

跑步熱身運動結合血流限制對生理反應與運動表現的影響

陳昀宗¹、徐孟達¹、謝耀毅¹、林正常^{2*}

摘要

目的：探討跑步熱身運動結合血流限制（running exercise combined with blood flow restriction, RE-BFR）對生理反應與運動表現的影響。**方法：**12名大專男性運動員，以平衡次序分配至兩種實驗處理：一、跑步熱身運動（50%保留心跳率，2分鐘×5組，組間休息1分鐘）結合血流限制處理（RE-BFR；大腿加壓148.7 mmHg；1.3倍收縮血壓）；二、跑步熱身運動無血流限制處理（RE）。**結果：**RE-BFR處理後，心跳率（73.1% vs. 49.2% HRR, $p < .05$ ）與運動自覺量表值（15.9 vs. 10.5, $p < .05$ ）在運動後時間點，皆顯著高於RE處理。RE-BFR處理後，血乳酸濃度顯著高於RE處理（6.2 vs. 1.6 mmol/L, $p < .05$ ）。此外，RE-BFR處理後，爆發力、肌耐力表現與RE處理比較，皆無顯著差異（ $p > .05$ ）。**結論：**RE-BFR處理後，誘發人體心跳率、運動自覺量表值增加、血乳酸累積，對隨後之爆發力與肌耐力表現無正面幫助。

關鍵詞：心跳率、血乳酸、爆發力、肌耐力

Effects of Running Exercise Combined with Blood Flow Restriction on Physiological Responses and Subsequent Sports Performance

Yun-Tsung Chen¹, Mong-Da Hsu¹, Yao-Yi Hsieh¹, Jung-Charng Lin^{2*}

Abstract

Purpose: This study investigated the effects of running exercise combined with blood flow restriction (RE-BFR) on physiological responses and sports performance in male athletes. **Methods:** Twelve college athletes participated and received two treatments by a counter-balanced order: 1. running exercise (50% HRR, 2 min × 5 sets, 1 min rest interval; heart rate reserve, HRR) with BFR (occlusion pressure: 1.3 × resting SBP; 148.7 mmHg) treatment (RE-BFR), or 2. running exercise (50% HRR) only treatment (RE). **Results:** RE-BFR elicited significantly greater increases in heart rate (73.1% vs. 49.2% HRR, $p < .05$) and RPE (15.9 vs. 10.5, $p < .05$) than RE immediately after exercise. RE-BFR elicited significant higher in blood lactate (6.2 vs. 1.6 mmol/L, $p < .05$) than RE. Moreover, there were no significant differences ($p > .05$) on power and endurance performance between the treatments. **Conclusion:** RE-BFR results in increases in heart rate, RPE and blood lactate responses, without any beneficial effects on power and endurance performance.

Keywords: heart rate, blood lactate, power, muscle endurance

Submitted for publication: 2016.2; Accepted for publication: 2016.10

1 國立臺灣師範大學體育學系；Department of Physical Education, National Taiwan Normal University

2 中國文化大學運動教練研究所；Graduate Institute of Sport Coaching Science, Chinese Culture University

* Corresponding author: 林正常 E-mail: normalin@ms34.hinet.net

壹、問題背景

阻力或走路運動結合血流限制 (blood flow restriction, BFR) 是利用加壓帶固定於上、下肢段所進行的運動。有別於傳統的高強度阻力運動，低強度阻力／走路運動結合血流限制，不僅運動後產生的代謝壓力，如骨骼肌的磷酸肌酸 (phosphocreatine) 與 pH 值下降，皆與高強度運動無顯著差異，更能減少骨骼肌受傷的風險，降低運動後發炎指標提升，如 C-反應蛋白 (C-reactive protein)、肌紅蛋白 (myoglobin) 與肌酸激酶 (creatine kinase)，亦適合運動員與非運動員使用 (Abe, Kearns, & Sato, 2006; Clark et al., 2011; Suga et al., 2010; Takarada et al., 2000)。

近年的研究顯示，走路／阻力運動結合血流限制，所產生的血乳酸堆積、靜脈血二氧化碳分壓提升、肌肉組織氧飽和度與血液 pH 值下降等代謝壓力，有助於輸入神經元 III 與 IV 去敏感化，提升神經驅力 (neural drive) 與運動單位招募，進而促進肌肉活化、減少疲勞知覺 (Abe et al., 2006; Takarada et al., 2000; Yasuda et al., 2010)。例如，James and Karabulut (2013) 的研究發現，走路運動 (4.8 公里／小時，10-20 分鐘) 結合血流限制 (約 160-190 mmHg)，可顯著提升年輕男性股外側肌的肌肉活化程度。此外，走路或阻力運動結合血流限制，皆可提升運動中的心跳率，進而增加血管內壁的剪力 (shear stress)，有助於動脈血管內皮細胞釋放一氧化氮 (nitric oxide)，並且誘發血管舒張 (vasodilatation)，提升氧氣的運輸 (Abe et al., 2006; Anderson, 2000; Loenneke, Wilson, & Wilson, 2010; Takano et al., 2005)。然而運動結合血流限制，誘發骨骼肌的預先活化與作用肌群的血管舒張，是否有助於隨後之運動表現提升，並視為一種熱身的手段，相關的研究仍不充足。

