

運動後不同升糖指數碳水化合物補充 對人體骨骼肌葡萄糖轉運子影響

程一雄¹ 廖淑芬² 巫錦霖³ 李寧遠⁴

¹中台科技大學食品科學系 ²彰化基督教醫院復健科

³國立台灣體育學院運動健康學系 ⁴輔仁大學食品營養系

葡萄糖轉運子 4 號(glucose transporter 4, GLUT4)為人體骨骼肌肉葡萄糖利用重要因子之一，文獻顯示老鼠及人體骨骼肌肉 GLUT4 mRNA 及蛋白質表現量受到運動或碳水化合物補充影響。這次實驗目的想要了解單一運動後立即補充不同升糖指數(glycemic index, GI)碳水化合物對骨骼肌肉 GLUT4 蛋白質表現的影響。24 名受試者(年齡 21.30 ±1.46 歲，身高 173.10±5.33 公分，體重 70.21±7.34 公斤，相對攝氧量峰值 43.65±10.58 毫升/公斤/分鐘)，單一次 75%最大攝氧量峰值腳踏車運動 60 分鐘後，隨機分成 3 組，分別給予禁食、高 GI 碳水化合物及低 GI 碳水化合物三種不同試驗處理(禁食組、高 GI 組、低 GI 組)。運動剛結束及運動後 3 小時各進行一次肌肉穿刺取得肌肉樣本，以西方墨點法(Western Blotting)定量葡萄糖轉運子蛋白質表現，運動剛結束至 3 小時內，每 30 分鐘收集血液樣本後，測定血液葡萄糖及胰島素的濃度。結果顯示高 GI 碳水化合物補充組胰島素曲線下面積(insulin area under curve, IAUC)大於低 GI 碳水化合物補充組($p<.05$)，運動後 3 小時高 GI 組 GLUT4 蛋白質表現顯著高於低 GI 組及禁食組($p<.05$)。這次研究結果主要發現，運動後恢復期補充高 GI 碳水化合物飲食能增加胰島素的分泌，並促進 GLUT4 蛋白質表現。

關鍵詞：肌肉穿刺，西方點墨法

壹、緒論

骨骼肌肉葡萄糖的運送需依賴葡萄糖轉運子由細胞膜外運送至細胞內，肌肉細胞膜上葡萄糖轉運子的型式主要是 GLUT4，由肌肉收縮以及胰島素的刺激調控(Goodyear, Hirshman, Smith, & Horton, 1991; Hirshman, Goodyear, Wardzala, Horton, & Horton, 1990)。動物實驗指出老鼠在運動後禁食處理，似乎有向上調節 GLUT4 mRNA 的趨勢，而且在葡萄糖足夠利用下，可有效提升 GLUT4 蛋白質的表現量(Kuo, Browning, & Ivy, 1999; Kuo, Hunt, Ding, & Ivy, 1999)。人體實驗顯示男性受試者完成 2 小時的腳踏車運動後，給予每公斤體重 2 克的碳水化合物飲食，肌肉中的肝醣在運動後 6 小時明顯增加，且肝醣的儲存速率與肌肉中 GLUT4 的濃度成正相關($r=0.63$)，與動物實驗的結果類似(McCoy, Proieto, & Hargreaves, 1996)。有文獻認為運動後碳水化合物補充不只提供骨骼

肌合成肝醣的原料，也會刺激胰島素分泌增加，使葡萄糖轉運蛋白作用時間延長，或刺激更多轉運蛋白從不同儲存囊泡中釋出(Jentjens & Jeukendrup, 2003; Williams, 2004)。

碳水化合物升糖指數(glycemic index, GI)是影響運動後胰島素濃度差異重要因子。耐力運動後 24 小時恢復期，給予高升糖指數(high glycemic index, HGI)或低升糖指數(low glycemic index, LGI)碳水化合物食物，發現不同 GI 碳水化合物影響耐力運動後 24 小時內肌肉肝醣合成量(Burk, Collier, & Hargreaves, 1998)。碳水化合物的攝取與體內胰島素分泌有關，而且胰島素是 GLUT4 蛋白質表現調控因子之一，目前較少有文獻直接探討運動後 GI 碳水化合物飲食對人體骨骼肌肉 GLUT4 表現的影響。筆者先前研究顯示運動後碳水化合物補充向下調節 GLUT4 mRNA 的表現(Cheng et al., 2005)，這次研究目的想了解單一中高強度運動後，立即補充不同升糖指數碳水化合物混合飲食，對人體骨骼肌肉 GLUT4 蛋白質表現量的影響。

貳、方法

一、受試對象

共 24 名受試者參與這次試驗，平均年齡 21.3 ± 1.46 歲，身高 173.1 ± 5.33 公分，體重 70.21 ± 7.34 公斤，攝氧量峰值 43.65 ± 10.58 毫升/公斤/分鐘(表一)，平時有運動習慣，不是正在接受運動訓練的運動選手，無心血管疾病史。在正式實驗前先測定每位受試者之最大攝氧量，若於試驗中有任何不適，則隨時暫停試驗，且不再接受正式實驗。每位受試者在進行研究之前，告知實驗相關步驟及注意事項，受試者同意後填寫受試者同意書。本研究由彰化基督教醫院人體試驗委員會審核通過進行人體試驗(CCH-92-02-03)。

