-220.
- Harris, R. C., Edwards, R. H., Hultman, E., Nordesjo, L. O., Ny Lind, B., & Sahlin, K. (1976). The time course of phosphorylcreatine resynthesis during recovery of the quadriceps muscle in man. *Pflugers Arch*, 367(2), 137-142.
- Ivy, J. L. (1977). Role of insulin during exercise-induced glycogenesis in muscle: effect on cyclic AMP. *Am J Physiol*, 233(6), E509-513.
- Ivy, J. L., Katz, A. L., Cutler, C. L., Sherman, W. M., & Coyle, E. F. (1988). Muscle glycogen synthesis after exercise: effect of time of carbohydrate ingestion. *J Appl Physiol*, 64(4), 1480-1485.
- Jeukendrup, A. E., Wagenmakers, A. J., Stegen, J. H., Gijsen, A. P., Brouns, F., & Saris, W. H. (1999). Carbohydrate ingestion can completely suppress endogenous glucose production during exercise. *Am J Physiol*, 276(4 Pt 1), E672-683.
- Karlsson, J., & Saltin, B. (1971). Diet, muscle glycogen, and endurance performance. *J Appl Physiol*, 31(2), 203-206.
- Kawanaka, K., Han, D. H., Nolte, L. A., Hansen, P. A., Nakatani, A., & Holloszy, J. O. (1999). Decreased insulin-stimulated

- GLUT-4 translocation in glycogen-supercompensated muscles of exercised rats. *Am J Physiol*, 276(5 Pt 1), E907-912.
- Kuo, C. H., Hunt, D. G., Ding, Z., & Ivy, J. L. (1999). Effect of carbohydrate supplementation on postexercise GLUT-4 protein expression in skeletal muscle. *J Appl Physiol*, 87(6), 2290-2295.
- Neary, J. P., Martin, T. P., Reid, D. C., Burnham, R., & Quinney, H. A. (1992). The effects of a reduced exercise duration taper programme on performance and muscle enzymes of endurance cyclists. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 65(1), 30-36.
- Nielsen, J. N., Derave, W., Kristiansen, S., Ralston, E., Ploug, T., & Richter, E. A. (2001). Glycogen synthase localization and activity in rat skeletal muscle is strongly dependent on glycogen content. *J Physiol*, 531(Pt 3), 757-769.
- Price, T. B., Rothman, D. L., Taylor, R., Avison, M. J., Shulman, G. I., & Shulman, R. G. (1994). Human muscle glycogen resynthesis after exercise: insulin-dependent and -independent phases. *J Appl Physiol*, 76(1), 104-111.
- Reed, M. J., Brozinick, J. T., Jr., Lee, M. C., & Ivy, J. L. (1989). Muscle glycogen storage postexercise: effect of mode of carbohydrate administration. *J Appl Physiol*, 66(2), 720-726.
- Sahlin, K., Katz, A., & Broberg, S. (1990). Tricarboxylic acid cycle intermediates in human muscle during prolonged exercise. *Am J Physiol*, 259(5 Pt 1), C834-841.
- Sherman, W. M., Costill, D. L., Fink, W. J., & Miller, J. M. (1981). Effect of exercise-diet manipulation on muscle glycogen and its subsequent utilization during performance. *Int J Sports Med*, 2(2), 114-118.
- Wojtaszewski, J. F., Hansen, B. F., Gade, Kiens, B., Markuns, J. F., Goodyear, L. J., et al. (2000). Insulin signaling and insulin sensitivity after exercise in human skeletal muscle. *Diabetes*, 49(3), 325-33