反觀跑步熱身運動是一般人與運動員常見的熱身方式，對於田徑的徑賽選手而言，其運動特殊性一致，如 100 公尺、400 公尺

徑賽等，更被視為日常訓練與運動競賽前，不可或缺的熱身方式。例如先前的綜評性研究建議，熱身強度 40%-70% 最大攝氧量或保留心跳率 (heart rate reserve, HRR)、持續 5-10 分鐘，接著休息 5 分鐘進行恢復，有助於提高核心溫度、促進氧氣傳送至作用肌群、減少肌肉黏滯性，並增加神經衝動的傳導速度，進而減少運動傷害產生，提升熱身運動後，爆發力與肌耐力表現 (Bishop, 2003a, 2003b)。

有鑒於，Wilson, Lowery, Joy, Loenneke, and Naimo (2013) 的研究顯示，30% 一次最大反覆 (one repetition maximum, 1RM) 的阻力運動結合大腿血流限制 (腿部推舉，反覆次數 15-30 次，總共 4 組，組間休息 30 秒)，可顯著提升一般男性的股外側肌活化程度，但是對於隨後之垂直跳表現沒有正面幫助。然而，傳統的跑步熱身運動結合血流限制是否具有加乘的效果，例如提升人體生理反應，誘發肌肉活化與血管舒張，進而促進隨後的下肢爆發力與肌耐力表現，至今仍不清楚。因此，本研究目的為，探討跑步熱身運動結合血流限制對人體心跳率、運動自覺量表值與血乳酸反應，以及下蹲跳與肌耐力表現之影響，期提供運動教練與選手們參考的依據。

貳、研究方法

一、研究對象

跑步熱身是田徑選手日常訓練與專項競賽前常見的流程，但是傳統的跑步熱身運動結合血流限制是否具有加乘的效果仍不清楚，因此本研究招募 12 名大專男性田徑選手，其中 4 名為 100 公尺短跑選手，8 名為 400 公尺中距離選手，基本資料依序為年齡 20.3 ± 0.9 歲，田徑訓練 5.9 ± 1.3 年，身高 174.7 ± 4.1 公分，體重 67.5 ± 4.1 公斤，收縮血壓 113.7 ± 4.9 mmHg。所有受試者皆於全國大專運動會結束後 1 週到季後期間，參與本實驗。在正式實驗前填寫受試者同意書，近 6 個月內無下肢

運動受傷紀錄，無罹患心血管疾病及糖尿病史，並於實驗期間維持正常、規律飲食習慣與日常訓練。

二、實驗設計

本研究欲探討跑步熱身運動結合血流限制對人體心跳率、運動自覺量表、血乳酸反應與運動表現之影響。由於本研究受試者為100公尺—爆發力型與400公尺—肌耐力型運動員，且田徑短跑選手的爆發力一下蹲跳（counter movement jump, CMJ）表現與30公尺與100公尺衝刺時間，皆具有顯著的負相關（男性， $r = -0.68$ 與 -0.57 ；女性， $r = -0.60$ 與 -0.64 ），因此，下肢爆發力表現，一直被視為運動選才與訓練的重要指標（Hennessy & Kilty, 2001; Smirniotou et al., 2008）。

在肌耐力表現方面，Takarada, Sato, and Ishii（2002）研究顯示，反覆50次膝伸展等速（ $180^\circ/s$ ）肌耐力測驗中的疲勞指標（fatigue index），可反映出運動選手，骨骼肌的酸—鹼緩衝與氧化能量代謝能力。此外，當田徑選手的等速（ $180^\circ/s$ ）膝屈肌與膝伸肌最大力矩比值（hamstring/quadriceps ratio, H/Q ratio）小於0.6，將增加腿後肌受傷的風險達17倍（Yeung, Suen, & Yeung, 2009）。因此本研究選擇，下蹲跳（CMJ）與連續50次膝伸展與膝屈曲之等速肌耐力測驗以評估其運動