表一 受試者基本資料

組別	年齡 (歲)	身高 (公分)	體重 (公斤)	相對攝氧量峰值 (毫升/分鐘/公斤)
24 名受試者	21.30 ± 1.46	173.10 ± 5.33	70.21 ± 7.34	43.65 ± 10.58
8 名受試者運動後 HGI 補充	21.63 ± 1.51	175.92 ± 5.43	72.38 ± 6.05	45.07 ± 13.79
8 名受試者運動後 LGI 補充	21.38 ± 1.06	172.58 ± 6.24	70.13 ± 7.16	40.69 ± 7.46
8 名受試者運動後禁食	20.67 ± 1.97	170.50 ± 3.16	66.35 ± 7.75	44.55 ± 11.00
p value	p= .216	p= .316	p= .273	p= .646

註：以平均值 \pm 標準差表示。

二、實驗設計

分三組，每組 8 人，共 24 人。運動後不同試驗處理，包括運動後禁食組、HGI 組(運動後補充每公斤體重 2 克碳水化合物之高 GI 碳水化合物飲食)、LGI 組(運動後補充每公斤體重 2 克碳水化合物之低 GI 碳水化合物飲食)。HGI 碳水化合物飲食內容物平均克數：玉米片 (62.2 ± 3.0 克)、低脂鮮奶 (253.3 ± 9.2 克)、白吐司 (83.2 ± 6.4 克)、草莓果醬 (20.9 ± 1.3 克)、運動飲料 (130.2 ± 7.3 克)、水 (579.0 ± 14.5 克)。LGI 碳水化

合物飲食內容平均克數：無添加糖穀類（ 68.1 ± 3.5 克）、低脂鮮奶（ 301.6 ± 10.7 克）、水蜜桃罐頭（ 280.5 ± 12.3 克）、蘋果（ 160.6 ± 8.8 克）、蘋果汁（ 301.6 ± 12.4 克）(Wu, Nicholas, Williams, Took, & Hardy, 2003)。受試者在進行試驗前三天，維持正常作息，避免激烈運動，避免飲食不正常，並要求受試者避免飲用咖啡、酒及抽菸。試驗前一晚受試者禁食 12 小時，早晨 8:00 至實驗室，安靜休息 5 分鐘後進行 60 分鐘 75% $\dot{V}O_2$ peak 腳踏車耐力運動。運動結束後馬上進行第一次肌肉穿刺及上手臂抽血。三種試驗隨機分配，15 分鐘內食用完畢，飲食補充後 3 小時進行第二次肌肉穿刺，飲食補充後 3 小時內每 30 分鐘上手臂抽血一次，分析血液中葡萄糖及胰島素。肌肉穿刺樣本清除血液，將肌肉組織以液態氮冷凍，萃取肌肉中的總蛋白質，以西方點墨法(Western Blotting)進行分析。

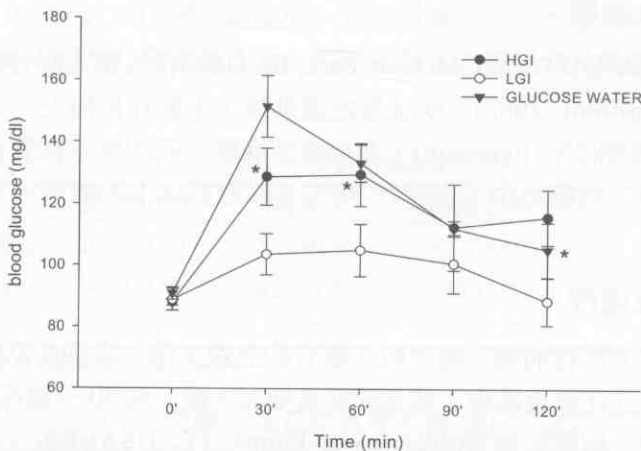
三、實驗食物之 GI 值

傳統測試 GI 值之方法為給予含可獲得 50 克醣類之食物與 50 克標準食物之血糖反應曲線下面積(incremental area under curve, IAUC)相除而得，而本實驗給予每公斤體重 2 克碳水化合物之混合飲食，根據 Wolever et al.(1991)發表混合碳水化合物的公式，分別算出混合碳水化合物中，各種碳水化合物的比例及該碳水化合物的 GI 值(GIa, GIb, GIc, GI_d; Wa, Wb, Wc, Wd)，假設混合碳水化合物總重量為 T，則該 GI 值的算法如下，該混合碳水化合物：

