

運動期間能量來源之性別差異

張振崗 / 國立台灣體育學院

摘要

運動中能量代謝存在著顯著的性別差異，本文根據已發表的研究文獻，分析此差異，並探討造成此差異的可能原因。在同樣的相對運動強度下，女性的呼吸交換率較男性為低，利用較多比例的脂肪，較少比例的醣類和蛋白質做為能量來源。造成此性別差異的可能原因包括體內肝醣存量、女性荷爾蒙對醣類代謝的影響、男女性脂肪細胞腎上腺受體的活化程度、肌肉細胞內參與脂肪代謝之酵素活性等。

關鍵詞：性別差異，運動代謝，醣類，蛋白質，脂肪

主要聯絡人：張振崗 嘉義縣朴子市朴子三路6號（國立台灣體育學院）

Tel：(05) 3621241-320 Email：wspahn@seed.net.tw

壹、前言

女性參與日常生活與競技性運動的人數在近30年來快速增加，但大多數運動生理學的相關研究仍以男性為主要對象。由於先天的差異，以及荷爾蒙的影響，使得女性在運動時的生理反應與男性略有不同，也使得許多以男性為對象的研究結果，並不一定可以完全適用於女性。本文將根據已發表的文獻，分析男女性在運動期間能量來源的差異，並探討造成此性別差異的可能原因。

貳、運動期間能量來源之性別差異

許多利用間接熱量測量法（indirect calorimetry）的研究顯示，在同樣的相對運動強度下（以 $\% \dot{V} O_{2\max}$ 表示），女性的呼吸交換率（respiratory exchange ratio, RER）較男性為低（表一），顯示女性在同樣的相對運動強度下，較男性利用較多的脂肪，較少的醣類做為運動中的能量來源，具有較佳的保存醣類的能力。

Tarnopolsky 以綜合分析（meta-analysis）的方法，綜合多個探討運動期間能量代謝之性別差異的研究，包含103名女性和104名男性，運動強度從35至90% $\dot{V} O_{2\max}$ ，運動時間從60至120分鐘，計算出在運動期間女性使用較高比例

的脂肪 ($43 \pm 9\%$ vs $29 \pm 8\%$)，與較低比例的醣類 ($55 \pm 10\%$ vs $65 \pm 9\%$) 和蛋白質 ($2 \pm 2\%$ vs $6 \pm 3\%$) (Tarnopolsky, 2000a)。

表一、男女性運動期間呼吸交換率之比較

受測者	訓練情形	運動方式與強度 (% $\dot{V}O_{2max}$)	運動時間 (分)	平均 RER	參考文獻
F=12 M=12	ET	跑步機, 70	60	F=0.835 M=0.848	(Costill 等, 1979)
F=8 M=8	UT	腳踏車, 80	20	F=0.990 M=0.970	(Favier 等, 1983)
F=6 M=7	A	腳踏車, 80	至力竭	F=0.973 M=0.993*	(Froberg & Pedersen, 1984)
F=6 M=7	A	腳踏車, 90	至力竭	F=0.970 M=1.005	(Froberg & Pedersen, 1984)
F=6 M=6	A	跑步機, 35	90	F=0.805 M=0.848*	(Blatchford 等, 1985)
F=6 M=6	ET	跑步機, ~65	90-101 (15.5 km)	F=0.876 M=0.940*	(Tarnopolsky 等, 1990)
F=6 M=6	ET	腳踏車, 65	90	F=0.820 M=0.853*	(Phillips 等, 1993)
F=8 M=8	ET	腳踏車, 65	90	F=0.893 M=0.918*	(Tarnopolsky 等, 1997)
F=13 M=14	UT+ET	腳踏車, 40	120	F=0.84 M=0.86*	(Horton 等, 1998)
F=17 M=19	UT→ET	腳踏車, 45 和 65	60	F=0.885 M=0.932*	(Friedlander 等, 1998)
F=6 M=6	UT→ET	腳踏車, 65	90	F=0.889 M=0.914*	(McKenzie 等, 2000)
F=6 M=5	UT→ET	腳踏車, 60	90	F=0.893 M=0.945*	(Tarnopolsky, 2000a)
F=8 M=8	UT→ET	腳踏車, 60	90	F=0.847 M=0.900*	(Tarnopolsky, 2000a)

F：女性；M：男性；UT：未受訓練者 (untrained)；ET：耐力訓練者 (endurance trained)；A：規律活動者 (active)；* 顯著性別差異。