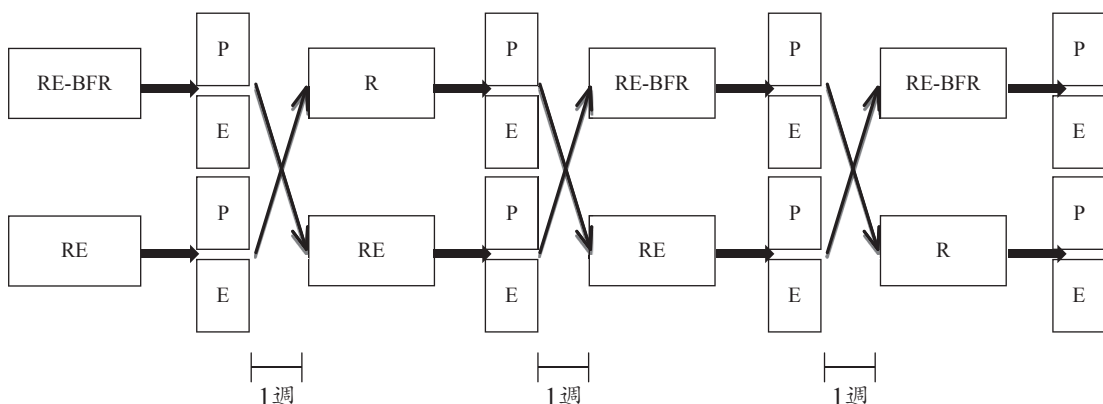
能力與下肢肌力平衡，並與相關文獻之測驗結果做比較。

在實驗設計上，本研究12名受試者皆需接受4次實驗處理，並以平衡次序分配至跑步熱身運動結合血流限制（RE-BFR）或跑步熱身運動無血流限制（RE）處理，每種實驗處理皆有2名100公尺短跑選手與4名400公尺中距離選手。每次實驗處理前後皆評估心跳率、運動自覺量表值與血乳酸濃度，在實驗處理後進行5分鐘恢復，接著平衡次序分配至爆發力或肌耐力測驗（RE-BR-爆發力、RE-BFR-肌耐力、RE-爆發力、RE-肌耐力，每種實驗組合皆有1名100公尺短跑選手與2名400公尺中距離選手），每次實驗處理後僅評估一項運動表現，目的在避免爆發力測驗後，影響後續肌耐力表現（圖一）。本研究每次實驗時間皆介於早上8:00至下午2:00，每次實驗皆安排於同一時段，每次實驗處理後皆需間隔1週休息時間。

三、實驗步驟

（一）跑步熱身運動

本研究參考先前的文獻建議，跑步熱身運動強度設定為50% HRR（Bishop, 2003b）。跑步熱身運動方式參考Loenneke, Thrower, Balapur, Barnes, and Pujol（2012）所採用的2分鐘間歇跑步、組間休息1分



圖一 實驗流程圖

註：RE-BFR = 跑步熱身運動結合血流限制處理；RE = 跑步熱身運動無血流限制處理；P = 爆發力測驗；E = 肌耐力測驗。

鐘、共5趟，每次跑步運動皆於室內跑步機（COS10198, h/p/cosmos, Germany）上完成。所有受試者皆於實驗前1週測量手臂收縮血壓（systolic blood pressure, SBP）與心跳率安靜值（坐姿休息 ≥ 15分鐘），測量2次並記錄平均值。最大心跳率預測公式為： $220 - \text{年齡}$ 。保留心跳率（HRR）公式為： $(220 - \text{年齡}) - \text{安靜時心跳率}$ 。

（二）血流限制

血流限制使用血壓計（CK-113, Spirit, Taiwan）搭配血壓帶（67.5 cm × 14.2 cm）即時監控加壓程度，加壓部位為受試者雙腳大腿上緣，加壓程度為手臂收縮血壓安靜值乘以1.3倍，先前的研究顯示，此加壓程度可顯著降低50%股動脈血流量、累積代謝壓力，並且避免發炎指標提升之風險（Clark et al., 2011; Suga et al., 2010; Takano et al., 2005）。此外所有受試者於跑步運動結合血流限制處理期間全程進行大腿加壓，每次血流限制實驗皆為同一研究人員執行，施測者內信度（intra-class correlation coefficient, ICC）為.82。

（三）實驗處理

正式實驗期間，所有受試者皆記錄運動前心跳率、運動自覺量表（rating of perceived exertion, RPE）與血乳酸安靜值，接著以平衡次序分配至：1. 跑步熱身運動（50% HRR， 8.6 ± 1.2 公里／小時，2分鐘 × 5組，組間休息1分鐘）結合血流限制（1.3倍SBP，大腿加壓 148.7 ± 4.2 mmHg）（RE-BFR）處理；2. 跑步熱身運動無血流限制（RE）處理，並記錄依變項之變化。每次實驗處理後皆休息5分鐘進行恢復，接著平衡次序分配至爆發力測驗或肌耐力測驗。

四、依變項分析

（一）生理反應

1. 心跳率與運動自覺量表值

本研究以心跳錶（Polar RS800CX, Polar Electro Oy, Finland）與運動自覺量表（RPE;

6-20 point scale; Borg, 1982）記錄受試者心跳率與運動自覺努力程度，以評估其人體生理反應。記錄時間點為運動前、運動後與恢復後（運動後5分鐘）。

2. 血乳酸

本研究所有血乳酸值一律由指尖採集，使用酒精棉片消毒，再以採血針、採血器（Penlet™ II）進行採血，採血時第一滴血以棉花擦拭後，採集第二滴血以血乳酸分析儀（Lactate Pro™, KDK Corporation, Japan）與血乳酸試紙（Lactate Pro™ Test Strip）分析，使用前依操作手冊所列之程序與方法進行校正。

（二）運動表現

1. 爆發力

本研究以下蹲跳測驗評估受試者下肢爆發力表現，以三維測力板（Kistler 9287, Kistler, Switzerland），收集地面反作用力資料，擷取頻率為1,000 Hz。測試期間受試者雙手插腰進行3次下蹲跳測驗，下蹲時大腿平行於地面，並記錄最佳成績（Bosco, Luhtanen, & Komi, 1983）。

2. 肌耐力

本研究以Biodex等速肌力測量儀（Biodex Medical Systems IV, Shirley, NY, USA）評估受試者慣用腳股四頭肌與腿後肌群之肌耐力表現。評估受試者慣用腳（100公尺起跑時，第1步前導腿）肌耐力表現時，測驗期間受試者採坐姿，膝關節活動範圍為0度（膝關節完全伸展設定為0度）至90度，搭配每秒180度角速度，進行單腳連續50次膝伸展與膝屈曲之肌耐力測驗。測量期間皆給予受試者視覺與口語化的鼓勵，並記錄50次反覆肌肉向心收縮之最大力矩、下肢肌力平衡、總作功與疲勞指標值（Takarada et al., 2002）。下肢肌力平衡以H/Q ratio表示，計算公式為：膝屈肌（180°/s）最大力矩 ÷ 膝伸肌（180°/s）最大力矩。疲勞指標計算公式為： $100\% - [\text{後10次膝伸肌（膝屈肌）總作功} \div \text{前10次膝伸肌（膝屈肌）總作功}] \times 100\%$ 。