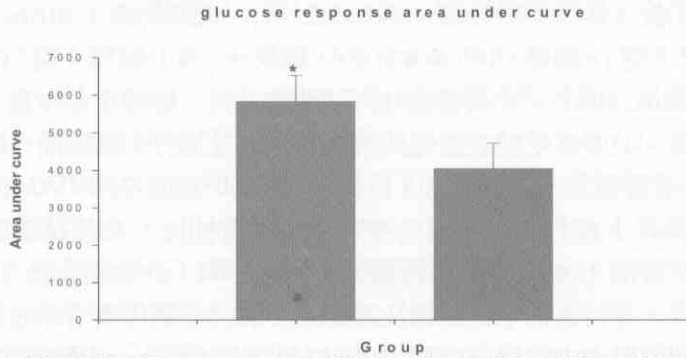
$$GI = (W_a/T) \times GI_a + (W_b/T) \times GI_b + (W_c/T) \times GI_c + (W_d/T) \times GI_d$$

依此公式得出 HGI 混合飲食之 GI 值為 76.6，LGI 混合飲食之 GI 值為 38.3，但因本實驗為補充每公斤體重 2 克碳水化合物飲食，又受試者個體因素及樣本數的影響因素，因此先行測試 2 種飲食之 GI 值是否可分出差異。

測試實驗採用 GI 食物之血糖反應試驗，受試者 6 名，隔夜空腹 12 小時後，於早上 8 點進行測試，採空腹血液後，分別給予 HGI、LGI 或葡萄糖水（每公斤體重 2 克糖類），於 15 分鐘內將食物食用完畢，於食用完畢後每 30 分鐘採血一次，直至 2 小時，三種處理測試間隔一星期，結果圖一、圖二。



圖一 測試實驗食物 HGI、LGI 飲食及葡萄糖水分別補充後 2 小時血糖反應，n=6，*** 表示 HGI 組與 LGI 組之間有顯著差異，* $p < .05$ 。



圖二 測試實驗食物 HGI、LGI 飲食分別補充後 2 小時內血糖反應曲線下面積 (area under curve, AUC), $n=6$, “*”表示 HGI 組與 LGI 組之間有顯著差異, $*p<.05$ 。

受試者攝取 GI 飲食之血糖反應如圖一，在攝取後 30 分鐘、60 分鐘及 120 分鐘後，HGI 飲食組血糖值明顯高於 LGI 飲食組($p<.05$)，經計算後 HGI 飲食組的 AUC 明顯高於 LGI 飲食組($p<.05$) (圖二)。結果顯示 HGI 與 LGI 之 AUC 達到統計上的顯著差異，表示此兩種食物的 GI 值具有明顯的不同，此兩種不同 GI 碳水化合物混合飲食適用於這次試驗。

四、攝氧量峰值($\dot{V}O_2$ peak)測量及運動強度設定

受試者被要求執行腳踏車運動(Mornark 834E, Vansbro, Sweden)，並戴上集氧式面罩及可攜式氣體分析儀 MetaMax3B(Cortex Biophysik, Nonnenstrasse, Leipzig, Germany)，受試者維持腳踏車轉速每分鐘 60 轉，運動 0-4 分鐘，腳踏車功率為 30 瓦特(Watt)，每 2 分鐘腳踏車功率增加 30 瓦特，直至受試者攝氧量達到穩定，且在腳踏車功率增加的情況下，相對最大攝氧量增加小於 $2\text{ml kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ 。當受試者氣體交換率大於 1.10，此時受試者之攝氧量為攝氧量峰值(L min^{-1})，當以每分鐘每公斤體重多少毫升表示時，可稱為相對攝氧量峰值($\text{ml kg}^{-1}\text{min}^{-1}$)，將所得知攝氧量峰值出現時間對應腳踏車功率，再乘以 75%即為受試者進行 60 分鐘腳踏車時的運動強度。

五、肌肉穿刺及處理

以 14 號肌肉穿刺針(Temno, McGaw Park, IL, USA)在人體大腿骨外側肌進行穿刺，取得肌肉樣本(Bergström, 1962)，受試者在運動後，坐躺在長椅上，先在大腿骨外側肌注入 1-2 毫升麻醉劑(2% lignocain)，進行局部麻醉。肌肉樣本採到後，去血和結締組織清洗，並儘速置入液態氮中，儲存在 -80°C ，萃取肌肉中的總蛋白質，以西方點墨法進行分析。

六、血液採集及處理

留置針置放於上手臂前端，每次取 5 毫升的血液，第一次採血點為運動剛結束，未進食前馬上採血，並在飲食處理(禁食或飲食補充)後，每 30 分鐘採血一次，直至 180 分鐘。每次採血時，留置針導管(20G Jelco, Tampa, FL, USA)注入少許含抗凝劑的生理食鹽水(10IU ml^{-1})，血液樣本收集至含 fluoride heparin 的採血管及血清管，血液以 1000 xg

離心 10 分鐘，取上清液並儲存在 -80°C ，供血液分析。以自動葡萄糖氧化法(YSI Life Sciences, Yellow Springs, OH, USA)分析血糖濃度，免疫分析法分析胰島素(Baylor Diagnostics, Tarrytown, NY, USA)濃度。

七、葡萄糖轉運子蛋白質分析

以西方點墨法進行分析，從受試者身上以肌肉穿刺取出骨骼肌秤重後，以肌肉重量微克的 19 倍為 HES 溶液(20 mM Hepes, 1 mM EDTA, 250 mM Sucrose, 0.5% Triton X 100)加入的體積，將肌肉作 20 倍稀釋，並使用均質棒(Glas-col, USA)將肌肉均勻勻漿後，用 14,000 rpm 高速離心以去除結締組織，取上清液，分裝 50 μl 一管，儲存於 -80°C 冰箱。