參、能量代謝性別差異之可能機轉

一、醣類代謝

造成女性在同樣的相對強度運動中使用較低比例的醣類做為能量來源之可能原因包括體內肝醣存量，以及參與醣類代謝之酵素或輸送蛋白（transporter）的活性。

數個以肌肉穿刺法（muscle biopsy）採樣的研究結果顯示，外廣肌（vastus lateralis）中休息時肝醣含量並沒有性別差異（Nicklas 等, 1989；Tarnopolsky 等, 1990；Tarnopolsky 等, 1995），但在跑步機跑 15.5 km 之後，女性外廣肌中肝醣的消耗量較男性為低（Tarnopolsky 等, 1990）。

動物實驗顯示，17- β -雌二醇（17- β -estradiol）可能是造成運動期間能量利用之性別差異的主要原因之一，雄大鼠（Kendrick & Ellis, 1991；Rooney 等, 1993）或卵巢切除的母大鼠（Kendrick, Steffen, Rumsey, & Goldberg, 1987）注射 17- β -雌二醇後，在耐力型運動後，肌肉和肝臟中肝醣的消耗量均顯著降低。Carter, McKenzie, Mourtzakis, Mahoney, and Tarnopolsky (2001a) 以 8 位男性受測者為對象，口服 17- β -estradiol（3 mg/d）8 天後，發現運動期間血液中葡萄糖出現速率（rate of appearance, Ra）和消失速率（rate of disappearance, Rd）均較服用前為低，而甘油的 Ra/Rd 與 RER 則無顯著改變。結合以上的研究結果，女性在運動期間所產生的肝醣保留的效果可能同時出現於肝臟與運動中的肌肉。

二、脂肪代謝

Nagy 等（1996）以間接熱量測量法大規模的分析白種成年人（男性 421 人，女性 293 人）休息時的能量來源，發現女性的脂肪氧化速率較男性為低，即使將耗氧峰值（ $\dot{V}O_{2peak}$ ）、無脂體重和甲狀腺素 T4 的濃度等可能影響因子列入考慮，女性的脂肪氧化速率仍較男性為低。

Carter, Rennie, and Tarnopolsky（2001b）以無規律運動者為研究對象，以同位素標定之甘油和葡萄糖探討以 60% $\dot{V}O_{2peak}$ 於固定式腳踏車運動 90 分鐘期間，脂肪和醣類代謝的性別差異，結果顯示女性甘油 Ra 和 Rd 均較男性為高，葡萄糖 Ra 和 Rd 則均較男性為低，經過 7 週的耐力訓練後，此性別差異仍然存在。脂肪代謝速率的性別差異包括以下原因：

（一）腎上腺素作用

運動中脂肪分解可能會受到腎上腺素和副腎上腺素的刺激，這兩個荷爾蒙可能來自於腎上腺或交感神經系統。在以 80% 乳酸閾值運動 90 分鐘，同時以靜脈注射葡萄糖來維持血糖濃度的情況下，男性血液中腎上腺素、副腎上腺素和胰胜肽 (pancreatic polypeptide) 的濃度顯著高於女性，但女性血液中甘油、 β -羥基丁酸 (β -hydroxybutyrate) 和游離脂肪酸的濃度卻較男性為高，同時女性葡萄糖氧化速率也低於男性 (Davis, Galassetti, Wasserman, & Tate, 2000)，顯示雖然在運動期間男性交感神經系統活性較高，但是女性脂肪分解的速率仍然高於男性。其他的研究也顯示，運動中男性血液中腎上腺素和副腎上腺素的濃度較女性為高 (Arner 等, 1990; Hellstrom 等, 1996; Horton 等, 1998)。

雖然在運動中男性具有較高的腎上腺素和副腎上腺素濃度，但脂肪代謝率卻較女性為低，這可能是肇因於受體 (receptor) 活性的性別差異。使用微透析 (microdialysis) 以及選擇性的腎上腺素受體抑制劑的研究顯示，女性在運動中活化脂肪細胞的腎上腺素 β -受體 (負責刺激脂肪分解)，而男性在運動中則同時活化脂肪細胞的腎上腺素 α -受體 (負責抑制脂肪分解) 和 β -受體，導致女性血液中甘油和游離脂肪酸的濃度幾乎是男性的 2 倍 (Hellstrom 等, 1996)。以穿刺法取出的受過規律耐力訓練者的脂肪細胞為對象的體外 (in vitro) 研究顯示，受到腎上腺素的刺激後，女性脂肪細胞中的 β -受體活化的程度顯著高於男性，同時女性脂肪細胞中的 α -受體活性顯著降低，男性脂肪細胞中 α -受體活性則無顯著改變 (Crampes, Riviere, Beauville, Marceron, & Garrigues, 1989)。