五、統計分析

本研究所得各項資料，以SPSS 17.0統計套裝軟體個別進行以下之統計分析，所得之數據皆以平均數（M）及標準差（SD）作描述性統計。以重複量數二因子變異數分析考驗處理因子（RE-BFR處理與RE處理）及時間因子（運動前、運動後、恢復後）之心跳率、運動自覺量表與血乳酸的交互作用顯著情況。以重複量數單因子變異數分析考驗兩種實驗處理對爆發力與肌耐力表現之影響。當交互作用達統計顯著水準時，則以Bonferroni進行事後比較分析。本研究中之顯著水準，定為 $\alpha = .05$ 。

參、結果

一、生理反應

（一）心跳率

RE-BFR處理與RE處理後，心跳率交互作用達顯著（ $F = 52.89, p < .05, \eta^2 = .87$ ），進行單純主要效果分析，在處理因子方面，運動後時間點，RE-BFR處理顯著高於RE處理（ 162.67 ± 9.39 beats per minute (bpm) [$73.06 \pm 6.82\%$ HRR] vs. 131.44 ± 8.61 bpm [$49.18 \pm 5.77\%$ HRR]; $F = 95.94, p < .05, \eta^2 = .92$ ）。恢復後時間點，RE-BFR處理顯著高於RE處理（ 91.89 ± 10.26 bpm [$19.62 \pm 6.64\%$ HRR] vs. 78.43 ± 5.83 bpm [$8.72 \pm 3.05\%$ HRR]; $F = 15.71, p < .05, \eta^2 = .66$ ）（表一）。

（二）運動自覺量表（RPE）

RE-BFR處理與RE處理後，RPE值交互作用達顯著（ $F = 51.83, p < .05, \eta^2 = .84$ ），進行單純主要效果分析，在處理因子方面，運動後時間點，RE-BFR處理顯著高於RE處理（ 15.91 ± 0.83 vs. 10.45 ± 1.44 ; $F = 174.75, p < .05, \eta^2 = .95$ ）。恢復後時間點，RE-BFR處理顯著高於RE處理（ 10.09 ± 1.70 vs. 8.09 ± 1.45 ; $F = 25.50, p < .05, \eta^2 = .73$ ）。

（三）血乳酸

RE-BFR處理與RE處理後，血乳酸交互作用達顯著（ $F = 19.33, p < .05, \eta^2 = .68$ ），進行單純主要效果分析，在處理因子方面，運動後時間點，RE-BFR處理顯著高於RE處理（ 6.17 ± 3.25 mmol/L vs. 1.62 ± 0.43 mmol/L; $F = 17.12, p < .05, \eta^2 = .66$ ）。

二、運動表現

（一）爆發力

RE-BFR處理與RE處理後，下蹲跳高度無顯著差異（ 43.83 ± 2.76 vs. 43.77 ± 2.98 cm; $F = 0.01, p > .05, \eta^2 = .01$ ）。

（二）肌耐力

1. 最大力矩

RE-BFR處理與RE處理後，肌耐力表現之膝伸肌最大力矩值無顯著差異（ $F = 1.26, p > .05, \eta^2 = .12$ ）。膝屈肌最大力矩值在兩種實驗處理後，無顯著差異（ $F = 1.01, p > .05, \eta^2 = .10$ ）（表二）。

表一 不同實驗處理對心跳率與RPE、血乳酸的影響

依變項	實驗處理	運動前	運動後	恢復後
心跳率 (bpm)	RE-BFR	65.89 ± 5.25	*162.67 ± 9.39 ^a	*91.89 ± 10.26 ^{ab}
	RE	67.00 ± 4.58	131.44 ± 8.61 ^a	78.43 ± 5.83 ^{ab}
RPE	RE-BFR	7.45 ± 1.43	*15.91 ± 0.83 ^a	*10.09 ± 1.70 ^{ab}
	RE	7.10 ± 1.12	10.45 ± 1.44 ^a	8.09 ± 1.45 ^{ab}
血乳酸 (mmol/L)	RE-BFR	1.11 ± 0.21	*6.17 ± 3.25 ^a	—
	RE	1.24 ± 0.29	1.62 ± 0.43 ^a	—

註：bpm = beats per minute（次／分鐘）；RPE = 運動自覺量表；^a表示與運動前比較有顯著差異（ $p < .05$ ）；^b表示與運動後比較有顯著差異（ $p < .05$ ）；*表示與RE處理比較有顯著差異（ $p < .05$ ）。

表二 不同實驗處理對肌耐力的影響

依變項	實驗處理	膝伸肌	膝屈肌
最大力矩 (Nm)	RE-BFR	156.30 ± 24.02	109.38 ± 13.67
	RE	152.37 ± 26.51	106.20 ± 17.02
總作功 (J)	RE-BFR	5,173.25 ± 901.55	4,046.01 ± 831.78
	RE	5,196.42 ± 780.03	4,127.01 ± 763.19
疲勞指標 (%)	RE-BFR	65.42 ± 6.20	57.92 ± 8.86
	RE	64.11 ± 9.48	61.72 ± 8.41