取 10 μl 樣本做 12 %的硫酸十二酯鈉-聚丙烯醯胺凝膠電泳法(SDS - polyacrylamide electrophoresis)後，半乾式轉漬組合(Semi-dry transfer unit, Bio-Rad)轉漬蛋白質至 NC paper 膜上(Nitrocellulose paper, Pall Corporation)，並用 10%的脫脂奶粉平衡 NC paper 膜上的電位， 4°C overnight。隔天使用 GLUT-4 一級抗體(1 : 250, Chemicon)及 GLUT4 抗體之二級抗體(1 : 2000, Jackson Immuno Research)分別各染 1 小時，中間以 TTBS 清洗 10 分鐘，使用冷光螢光數位分析系統進行分析(Image Gauge V3.46, Fujifilm)。

八、統計方法

以 t-test 比較受試者運動後 0 小時與 3 小時肌肉樣本 GLUT4 蛋白質表現的差異，並應用單因子變異數分析前測試實驗受試者血糖反應，和正式實驗運動後 0 小時至 3 小時每 30 分鐘，運動後高升糖指數、低升糖指數碳水化合物補充和運動後禁食血液生化值比較，所有結果以 $\text{mean} \pm \text{SE}$ 表示，以 $\alpha = .05$ 為達顯著水準。

參、結果

受試者共三組，包括運動後禁食組、運動後 HGI 補充組及運動後 LGI 補充組，每組 8 人，每組平均年齡、身高、體重及絕對、相對攝氧量峰值($\text{Spec}\dot{V}\text{O}_2 \text{ peak}$)見受試者基本資料表(表一)，三組間皆無顯著差異($p > .05$)。

運動後 HGI 補充及 LGI 補充兩組間，食物營養成分及熱量攝取如表二所示。三大營養素包括蛋白質、脂質及醣類攝取量，兩組組間三大營養素及熱量攝取未達統計上之顯著差異($p > .05$)。

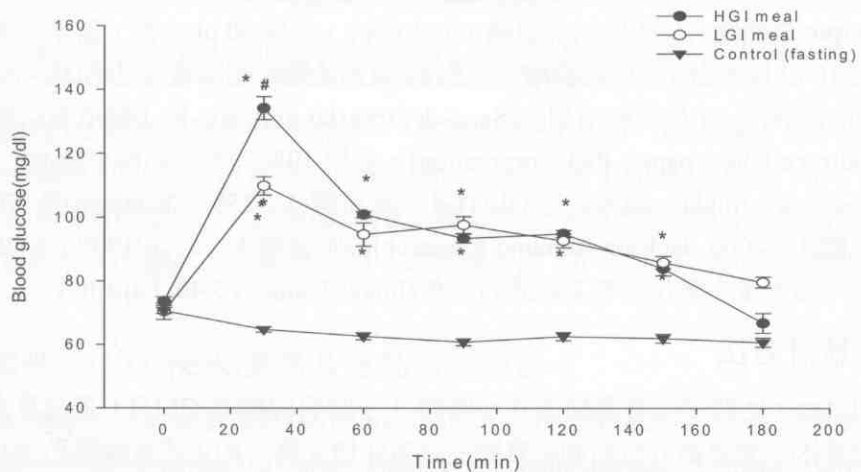
表二、營養素攝取量

組別	蛋白質(克)	脂肪(克)	碳水化合物(克)	能量(千卡)
運動後 HGI 補充	20.71 \pm 1.70	5.71 \pm 0.49	147.14 \pm 12.50	722.57 \pm 61.22
運動後 LGI 補充	19.75 \pm 1.91	6.25 \pm 0.71	140.38 \pm 14.29	695.38 \pm 71.04
p value	p= .79	p= .38	p= .75	p= .73

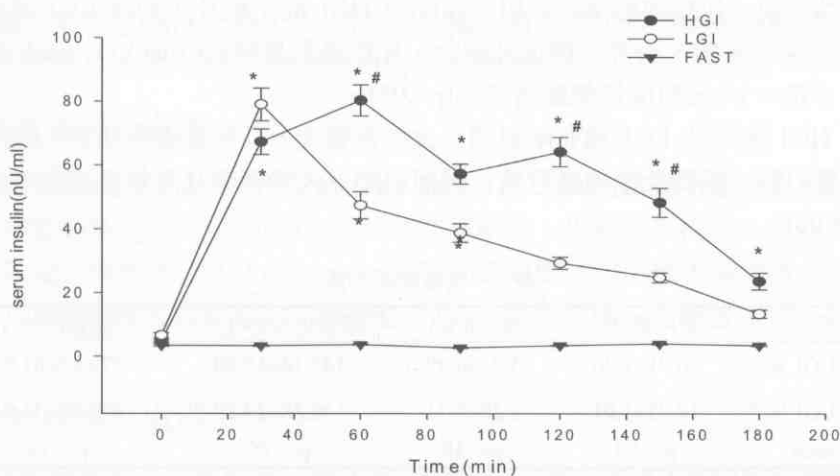
註：以平均值 \pm 標準差表示 (N=8)。

運動後碳水化合物補充，血糖反應在飲食補充後 30 分鐘達到高點，且三組間有顯著差異，HGI 組最高，LGI 組次高，禁食組最低。運動結束飲食補充後 60 分鐘，HGI 組與 LGI 組已沒有顯著差異，但運動結束 30-150 分鐘，運動後不論 HGI、LGI 碳水化