(二) 肌肉中脂肪含量與代謝酵素活性

肌肉細胞中脂肪的含量，以及參與脂肪代謝的酵素和其他分子的數量和活性也可能會影響脂肪代謝速率，肌肉中這些成分的性別差異整理於表二。女性 Type I 纖維的比例高於男性 (Simoneau & Bouchard, 1989; Steffensen 等, 2002)，可能是造成女性利用較高比例的脂肪做為能量來源的原因之一。女性肌細胞內三酸甘油酯明顯高於男性，以 60% $\dot{V}O_{2max}$ 在固定式腳踏車運動 90 分鐘後，女性外廣肌細胞內三酸甘油酯較運動前降低 25%，男性則無顯著改變 (Steffensen 等, 2002)。同一組研究人員以受過耐力訓練者為研究對象，以 58% $\dot{V}O_{2max}$ 在固定式腳踏車運動 90 分鐘，女性肌細胞內三酸甘油酯所提供的熱量佔運動中總消耗熱量的 25.0%，遠高於男性的 5.0%，而 RER、游離脂肪酸、血糖和肝醣所佔的能量比例則無性別差異，顯示男性在運動中可能利用其他的脂肪來源，包括血液中的極低密度脂蛋白 (very low density lipoprotein, VLDL) 和肌纖維之間的脂肪 (Roepstorff 等, 2002)。

表二、肌肉中脂肪代謝相關物質含量之性別差異

肌肉成分	採樣位置	訓練情形	結果	參考文獻
Type I/Type II 纖維面積	外廣肌	A	女性>男性	(Simoneau & Bouchard, 1989)
Type I 纖維數量、面積	外廣肌	UT+ET	女性>男性	(Steffensen 等, 2002)
肌肉內三酸甘油酯	外廣肌	UT	女性>男性	(Forsberg 等, 1991)
肌肉內三酸甘油酯	外廣肌	UT+ET	女性>男性	(Tarnopolsky 等, 1995)
肌細胞內三酸甘油酯	外廣肌	UT+ET	女性>男性	(Steffensen 等, 2002)
肉鹼醯基轉移酶	腓腸肌 (gastrocnemius)	ET	女性<男性	(Costill 等, 1979)
肉鹼醯基轉移酶	外廣肌粒腺體	UT+ET	女性=男性	(Berthon 等, 1998)
琥珀酸脫氫酶	腓腸肌 (gastrocnemius)	ET	女性<男性	(Costill 等, 1979)
琥珀酸脫氫酶	外廣肌	A	女性<男性	(Green 等, 1984)

F：女性；M：男性；UT：未受訓練者 (untrained)；ET：耐力訓練者 (endurance trained)；A：規律活動者 (active)

脂肪醯 - 輔酶 A (fatty acyl-CoA) 透過醯基 - 肉鹼 / 肉鹼轉運體 (acy-carnitine/carnitine transporter) (由肉鹼醯基轉移酶 carnitine acyltransferase I 所催化) 從細胞質送入粒腺體中代謝，琥珀酸脫氫酶 (succinate dehydrogenase) 是檸檬酸循環 (citric acid cycle) 中的酵素之一，3-羥基醯-輔酶 A 脫氫酶 (3-hydroxyacyl CoA dehydrogenase) 則是 β -氧化作用 (β -oxidation) 中的一個酵素。女性 3-羥基醯-輔酶 A 脫氫酶與琥珀酸脫氫酶活性的比值較男性為高，顯示女性 β -氧化相對於檸檬酸循環活性的比例可能較男性為高 (Green 等, 1984)，但是此比例對運動中脂肪代謝的影響仍不清楚。

三、蛋白質代謝

Phillips, Atkinson, Tarnopolsky, and MacDougall (1993) 以同位素標記的白胺酸估計蛋白質代謝，發現在同樣的相對強度運動下，女性利用蛋白質做為能量的比例低於男性。McKenzie 等 (2000) 比較 38 天耐力訓練前後，以 $60\% \dot{V} O_{2peak}$ 運動 90 分鐘期間，白胺酸氧化的性別差異，女性在訓練前後之休息時與運動中