2. 下肢肌力平衡

RE-BFR處理與RE處理後，H/Q ratio值無顯著差異 (0.71 ± 0.07 vs. 0.70 ± 0.09 ; $F = 0.01$, $p > .05$, $\eta^2 = .01$)。

3. 總作功

RE-BFR處理與RE處理後，肌耐力表現之膝伸肌總作功無顯著差異 ($F = 0.05$, $p > .05$, $\eta^2 = .01$)。膝屈肌總作功在兩種實驗處理後，無顯著差異 ($F = 0.35$, $p > .05$, $\eta^2 = .04$)。

4. 疲勞指標

RE-BFR處理與RE處理後，肌耐力表現之膝伸肌疲勞指標值無顯著差異 ($F = 0.32$, $p > .05$, $\eta^2 = 0.03$)。膝屈肌疲勞指標值在兩種實驗處理後，無顯著差異 ($F = 1.03$, $p > .05$, $\eta^2 = .10$)。

肆、討論

本研究結果顯示，跑步熱身運動結合血流限制 (RE-BFR) 處理，可顯著提升生理反應，如心跳率、運動自覺量表值增加與血乳酸濃度累積。雖然RE-BFR處理後，改變了人體生理反應，但對於隨後之爆發力與肌耐力表現，則無正面的幫助。此外，跑步熱身運動結合血流限制後，未測量受試者之100與400公尺專項運動能力為本研究不足之處，亦是運動表現沒有顯著差異的可能因素。

一、生理反應

先前的研究顯示，運動自覺量表值 (6-

20 point scale) 與運動時的心跳率、血乳酸濃度與攝氧量值成正相關 (王順正, 1999)。例如，低強度阻力運動 (20% 1RM) 結合血流限制後，顯著提升心跳率 (99.0 bpm)、運動自覺量表值 (16.0) 與手臂收縮血壓值 (144.0 mmHg) (Rossow et al., 2012)。相同的研究結果發現，RE-BFR處理後，心跳率顯著提升至73.1% HRR，約為運動前的2.5倍，並顯著地高於RE處理後之心跳率49.2% HRR達1.2倍。在運動自覺量表方面，RE-BFR處理後與RE處理達顯著差異 (15.9 vs. 10.5)。此外，RE-BFR處理後，血乳酸濃度亦顯著上升至6.2 mmol/L，約為運動前的5.6倍，並且顯著地高於RE處理後之血乳酸濃度1.6 mmol/L達3.8倍。

研究顯示，有氧 (走路，3公里／小時；腳踏車，40%最大攝氧量) 或20-30% 1RM阻力運動結合血流限制，引起靜脈血液回流減少，導致心肌前負荷與心搏量降低。因此，人體藉由提升心跳率與血壓等代償現象，以維持運動中之能量代謝所需 (Abe et al., 2010; Abe et al., 2006; Hollander et al., 2010; Takano et al., 2005)。此外，人體運動後恢復期，由於體溫與心跳率提升，兒茶酚胺濃度與血乳酸等代謝物的累積，因此氧氣的消耗仍持續增加，又稱為運動後過攝氧量 (excess post-exercise oxygen consumption) (Kaminsky, Padjen, & LaHam-Saeger, 1990)。由此觀之，本研究RE-BFR處理後恢復期，其心跳率 (19.6% HRR vs. 8.7% HRR) 與運動自覺量表值 (10.1 vs. 8.1) 仍顯著高於RE處理，皆是誘發運動後過攝氧量的可能因素。

在血乳酸方面，先前的研究顯示，低強

度阻力運動結合血流限制，降低動脈血液注入作用肌群、誘發組織肌肉的低氧，引起運動中無氧糖解作用供能，是運動後血乳酸顯著累積的可能機轉（Fujita et al., 2007; Reeves et al., 2006; Takarada et al., 2000）。例如，本研究RE-BFR處理後（50% HRR，8.6 ± 1.2公里／小時，2分鐘 × 5組，組間休息1分鐘；持續式血流限制），血乳酸濃度顯著上升至6.2 mmol/L。然而，相異的研究結果顯示，走路運動（4.5公里／小時，2分鐘 × 5組，組間休息1分鐘）結合血流限制（持續式血流限制，運動與休息期間皆保持加壓），在運動後血乳酸濃度僅有2.0 mmol/L，未能顯著累積代謝壓力（Loenneke et al., 2012）。由此推測，有氧運動強度不足，即使搭配血流限制亦無法誘發運動後血乳酸大量累積。

相關的研究顯示，30% 1RM阻力運動（15-30反覆次數，組間休息150秒，總共4組）結合血流限制（間歇式加壓，僅於阻力運動期間加壓）與30% 1RM阻力運動無血流限制，兩種實驗處理後血乳酸濃度未達顯著差異（7.9 vs. 6.7 mmol/L），其研究作者推測，此實驗設計為間歇式血流限制，搭配較長（150秒）的組間休息時間。因此，組織肌肉已獲得充分的恢復，無法持續招募快縮肌纖維，進行無氧糖解作用供能，是血乳酸濃度未持續累積的可能因素（Loenneke, Kearney, Thrower, Collins, & Pujol, 2010）。由此觀之，如欲透過有氧運動結合血流限制誘發人體代謝壓力累積，並取代傳統高強度有氧運動，建議採用持續式血流限制，且運動強度仍須達到適當的強度閾值，至於最佳的強度範圍，需要進一步研究。