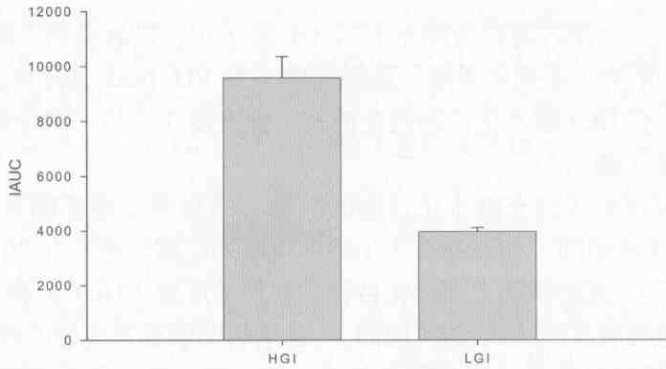
合物補充組皆仍明顯高於運動結束禁食組，只是至運動後 180 分鐘時，三組的血糖反應已無顯著差異（圖三）。運動結束碳水化合物補充後胰島素濃度，HGI 組胰島素濃度在 60、120 及 150 分鐘時明顯高於 LGI 組，不論高或低升糖指數碳水化合物，補充後 30 分鐘至 180 分鐘胰島素反應皆明顯高於禁食組，達顯著差異（圖四）。另外計算胰島素曲線下面積，結果發現 HGI 組的 IAUC 明顯高於 LGI 組，約為 LGI 的 2.4 倍($p<.05$)（圖五）。



圖三 運動結束飲食處理後，各組間血糖濃度反應。HGI 為運動後補充高升糖指數碳水化合物組，LGI 為運動後補充低升糖指數碳水化合物組，Control 為運動後禁食組。“*”表示與 Control 組比較有顯著差異， $p<.05$ ，“#”表示 HGI 組與 LGI 組之間有顯著差異， $\#p<.05$ ，數值以平均值 \pm 標準誤表示。

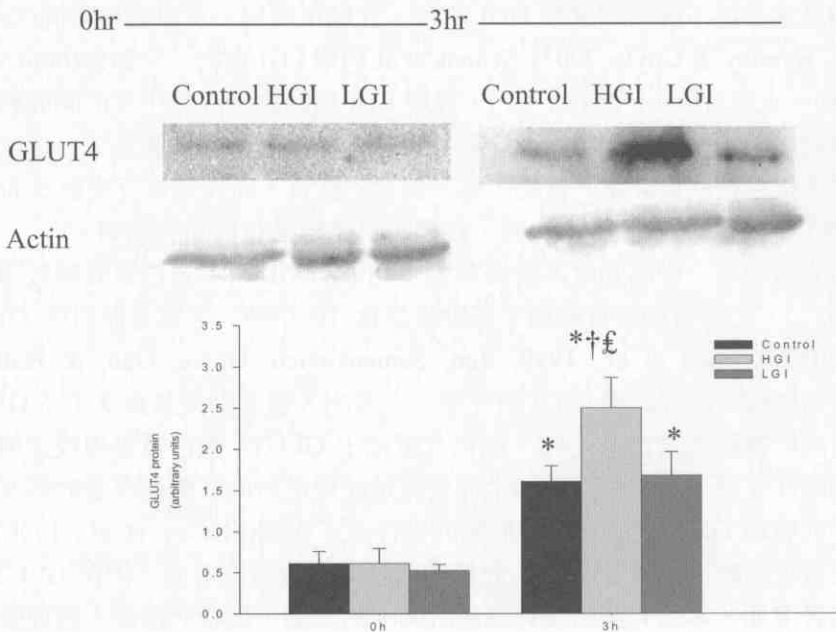


圖四 運動結束飲食處理後，各組間胰島素濃度反應，HGI 為運動後補充高升糖指數碳水化合物組，LGI 為運動後補充低升糖指數碳水化合物組，Control 為運動後禁食組。“*”表示與 Control 組比較有顯著差異， $p<.05$ ，“#”表示 HGI 組與 LGI 組之間有顯著差異， $\#p<.05$ ，數值以平均值 \pm 標準誤表示。



圖五 運動結束碳水化合物補充後，胰島素反應曲線下面積(Insulin area under curve, IAUC)。HGI 為運動後補充高升糖指數碳水化合物組，LGI 為運動後補充低升糖指數碳水化合物組，表示 HGI 組與 LGI 組之間有顯著差異， $p < .05$ ，數值以平均值 \pm 標準誤表示。