白胺酸氧化速率均顯著低於男性，在訓練前男女性運動期間的白胺酸氧化速率都約為休息時的 2 倍，但在訓練後男女性運動期間的白胺酸氧化速率則都與休息時無顯著差異。

肆、結論與建議

大多數的研究顯示，在相同的相對運動強度之下，女性較男性理用較高比例的脂肪，與較低比例的醣類和蛋白質做為能量的來源，造成了女性在非常長時間的運動項目（90 公里或以上的長跑）的表現可能優於男性（Bam 等, 1997；Speechly 等, 1996）。目前對於造成運動中能量代謝的性別差異之機轉仍有許多不了解的地方，未來的研究方向應包括肌肉、肝臟與脂肪細胞代謝脂肪、醣類與蛋白質的能力，肌肉細胞中荷爾蒙敏感脂解酶的調控，以同位素追蹤脂肪、醣類與蛋白質的代謝，以及荷爾蒙與訊息傳遞（signal transduction）對能量代謝的影響等（Tarnopolsky, 2000b；Tate & Holtz, 1998）。

引用文獻

- Arner, P., Kriegholm, E., Engfeldt, P., & Bolinder, J. (1990). Adrenergic regulation of lipolysis in situ at rest and during exercise. *Journal of Clinical Investigation*, 85, 893-898.
- Bam, J., Noakes, T. D., Juritz, J., & Dennis, S. C. (1997). Could women outrun men in ultramarathon races? *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 29, 244-247.
- Berthon, P. M., Howlett, R. A., Heigenhauser, G. J., & Spriet, L. L. (1998). Human skeletal muscle carnitine palmitoyltransferase I activity determined in isolated intact mitochondria. *Journal of Applied Physiology*, 85, 148-153.
- Blatchford, F. K., Knowlton, R. G., & Schneider, D. A. (1985). Plasma FFA responses to prolonged walking in untrained men and women. *European Journal of Applied Physiology & Occupational Physiology*, 53, 343-347.
- Carter, S., McKenzie, S., Mourtzakis, M., Mahoney, D. J., & Tarnopolsky, M. A. (2001a). Short-term 17beta-estradiol decreases glucose R(a) but not whole body metabolism during endurance exercise. *Journal of Applied Physiology*, 90, 139-146.

- Carter, S. L., Rennie, C., & Tarnopolsky, M. A. (2001b). Substrate utilization during endurance exercise in men and women after endurance training. *American Journal of Physiology Endocrinology & Metabolism*, 280, E898-907.
- Costill, D. L., Fink, W. J., Getchell, L. H., Ivy, J. L., & Witzmann, F. A. (1979). Lipid metabolism in skeletal muscle of endurance-trained males and females. *Journal of Applied Physiology: Respiratory, Environmental & Exercise Physiology*, 47, 787-791.
- Crampes, F., Riviere, D., Beauville, M., Marceron, M., & Garrigues, M. (1989). Lipolytic response of adipocytes to epinephrine in sedentary and exercise-trained subjects: sex-related differences. *European Journal of Applied Physiology & Occupational Physiology*, 59, 249-255.
- Davis, S. N., Galassetti, P., Wasserman, D. H., & Tate, D. (2000). Effects of gender on neuroendocrine and metabolic counterregulatory responses to exercise in normal man. *Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism*, 85, 224-230.
- Favier, R., Pequignot, J. M., Desplanches, D., Mayet, M. H., Lacour, J. R., Peyrin, L., et al. (1983). Catecholamines and metabolic responses to submaximal exercise in untrained men and women. *European Journal of Applied Physiology & Occupational Physiology*, 50, 393-403.
- Forsberg, A. M., Nilsson, E., Werneman, J., Bergstrom, J., & Hultman, E. (1991). Muscle composition in relation to age and sex. *Clinical Science*, 81, 249-256.
- Friedlander, A. L., Casazza, G. A., Horning, M. A., Huie, M. J., Piacentini, M. F., Trimmer, J. K., et al. (1998). Training-induced alterations of carbohydrate metabolism in women: women respond differently from men. *Journal of Applied Physiology*, 85, 1175-1186.
- Froberg, K., & Pedersen, P. K. (1984). Sex differences in endurance capacity and metabolic response to prolonged, heavy exercise. *European Journal of Applied Physiology & Occupational Physiology*, 52, 446-450.
- Green, H. J., Fraser, I. G., & Ranney, D. A. (1984). Male and female differences in enzyme activities of energy metabolism in vastus lateralis muscle. *Journal of the Neurological Sciences*, 65, 323-331.
- Hellstrom, L., Blaak, E., & Hagstrom-Toft, E. (1996). Gender differences in adrenergic regulation of lipid mobilization during exercise. *International Journal of Sports Medicine*, 17, 439-447.
- Horton, T. J., Pagliassotti, M. J., Hobbs, K., & Hill, J. O. (1998). Fuel metabolism in