二、運動表現

在爆發力、最大力矩與下肢肌力平衡方面，本研究結果顯示，RE-BFR處理後，對於隨後之下蹲跳表現無正面幫助，並與RE處理比較未達顯著差異（43.8 vs. 43.7 cm）。在最大力矩方面，本研究RE-BFR與RE處理後，在膝伸肌（156.3 vs. 152.4 Nm）與膝屈肌（109.4 vs. 106.2 Nm）等速（180°/s）最大

力矩值，皆無顯著差異。下肢肌力平衡仍維持在良好狀態（0.71 vs. 0.70），並符合Yeung et al.（2009）的研究建議，田徑選手下肢肌力平衡，其H/Q ratio不可小於0.6，否則腿後肌受傷的風險將大幅提升。有鑒於，體育學系男性大學生的下蹲跳高度與膝伸肌等速（180°/s）最大力矩表現，具有顯著的正相關（ $r = .64$ ）（Tsiokanos, Kellis, Jamurtas, & Kellis, 2002）。由此推測，RE-BFR處理後無法促進最大力矩值表現，因此對下蹲跳高度與下肢肌力平衡亦無正面幫助。

值得一提的是，本研究為目前第一篇研究探討透過跑步熱身運動結合血流限制對隨後運動表現的影響。由於先前的研究顯示，走路／阻力運動結合血流限制誘發人體產生大量代謝壓力，如血乳酸累積與靜脈血液pH值下降，有助於骨骼肌運動單位的招募、提升肌肉活化，以維持力量的產生（James & Karabulut, 2013; Takarada et al., 2000; Yasuda et al., 2010）。因此，本研究推測跑步熱身運動結合血流限制，引起血乳酸（6.2 mmol/L）與心跳率（73.1% HRR）提升，有助於膝伸肌與膝屈肌的運動單位招募，進而提升下蹲跳與最大力矩表現。

再者，本研究結果與阻力運動結合血流限制的研究一致，例如30% 1RM腿部推舉結合大腿血流限制（反覆次數15-30次，總共4組，組間休息30秒），雖然運動中的股外側肌顯著活化，運動後血乳酸濃度6.2 mmol/L大量累積，但是對於隨後之爆發力—垂直跳表現沒有正面幫助（Wilson et al., 2013）。此外，一般男性（23.7 ± 4.1歲）使用20%最大自主等長收縮（maximum voluntary isometric contractions, MVIC）之強度，從事膝伸展等長阻力運動（反覆次數20次[每次維持2秒用力，1秒休息]，總共5組，組間休息30秒）結合血流限制（1.44倍SBP，大腿加壓183.3 ± 11.5 mmHg），對於隨後之膝伸展MVIC表現無正面幫助，並與低強度阻力運動（20% MVIC）無血流限制處理比較未達顯著差異（Karabulut et al., 2006）。甚至在阻力運動（20% MVC; 30% 1RM）結合大腿血流限

制（1.3倍SBP；120-210 mmHg）後，誘發骨骼肌疲勞，並導致膝伸展MVIC表現顯著下降（Cook, Clark, & Ploutz-Snyder, 2007; Loenneke et al., 2013）。

由上述研究可以得知，跑步熱身運動／阻力運動結合血流限制後，即使代謝壓力與骨骼肌活化增加，皆無法促進隨後的下蹲跳、最大力矩與下肢肌力表現，甚至在肌肉疲勞過高時，對於最大力矩表現產生負面影響。值得一提的是，Yasuda et al.（2011）的研究發現，連續6週、每週1次的75% 1RM阻力訓練與每週2次的30% 1RM阻力訓練結合血流限制的組合訓練（總訓練量18回），可顯著提升仰臥推舉與肱三頭肌MVIC表現，並與每週3次的75% 1RM阻力訓練比較，未達顯著差異，更減少長期高強度阻力訓練引起運動傷害的風險。至於長期使用跑步運動與跑步熱身運動結合血流限制的組合訓練，是否能同時改善其爆發力與最大力矩表現，值得進一步探討。

在肌耐力表現方面，先前的研究顯示，有氧（走路、腳踏車）或阻力運動結合血流限制引起心跳率與血流速度增加，提升血管內剪力，有助於血管內皮細胞釋放一氧化氮，進而誘發血管舒張，促進血液中的氧氣運輸至作用肌群，以維持運動表現（Abe et al., 2010; Abe et al., 2006; Loenneke et al., 2010）。然而，本研究RE-BFR處理後，在反覆50次的肌肉向心收縮總作功（膝伸肌，5,173.3 vs. 5,196.4 J；膝屈肌，4,046.0 vs. 4,127.0 J）與疲勞指標（膝伸肌，65.4 vs. 64.1 %；膝屈肌，57.9 vs. 61.7%），皆與RE處理比較，未達顯著差異。

有鑒於，Takarada et al.（2002）研究顯示，疲勞指標的改善與否，跟骨骼肌的酸鹼緩衝能力與氧化能量代謝能力有關。相關的研究亦顯示，15分鐘大腿血流限制（SBP + 50 mmHg）不結合運動之實驗處理後，休息5分鐘進行恢復，接著進行心肺耐力測驗，其最大攝氧量表現未顯著提升，但自行車踩踏總運動時間、總功率與最大功率皆顯著提