運動剛結束時之 GLUT4 蛋白質，低 GI 碳水化合物組低於其他兩組，但是三組間 GLUT4 蛋白質表現並無顯著性差異。運動結束後 3 小時，不論是運動後禁食或碳水化合物補充，GLUT4 蛋白質表現量皆高於運動後 0 小時，且達顯著差異，而三組間，GLUT4 蛋白質表現量以運動後 HGI 補充組最高，顯著高於運動後 LGI 補充及運動後禁食組，運動後 LGI 補充與運動後禁食組 GLUT4 蛋白質表現量無明顯差異（圖六）。



圖六 運動結束及運動結束飲食補充後 3 小時 GLUT4 蛋白質之表現。HGI 為運動後補充高升糖指數碳水化合物組，LGI 為運動後補充低升糖指數碳水化合物組，Control 為運動後禁食組，“Actin”是 house keep gene，在此當作 Internal Standard，說明加入電泳蛋白質量的一致性。“*”表示各組 0h 與 3h 之間有顯著差異，“£”表示運動後運動後 HGI 碳水化合物組與運動後禁食組之間有顯著差異，“†”表示 HGI 與 LGI 之間有顯著差異， $p < .05$ ，數值以平均值 \pm 標準誤表示。

肆、討論

這次研究是第一次探討運動後補充不同 GI 碳水化合物飲食對人體骨骼肌 GLUT4 蛋白質表現影響的研究，研究結果顯示運動強度 75% $\dot{V}O_2$ peak 腳踏車運動 60 分鐘後，給予每公斤體重 2 克 HGI 碳水化合物飲食補充，補充後 3 小時人體骨骼肌肉 GLUT4 蛋白質表現較 LGI 高（圖六）。

這次試驗發現運動後補充碳水化合物的血糖及胰島素反應都顯著高於運動後禁食組。而 HGI 及 LGI 兩組間，在運動後 3 小時恢復期的血糖反應只在 30 分鐘的高峰期時有顯著差異（圖三）。運動後補充碳水化合物組胰島素反應，HGI 組胰島素反應在 60、120 及 150 分鐘時顯著高於 LGI 組（圖四），且兩組間胰島素反應曲線下面積也有顯著差異（圖五）。雖然胰島素的分泌有顯著差異，但血糖反應不是很明顯，這次研究前試驗使用不同的 GI 碳水化合物攝取後，血糖反應結果顯示這次試驗的 GI 飲食是可接受的（圖一、圖二），至於這次研究結果，在運動後補充不同 GI 碳水化合物後，血糖反應不明顯主要原因除了個體差異(Wolever et al., 1999)的影響外，可能是人體單一運動對身體某些荷爾蒙的影響，我們重複安靜不同 GI 飲食及運動後不同 GI 飲食攝取，發現一個有趣的現象，安靜不同 GI 飲食後，血糖反應具顯著性差異，反而運動後不同 GI 飲食攝取後，血糖反應並不容易有顯著性差異，我們對此一現象感到驚訝且非常有興趣，已經規劃後續研究驗證這一現象。

運動後立即碳水化合物補充，補充後 3 小時內 LGI 組血中胰島素濃度高點較 HGI 組早出現，且胰島素分泌下降的速度較 HGI 組快，此結果與另一文獻結果相同(Schenk, Davidson, Zderic, Byerley, & Coyle, 2003)。Schenk et al.利用 LGI 食物—全穀類(bran cereal, BC) 及 HGI 食物—玉米片(corn flakes, CF)，發現 LGI 組胰島素高點出現的時間較 HGI 組早，可能是食物成分中蛋白質和碳水化合物交互作用，是影響身體胰島素分泌的主要因素。本研究碳水化合物飲食非單一食物，為一混合的飲食，而胰島素反應與 Schenk et al.的研究 HGI 與 LGI 的胰島素濃度相比較，我們的研究結果有相同的趨勢。

這次人體研究發現單一中高強度運動後禁食 3 小時，GLUT4 蛋白質表現較運動剛結束時增加（圖六），之前有動物實驗顯示運動後禁食 16 小時，老鼠骨骼肌肉 GLUT4 蛋白質表現增加(Kuo, Hunt et al., 1999; Ren, Semenkovich, Gulve, Gao, & Holloszy, 1994)。相較於動物實驗的研究結果，這次研究第一次提出人體運動後禁食 3 小時 GLUT4 蛋白質表現顯著高於運動後禁食 0 小時。動物文獻指出 GLUT4 蛋白質表現快速增加是對運動的早期適應性反應，而這個反應的生理意義是能促進肌肉肝醣儲存量的再回補，另有人體實驗中則發現 GLUT4 的含量與肝醣的儲存成正相關(McCoy et al., 1996)。本次人體實驗結果發現運動後禁食 3 小時，血液中胰島素濃度並未增加，但在 GLUT4 蛋白質表現就已顯著增加，本研究雖然沒有測量肌肉中的肝醣，但我們推測人體運動後 3 小時 GLUT4 蛋白質增加，使得肌肉具備較高肝醣儲存的能力。

