

吸氣肌熱身對於低氧環境中漸增負荷運動表現之影響

蔡佩燕、郭堉圻

摘 要

目的：探討低氧環境下吸氣肌熱身對隨後漸增負荷腳踏車運動表現的效益。**方法：**受試者為12名男性，年齡 20.58 ± 0.90 歲並有運動習慣。實驗設計以交叉平衡次序原則，分為低氧環境+吸氣肌熱身處理（hypoxic environment of inspiratory muscle warm-up, HEIMW）及低氧環境處理（hypoxic environment, HE），進行漸增負荷腳踏車運動，比較不同的實驗處理後肺功能、吸氣肌肌力、呼吸頻率、心跳率、血氧濃度、換氣量、運動自覺量表、呼吸困難自覺量表、血乳酸及運動表現的變化情形。**結果：**低氧環境+吸氣肌熱身及低氧環境組的測驗指標，如肺功能、吸氣肌肌力、心跳率、血氧濃度、運動自覺量表、呼吸困難自覺量表、血乳酸及運動表現，兩組間皆無顯著差異（ $p > .05$ ）。而在運動時間中位數後2分鐘，HEIMW呼吸頻率及換氣量明顯較HE高（呼吸頻率 HEIMW vs. HE, 34.83 ± 10.43 vs. 32.83 ± 11.15 次/分, $p < .05$ ；換氣量 HEIMW vs. HE, 68.5 ± 8.82 vs. 67.08 ± 7.93 L/min, $p < .05$ ），並且在耗竭前2分鐘呼吸頻率明顯高於低氧環境組（HE vs. HEIMW, 47.80 ± 13.50 vs. 50.88 ± 13.03 次/分, $p < .05$ ）。**結論：**低氧環境下進行吸氣肌熱身，會使隨後漸增負荷腳踏車測驗，在運動時間中位數後2分鐘及運動耗竭前2分鐘的呼吸頻率及換氣量上升，造成代償及呼吸急促的現象。

關鍵詞：低氧環境、吸氣肌熱身、漸增負荷運動

Submitted for publication: October 12, 2021; Accepted for publication: March 30, 2022.

DOI : 10.53106/1815638X2021120033002

國立臺北護理健康大學運動保健系。

* Corresponding author: 郭堉圻 Email: yuchi@ntunhs.edu.tw



元照出版提供
請勿公開散布

The Effect of Inspiratory Muscle Warm-Up on Incremental Exercise Test Performance in Hypoxic Environment

Pei-Yen Tsai, Yu-Chi Kuo

Abstract

Purpose: To investigate the effects of hypoxic environment inspiratory muscle warm-up (HEIMW) on incremental exercise test performance. **Methods:** The subjects were 12 males (age, 20.58 ± 0.90 years) with exercise habits. The experimental design is repeated measures and crossover designed study, divided into HEIMW group and hypoxic environment (HE) group, for incremental exercise test. Compare the changes in lung function, inspiratory muscle strength, breathing frequency (BF), heart rate (HR), oxyhemoglobin saturation by pulse oximetry (SPO_2), ventilation volume (VE), rating of perceived exertion (RPE), rating of perceived breathlessness (RPB), blood lactate and exercise performance after different experimental treatments. **Results:** Test indicators of HEIMW group and HE group, such as lung function, inspiratory muscle strength, HR, SPO_2 , RPE, RPB, blood lactic acid and sports performance, there was no significant difference between the two groups ($p > .05$). However, 2 minutes after the median exercise time, the BF and VE of the HEIMW group were significantly higher than HE group (BF, HEIMW vs. HE, 32.83 ± 11.15 vs. 34.83 ± 10.43 , $p < .05$; VE, HEIMW vs. HE, 67.08 ± 7.93 vs. 68.5 ± 8.82 L/min, $p < .05$). Two minutes before exercise exhaustion, the BF was significantly higher than HE group (HE vs. HEIMW, 47.80 ± 13.50 vs. 50.88 ± 13.03 , $p < .05$). **Conclusions:** In the HEIMW group, the subsequent increasing incremental exercise test will increase BF and VE 2 minutes after the median exercise time and 2 minutes before exercise exhaustion, resulting in compensatory and shortness of breath.