升，並與無血流限制處理比較，總運動時間增加約40秒、最大功率增加約4%，其研究作者推測，血流限制引起神經元III與IV去敏感化，進而減少疲勞知覺、提升力量輸出，是總運動時間與最大功率獲得提升的可能機轉（Crisafulli et al., 2011）。因此，本研究推測，RE-BFR處理後無法改善最大力矩值與骨骼肌氧化代謝能力，是總作功無法顯著改善的可能因素。由於本研究為反覆50次、等速（180°/s）膝伸展與膝屈曲肌耐力測驗，因此總運動時間固定（約50秒），無法評估RE-BFR處理後對總運動時間之影響。

值得注意的是，連續8週、每週2次，總共16回的50% 1RM膝伸展阻力運動（每組反覆至衰竭[16.3 ± 0.7 次]，總共4組，組間休息30秒）結合大腿血流限制（ 196.0 ± 5.7 mmHg，持續式血流限制），可顯著提升橄欖球員，反覆50次的膝伸肌等速（180°/s）肌耐力表現；其研究作者推測，運動結合血流限制誘發組織肌肉的低氧與pH值下降，經長期適應的結果，有助於疲勞指標的改善（Takarada et al., 2002）。此外，一般男性從事連續4週、每週4次，總共16回的15% MVIC之膝伸展阻力運動（每組反覆至衰竭[平均22-36次]，總共4組，組間休息2分鐘）結合血流限制（大腿加壓230 mmHg），可顯著提升3.4%股四頭肌肌橫斷面積與63%膝伸肌肌耐力表現；研究作者推測，肌耐力表現的提升與阻力訓練結合血流限制後，改善運動中骨骼肌的氧氣運送能力達56%有關（Kacin & Strazar, 2011）。

統整本研究的結果可以發現，單次跑步熱身運動結合血流限制後，即使心跳率、運動自覺量表值與血乳酸增加，僅能維持隨後之爆發力、最大力矩、下肢肌力平衡與肌耐力表現，無法提供正面幫助；建議未來研究可進一步探討，總訓練量 ≥ 16 回的跑步運動結合血流限制對爆發力、最大力矩與肌耐力的影響。

伍、結論與建議

跑步熱身運動結合血流限制，相較於跑步熱身運動無血流限制處理，可顯著增加人體生理反應，如心跳率、運動自覺量表值與血乳酸濃度。但無法促進隨後之下蹲跳、膝伸肌與膝屈肌之最大力矩、膝伸肌與膝屈肌之肌力平衡、膝伸肌與膝屈肌之肌耐力與疲勞指標表現。至於長期使用跑步運動與跑步熱身運動結合血流限制的組合訓練，對人體生理反應與運動表現之適應結果，仍值得未來更進一步探討。

參考文獻

- 王順正 (1999)。運動強度的判定 (自覺量表)。資料引自 <http://www.epsport.idv.tw/epsport/week/show.asp?reppo=18>
- Abe, T., Fujita, S., Nakajima, T., Sakamaki, M., Ozaki, H., Ogasawara, R., et al. (2010). Effects of low-intensity cycle training with restricted leg blood flow on thigh muscle volume and VO₂max in young men. *Journal of Sports Science and Medicine*, 9, 452-458.
- Abe, T., Kearns, C. F., & Sato, Y. (2006). Muscle size and strength are increased following walk training with restricted venous blood flow from the leg muscle, Kaatsu-walk training. *Journal of Applied Physiology*, 100, 1460-1466.
- Anderson, J. E. (2000). A role for nitric oxide in muscle repair: Nitric oxide-mediated activation of muscle satellite cells. *Molecular Biology of the Cell*, 11, 1859-1874.
- Bishop, D. (2003a). Warm up I: Potential mechanisms and the effects of passive warm up on exercise performance. *Sports Medicine*, 33, 439-454.
- Bishop, D. (2003b). Warm up II: Performance changes following active warm up and how to structure the warm up. *Sports Medicine*, 33, 483-498.
- Borg, G. A. (1982). Psychophysical bases of perceived exertion. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 14, 377-381.
- Bosco, C., Luhtanen, P., & Komi, P. V. (1983). A simple method for measurement of mechanical power in jumping. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 50, 273-282.
- Clark, B. C., Manini, T. M., Hoffman, R. L., Williams, P. S., Guiler, M. K., Knutson, M. J., et al. (2011). Relative safety of 4 weeks of blood flow-restricted resistance exercise in young, healthy adults. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 21, 653-662.
- Cook, S. B., Clark, B. C., & Ploutz-Snyder, L. L. (2007). Effects of exercise load and blood-flow restriction on skeletal muscle function. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 39, 1708-1713.
- Crisafulli, A., Tangianu, F., Tocco, F., Concu, A., Mameli, O., Mulliri, G., et al. (2011). Ischemic preconditioning of the muscle improves maximal exercise performance but not maximal oxygen uptake in humans. *Journal of Applied Physiology*, 111, 530-536.
- Fujita, S., Abe, T., Drummond, M. J., Cadenas, J. G., Dreyer, H. C., Sato, Y., et al. (2007). Blood flow restriction during low-intensity resistance exercise increases S6K1 phosphorylation and muscle protein synthesis. *Journal of Applied Physiology*, 103, 903-910.
- Hennessy, L., & Kilty, J. (2001). Relationship of the stretch-shortening cycle to sprint performance in trained female athletes. *The Journal of Strength and Conditioning Research*, 15, 326-331.
- Hollander, D. B., Reeves, G. V., Clavier, J. D., Francois, M. R., Thomas, C., & Kraemer, R.