這次研究發現 GLUT4 蛋白質總表現量增加，而這個增加的刺激是由運動而來，運動後禁食 3 小時增加的 GLUT4 蛋白質明顯較運動後 0 小時高。這次研究我們雖然無法判斷 GLUT4 蛋白質在細胞膜上及在細胞內增加的比例，但 GLUT4 蛋白質總表現量增

加，應利於 GLUT4 蛋白質轉位到細胞膜促進葡萄糖運送的速率。

有文獻指出運動會引起肌肉細胞膜對於胰島素敏感性增加，會促進葡萄糖吸收及肝醣合成的進行，但此時胰島素的濃度正常(Price et al., 1994)，因運動而引起肌肉中胰島素敏感性增加是慢速期肝醣合成的主要原因。這次結果發現，運動後禁食 0-3 小時胰島素的濃度沒有明顯變化，而 GLUT4 蛋白質在運動後禁食 3 小時顯著增加，GLUT4 蛋白質表現增加的部分原因源自運動時的肌肉收縮外，另一部分應與胰島素作用增加有關。所以我們也想知道，在運動後恢復期，可使胰島素濃度提升的碳水化合物補充相較於運動後禁食，GLUT4 蛋白質表現的情況。

這次研究主要探討運動後給予不同 GI 碳水化合物對人體骨骼肌 GLUT4 蛋白質表現之影響，主要發現有二，其一是首次發現人體運動後 HGI 碳水化合物飲食補充，補充後 3 小時人體骨骼肌肉內 GLUT4 蛋白質表現較 LGI 組高(圖六)。另一是人體在運動強度 75%VO₂ peak 腳踏車運動 60 分鐘後給予每公斤體重 2 克 LGI 碳水化合物飲食補充，補充後 3 小時人體骨骼肌肉內 GLUT4 蛋白質表現並未較運動後禁食組高(圖六)。

先前關於人體運動後不同 GI 碳水化合物補充文獻，著重在促進肝醣合成的效果，較少有研究觀察骨骼肌肉 GLUT4 蛋白質表現。Kiens, Raben, and Valeur(1990)在運動後立即補充 HGI 及 LGI 食物，發現運動後 6 小時 HGI 組的肝醣合成量顯著高於 LGI 組。我們好奇的是，HGI 組肝醣合成量的增加與胰島素引起的 GLUT4 蛋白質表現是否有關？運動後碳水化合物補充除了提供肝醣合成所需的原料外，也使胰島素分泌增加，可增加 GLUT4 蛋白質表現，不同 GI 的碳水化合物引起胰島素的分泌量不同，胰島素的存在可調節更多的 GLUT4 從不同的儲存囊泡中釋放(Jentjens & Jeukendrup, 2003)。這次試驗結果發現運動後 HGI 飲食補充，GLUT4 蛋白質表現較 LGI 高，而 HGI 也引起較高的胰島素反應，推測胰島素分泌可能會影響肌肉 GLUT4 蛋白質的表現量，但不是唯一的因素，因為運動後 LGI 碳水化合物補充後 3 小時 GLUT4 蛋白質表現並未較運動後禁食組高。

筆者先前研究發現中強度運動後 3 小時，GLTU4 mRNA 的表現會因碳水化合物補充而向下調節(Cheng et al., 2005)，推測此時 GLUT4 mRNA 轉釋的活性增加，蛋白質表現應會增加。根據筆者先前關於 GLUT4 mRNA 的研究與這次蛋白質實驗的結果，我們發現運動後禁食 0-3 小時 GLUT4 mRNA 增加 14%，GLUT4 蛋白質增加 128%，而運動後 HGI 碳水化合物補充，補充後 0-3 小時，GLUT4 mRNA 減少 47%，GLUT4 蛋白質增加 298%。這次人體實驗結果同意先前學者動物實驗的推論，運動後補充碳水化合物，胰島素分泌對於 GLUT4 蛋白質是調節的角色而非刺激物(Kuo, Hunt et al., 1999b)，人體運動後碳水化合物補充，胰島素的作用對於 GLUT4 蛋白質表現也應是調節的角色而非刺激物。運動後補充 HGI 和 LGI 碳水化合物，發現身體胰島素分泌影響骨骼肌肉 GLUT4 蛋白質表現量，至於是否有胰島素劑量依賴的現象，未來還需要更進一步的研究證實。

致謝：

本研究感謝國科會經費(NSC94-2413-H-030-009)補助，與輔仁大學食營所蔡明娟協助實驗執行、中台科技大學林一郎教授在西方點墨法技術指導、彰化基督教醫院醫檢部鄭敏琳技術協助。