Keywords: hypoxic; inspiratory muscle warm-up; incremental exercise

1. 問題背景

熱身運動能夠加快身體中樞與周邊的身體循環，並且提升核心與肌肉溫度，有助於代謝能力的提升並增加血流量及心輸出量，提高氧氣運送到肌肉的速度與神經傳導速率，降低肢體僵硬 (1, 2)，其目的在於降低運動傷害的發生及激活神經肌肉系統功能 (3)，是運動計畫中重要的一環項目。在眾多熱身方式中，吸氣肌熱身對於提升運動表現有所助益，其研究也發現IMW強度40%最大吸氣肌壓力（maximal inspiratory pressure, P_Imax），組數2組，每組30下，對運動表現和呼吸困難感降低及隨後運動表現提升效益較佳 (4-7)。自從第十九屆奧運在墨西哥舉行後，高地訓練也逐漸受到重視，不同的海拔高度有著不同的大氣壓力及氧分壓，相對於運動員的運動表現也會有所不同，在低氧環境下，脈動氧血紅素飽和度（oxyhemoglobin saturation by pulse oximetry, SPO₂）會立即下降，並出現生理代償反應，如心跳率上升、呼吸交換率上升等現象 (8)，由於呼吸交換率上升使呼吸次數增加，也可能使呼吸肌做功較費力，讓吸氣肌群變得較容易疲勞。

近年Deb等 (2018) 研究也發現暴露低氧環境下，短時間的間歇性運動和衝刺運動，不會受到影響 (9)，所以高海拔低氧環境下短時間爆發性運動可能因為環境因素使運動表現提升，但相對於有氧耐力性運動表現成績卻退步，由此可知高海拔低氧環境對運動表現有所影響，因此逐漸地高海拔訓練越來越受重視，進而高地訓練法也開始運用在耐力選手的訓練課程 (10-13)。高地環境不是每個國家地區都有，利用人工低氧艙模擬高的環境進行運動訓練，吳志銘、張永政、林正常 (2010) 研究發現人工低氧環境訓練，對於高地訓練適應效果與縮短高地適應時間效益較大 (8)，隨後眾多研究都指出低氧環境高強度間歇訓練，相較於常氧高強度間歇訓練更有益於促使運動適應與調節和提升運動表現 (12, 14-16)。

在常氧環境40% P_Imax吸氣肌熱身對於低氧環境運動前進行吸氣肌熱身，對隨後運動表現效益還不清

楚，本研究目的探討低氧環境下40% P_Imax吸氣肌熱身對隨後漸增負荷腳踏車運動表現的效益。

2. 方法

2.1 受試對象

本研究招募年齡20-30歲有運動習慣男性12名為受試對象，無心血管疾病與家庭病史，所有受試者研究前填寫健康情況調查表（Physical Activity Readiness Questionnaire, PAR-Q），調查受試者健康狀況無任何疾病與家庭病史即可參與本實驗。排除條件為女性，經醫師診斷之心血管疾病者（例如：心臟病、高血壓），使用PAR-Q量表量測，若有任一疾病與家庭病史者或不符合納入條件標準者將排除於本研究。並確保每位受試者瞭解本實驗目的、實驗流程、實驗方法及注意事項，且於同意書上簽名，才正式納入研究的受試者。

2.2 實驗設計

本實驗採用交叉平衡次序原則，每位受試者均會隨機分配兩種實驗處理分別為低氧環境吸氣肌熱身（40%最大吸氣壓力快吸慢吐方式進行2組30下組間休息2分鐘）與低氧環境（不進行吸氣肌熱身），進行漸增負荷腳踏車運動測試，過程中配戴心率錶和血氧濃度計及氧氣和二氧化碳分析儀器隨時監測受試者生理狀況，腳踏車測驗結束後5分鐘再進行肺功能及吸氣肌肌力測試，結束後出低氧艙，結束實驗。每次實驗處理至少間隔一週。

2.3 實驗步驟

實驗前每位受試者了解本實驗目的、實驗流程、實驗方法及注意事項並填寫健康情況調查表（PAR-Q），且於同意書上簽名，符合本研究收案標準，才正式納入實驗受試者。實驗前測進行常氧環境下肺功能及P_Imax檢測，以及常氧環境下最大攝氧量（oxygen

consumption, VO_2max) 測試和血氧濃度 (Zacurate Pro ACC CMS 500DL, Taiwan) 檢測。

2.3.1 低氧環境

低氧環境製造系統 CAT (Colorado Altitude Training, Boulder, CO, USA) 模擬2250公尺高度，室內約含有16%的氧氣濃度，受試者皆須在低氧環境待至30分鐘，隨後進行運動測試。