- R. (2010). Partial occlusion during resistance exercise alters effort sense and pain. *The Journal of Strength and Conditioning Research*, 24, 235-243.
- James, E. G., & Karabulut, M. (2013). Vascular restriction decreases EMG regularity during walking. *Human Movement Science*, 32, 389-399.
- Kacin, A., & Strazar, K. (2011). Frequent low-load ischemic resistance exercise to failure enhances muscle oxygen delivery and endurance capacity. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, 21, 231-241.
- Kaminsky, L. A., Padjen, S., & LaHam-Saeger, J. (1990). Effect of split exercise sessions on excess post-exercise oxygen consumption. *British Journal of Sports Medicine*, 24, 95-98.
- Karabulut, M., Cramer, J. T., Ryan, E. D., Anderson, R. L., Hull, H. R., Sato, Y., et al. (2006). Effects of KAATSU on muscular function during isometric exercise. *International Journal of KAATSU Training Research*, 2, 19-28.
- Loenneke, J. P., Kearney, M. L., Thrower, A. D., Collins, S., & Pujol, T. J. (2010). The acute response of practical occlusion in the knee extensors. *The Journal of Strength and Conditioning Research*, 24, 2831-2834.
- Loenneke, J. P., Thiebaud, R. S., Fahs, C. A., Rossow, L. M., Abe, T., & Bemben, M. G. (2013). Blood flow restriction does not result in prolonged decrements in torque. *European Journal of Applied Physiology*, 113, 923-931.
- Loenneke, J. P., Thrower, A. D., Balapur, A., Barnes, J. T., & Pujol, T. J. (2012). Blood flow-restricted walking does not result in an accumulation of metabolites. *Clinical Physiology and Functional Imaging*, 32, 80-82.
- Loenneke, J. P., Wilson, G. J., & Wilson, J. M. (2010). A mechanistic approach to blood flow occlusion. *International Journal of Sports Medicine*, 31, 1-4.
- Reeves, G. V., Kraemer, R. R., Hollander, D. B., Clavier, J., Thomas, C., Francois, M., et al. (2006). Comparison of hormone responses following light resistance exercise with partial vascular occlusion and moderately difficult resistance exercise without occlusion. *Journal of Applied Physiology*, 101, 1616-1622.
- Rossow, L. M., Fahs, C. A., Loenneke, J. P., Thiebaud, R. S., Sherk, V. D., Abe, T., et al. (2012). Cardiovascular and perceptual responses to blood-flow-restricted resistance exercise with differing restrictive cuffs. *Clinical Physiology and Functional Imaging*, 32, 331-337.
- Smirniotou, A., Katsikas, C., Paradisis, G., Argeitaki, P., Zacharogiannis, E., & Tziortzis, S. (2008). Strength-power parameters as predictors of sprinting performance. *Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 48, 447-454.
- Suga, T., Okita, K., Morita, N., Yokota, T., Hirabayashi, K., Horiuchi, M., et al. (2010). Dose effect on intramuscular metabolic stress during low-intensity resistance exercise with blood flow restriction. *Journal of Applied Physiology*, 108, 1563-1567.
- Takano, H., Morita, T., Iida, H., Asada, K., Kato, M., Uno, K., et al. (2005). Hemodynamic and hormonal responses to a short-term low-intensity resistance exercise with the reduction of muscle blood flow. *European Journal of Applied Physiology*, 95, 65-73.
- Takarada, Y., Nakamura, Y., Aruga, S., Onda, T., Miyazaki, S., & Ishii, N. (2000). Rapid increase in plasma growth hormone after low-intensity resistance exercise with vascular occlusion. *Journal of Applied Physiology*, 88, 61-65.

- Takarada, Y., Sato, Y., & Ishii, N. (2002). Effects of resistance exercise combined with vascular occlusion on muscle function in athletes. *European Journal of Applied Physiology*, 86, 308-314.
- Tsiokanos, A., Kellis, E., Jamurtas, A., & Kellis, S. (2002). The relationship between jumping performance and isokinetic strength of hip and knee extensors and ankle plantar flexors. *Isokinetics and Exercise Science*, 10, 107-115.
- Wilson, J. M., Lowery, R. P., Joy, J. M., Loenneke, J. P., & Naimo, M. A. (2013). Practical blood flow restriction training increases acute determinants of hypertrophy without increasing indices of muscle damage. *The Journal of Strength and Conditioning Research*, 27, 3068-3075.
- Yasuda, T., Abe, T., Brechue, W. F., Iida, H., Takano, H., Meguro, K., et al. (2010). Venous blood gas and metabolite response to low-intensity muscle contractions with external limb compression. *Metabolism: Clinical and Experimental*, 59, 1510-1519.
- Yasuda, T., Ogasawara, R., Sakamaki, M., Ozaki, H., Sato, Y., & Abe, T. (2011). Combined effects of low-intensity blood flow restriction training and high-intensity resistance training on muscle strength and size. *European Journal of Applied Physiology*, 111, 2525-2533.
- Yeung, S. S., Suen, A. M. Y., & Yeung, E. W. (2009). A prospective cohort study of hamstring injuries in competitive sprinters: Preseason muscle imbalance as a possible risk factor. *British Journal of Sports Medicine*, 43, 589-594.