參考文獻

- Bergström, J. (1962). Muscle electrolytes in man. *Scand J Clin Lab Invest Suppl*, 68, 1-100.
- Burke, L. M., Collier, G. R., & Hargreaves, M. (1998). Glycemic index: A new tool in sport nutrition? *Int J Sport Nutr*, 8, 401-415.
- Cheng, I. S., Lee, N. Y., Liu, K. L., Liao, S. F., Huang, C. H., & Kuo, C. H. (2005). Effect of postexercise carbohydrate supplementation on glucose uptake-associated gene expression in human skeletal muscle. *J Nutr Biochem*, 16, 267-271.
- Goodyear, L. J., Hirshman, M. F., Smith, R. J., & Horton, E. S. (1991). Glucose transport number, activity, and isoform content in plasma membranes of red and white skeletal muscle. *Am J Physiol*, 261, E556-E561.
- Hirshman, M. F., Goodyear, L. J., Wardzala, L. J., Horton, E. D., & Horton, E. S. (1990). Identification of an intracellular pool of glucose transporters from basal and insulin-stimulated rat skeletal muscle. *J Bio Chem*, 265, 987-991.
- Jentjens, R., & Jeukendrup, A. (2003). Determinants of post-exercise glycogen synthesis during short-term recovery. *Sports Med*, 33, 117-144.
- Kiens, B., Raben, B., & Valeur, A. K. (1990). Benefit of dietary simple carbohydrate on the early postexercise muscle glycogen repletion in male athletes. *Med Sci Sports Exerc*, 22, S88.
- Kuo, C. H., Browning, K. S., & Ivy, J. L. (1999). Regulation of GLUT4 protein expression and glycogen storage after prolonged exercise. *Acta Physiol Scand*, 165, 193-201.
- Kuo, C. H., Hunt, D. G., Ding, Z., & Ivy, J. L. (1999). Effect of carbohydrate supplementation on post exercise GLUT4 protein expression in skeletal muscle. *J Appl Physiol*, 87, 2290-2295.
- McCoy, M., Proieto, J., & Hargreaves, M. (1996). Skeletal muscle GLUT-4 and postexercise muscle glycogen storage in humans. *J Appl Physiol*, 80, 411-415.
- 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, 104-111.
- Ren, J. M., Semenkovich, C. F., Gulve, E. A., Gao, J., & Holloszy, J. O. (1994). Exercise induces rapid increases in GLUT4 expression, glucose transport capacity, and insulin stimulated glycogen storage in muscle. *J Biol Chem*, 269, 14396-14401.
- Schenk, S., Davidson, C. J., Zderic, T. W., Byerley, L. O., & Coyle, E. F. (2003). Different glycemic indexes of breakfast cereals are not due to glucose entry into blood but to glucose removal by tissue. *Am J Clin Nutr*, 78, 742-748.
- Williams, C. (2004). Carbohydrate intake and recovery from exercise. *Science & Sports*, 19, 239-244.
- Wolever, T. M., Hamad, S., Chiasson, J. L., Josse, R. G., Leiter, L. A., Rodger, N. W., Ross, S.

A., & Ryan, E. A. (1999). Day-to-day consistency in amount and source of carbohydrate associated with improved blood glucose control in type 1 diabetes. *J Am Coll Nutr*, 18, 242-247.

Wu, C. L., Nicholas, C., Williams, C., Took, A., & Hardy, L. (2003). The influence of high-carbohydrate meals with different glycaemic indices on substrate utilization during subsequent exercise. *Br J Nutr*, 90, 1049-1056.

The Effects of Different GIs Carbohydrate Supplementations on GLUT4 Protein Expression in Post-Exercise Human Skeletal Muscle

I-shiung Cheng¹, Su-fen Liao², Chin-lin Wu³, & Ning-yuean Lee⁴

¹ Department of Food Science, Central Taiwan University of Sciences and Technology,

² Department of Physical Medicine and Rehabilitation, Changhua Christian Hospital,

³ Department of Exercise and Health Science, National College of Physical Education,

& ⁴ Graduate Institute of Nutrition and Food Sciences, Fu Jen Catholic University

ABSTRACT

Glucose transporter subtype 4 (GLUT4) is an important factor for glucose uptake in human skeletal muscle. The mRNA and protein level of GLUT4 can be regulated with exercise or carbohydrate supplementation in rat and human skeletal muscles. This study investigated the effect of different glycemic index (GI) carbohydrate supplementations after a bout of exercise on GLUT4 protein expression in human skeletal muscle. Twenty-four subjects (age 21.30 ± 1.46 yrs, height 173.10 ± 5.33 cm, weight 70.21 ± 7.34 kg, $\dot{V}O_2$ peak 43.65 ± 10.58 ml/kg/min) were asked to take a single bout of cycle ergometer at 75% peak oxygen consumption for 60 minutes. The subjects were randomly assigned to one of the three treatment groups after exercise: fasting, high GI carbohydrate (HGI) supplement or low GI carbohydrate (LGI) supplement. Biopsies were performed on the deep portion of the vastus lateralis muscle of all the subjects immediately after exercise and 3 hours after the carbohydrate ingestion. The protein expressions of GLUT4 were shown quantitatively with the Western Blotting technique. The blood samples were collected immediately after the exercise and every 30 minutes thereafter, up to 3 hours. The blood samples were collected for glucose and insulin analyses. Insulin AUC was significantly higher in the HGI group than in the LGI group ($p < .05$). The GLUT4 protein content in the HGI group significantly increased above the LGI group and the fasting trial ($p < .05$). The results of this study found that the HGI carbohydrate supplement after exercise can enhance GLUT4 protein expression and increase insulin secretion during the recovery period.

Key words: muscle biopsy, Western Blotting