- men and women during and after long-duration exercise. *Journal of Applied Physiology*, 85, 1823-1832.
- Kendrick, Z. V., & Ellis, G. S. (1991). Effect of estradiol on tissue glycogen metabolism and lipid availability in exercised male rats. *Journal of Applied Physiology*, 71, 1694-1699.
- Kendrick, Z. V., Steffen, C. A., Rumsey, W. L., & Goldberg, D. I. (1987). Effect of estradiol on tissue glycogen metabolism in exercised oophorectomized rats. *Journal of Applied Physiology*, 63, 492-496.
- McKenzie, S., Phillips, S. M., Carter, S. L., Lowther, S., Gibala, M. J., & Tarnopolsky, M. A. (2000). Endurance exercise training attenuates leucine oxidation and BCOAD activation during exercise in humans. *American Journal of Physiology Endocrinology & Metabolism*, 278, E580-587.
- Nagy, T. R., Goran, M. I., Weinsier, R. L., Toth, M. J., Schutz, Y., & Poehlman, E. T. (1996). Determinants of basal fat oxidation in healthy Caucasians. *Journal of Applied Physiology*, 80, 1743-1748.
- Nicklas, B. J., Hackney, A. C., & Sharp, R. L. (1989). The menstrual cycle and exercise: performance, muscle glycogen, and substrate responses. *International Journal of Sports Medicine*, 10, 264-269.
- Phillips, S. M., Atkinson, S. A., Tarnopolsky, M. A., & MacDougall, J. D. (1993). Gender differences in leucine kinetics and nitrogen balance in endurance athletes. *Journal of Applied Physiology*, 75, 2134-2141.
- Roepstorff, C., Steffensen, C. H., Madsen, M., Stallknecht, B., Kanstrup, I. L., Richter, E. A., et al. (2002). Gender differences in substrate utilization during submaximal exercise in endurance-trained subjects. *American Journal of Physiology Endocrinology & Metabolism*, 282, E435-447.
- Rooney, T. P., Kendrick, Z. V., Carlson, J., Ellis, G. S., Matakovich, B., Lorusso, S. M., et al. (1993). Effect of estradiol on the temporal pattern of exercise-induced tissue glycogen depletion in male rats. *Journal of Applied Physiology*, 75, 1502-1506.
- Simoneau, J. A., & Bouchard, C. (1989). Human variation in skeletal muscle fiber-type proportion and enzyme activities. *American Journal of Physiology*, 257, E567-572.
- Speechly, D. P., Taylor, S. R., & Rogers, G. G. (1996). Differences in ultra-endurance exercise in performance-matched male and female runners. *Medicine &*

Science in Sports & Exercise, 28, 359-365.

Steffensen, C. H., Roepstorff, C., Madsen, M., & Kiens, B. (2002). Myocellular triacylglycerol breakdown in females but not in males during exercise.

American Journal of Physiology Endocrinology & Metabolism, 282, E634-642.

Tarnopolsky, L. J., MacDougall, J. D., Atkinson, S. A., Tarnopolsky, M. A., & Sutton, J. R. (1990). Gender differences in substrate for endurance exercise. *Journal of Applied Physiology*, 68, 302-308.

Tarnopolsky, M. A. (2000a). Gender differences in metabolism; nutrition and supplements. *Journal of Science & Medicine in Sport*, 3, 287-298.

Tarnopolsky, M. A. (2000b). Gender differences in substrate metabolism during endurance exercise. *Canadian Journal of Applied Physiology*, 25, 312-327.

Tarnopolsky, M. A., Atkinson, S. A., Phillips, S. M., & MacDougall, J. D. (1995). Carbohydrate loading and metabolism during exercise in men and women. *Journal of Applied Physiology*, 78, 1360-1368.

Tarnopolsky, M. A., Bosman, M., Macdonald, J. R., Vandeputte, D., Martin, J., & Roy, B. D. (1997). Postexercise protein-carbohydrate and carbohydrate supplements increase muscle glycogen in men and women. *Journal of Applied Physiology*, 83, 1877-1883.

Tate, C. A., & Holtz, R. W. (1998). Gender and fat metabolism during exercise: a review. *Canadian Journal of Applied Physiology*, 23, 570-582.