2.3.2 漸增負荷腳踏車運動測試 (Lode Corival 906900, Lode medical, Groningn, Netherlands)

受試者前測進行 VO_2max 測試以及本實驗二種實驗處理後的運動，皆以漸增負荷腳踏車運動進行(運動表現)，先輕鬆踩踏熱身4分鐘，熱身功率維持0-45瓦，轉速從熱身至最後騎乘皆須維持70-100rpm，測驗開始初始功率為60瓦以每分鐘增加15瓦，騎至耗竭。耗竭判定標準：到達最大預測心跳率(220-年齡 \pm 15bpm)、運動自覺量表(rating of perceived exertion, RPE) > 18、呼吸交換率(respiratory exchange ratio, R值)大於1.1以上，符合以上二者為耗竭(17)。

2.3.3 肺功能檢測

肺功能測量(CHEST HI-801, Japan)方式根據美國胸腔醫學會／歐洲呼吸學會(American Thoracic Society, ATS/European Respiratory Society, ERS, 2002)，受試者吸飽氣後，再用力呼出氣體，測量呼出的氣體量和速度，也可得知呼氣時氣流的受阻狀況，此測量主要提供三項參數，包括(1)用力呼氣肺活量(forced vital capacity, FVC)為在一口氣內盡全力呼出氣吐的總量、(2)第一秒用力呼氣量(forced expired volume in one second, FEV1)為用力呼氣時第1秒所呼出的氣體量、(3)FEV1/FVC的百分比值。

2.3.4 運動自覺(Rating of Perceived Exertion, RPE)和呼吸困難自覺(Rating of Perceived Breathlessness, RPB)量測

RPE使用Borg(1985)發展的6-20的版本(18)，檢測時間點於安靜休息、漸增負荷腳踏車運動開始前2分

鐘、中位數前2分鐘、中位數後2分鐘和耗竭前2分鐘及耗竭後5分鐘之後的時間點。RPB量表使用Burdon等(1982)提出的量表(19)，以0-10數字代表呼吸困難之程度；檢測時間點於安靜休息、漸增負荷腳踏車運動開始前2分鐘、中位數前2分鐘、中位數後2分鐘和耗竭前2分鐘及耗竭後5分鐘之後的時間點，其與PRE量表測量時間點相同。

2.3.5 吸氣肌肌力

吸氣肌的功能的指標為 P_{Imax} 經由呼吸壓力測量儀(Micro Medical, MicroRPM, UK)測量，測量的過程中不能有漏氣、咳嗽等干擾並且測量5-9次內三次數值差異在5%以內取平均值，此數值為最大吸氣壓(20)。

2.3.6 吸氣肌熱身(POWERbreathe K5, UK)

本研究吸氣肌熱身強度根據Lin等(2007)、Tong與Fu(2006)和Volianitis等(1999)的吸氣肌熱身模式設定(4-6)，40%最大吸氣壓力，每組30下，共2組，以快吸慢吐的方式，組間休息2分鐘進行。

2.3.7 CORTEX能量代謝測量系統

執行漸增負荷腳踏車運動中，以CORTEX能量代謝測量儀(Metamax 3B, Cortex, Germany)監測呼吸頻率及換氣量變化情況。

2.4 統計方式

本研究以相依樣本 t 檢定分析，不同的實驗處理間依變項之差異，統計顯著水準訂於 $p < .05$ 。

3. 結果

3.1 受試者基本資料與常氧環境下肺功能及血氧濃度檢測

12名有運動習慣男性平均年齡 20.58 ± 0.90 (歲)、身高 173.25 ± 6.05 (公分)、體重 72.81 ± 8.23 (公斤)、肺活量 4.79 ± 0.66 (公升)、第1秒吐氣量

4.22 ± 0.59 (公升)、第1秒吐氣量比率88.10 ± 5.47 (%)、最大吸氣肌力158.32 ± 45.50 (cmH₂O)、最大攝氧量46.17 ± 7.35 (ml/min/kg)、RPB為0.17 ± 0.39分 and SPO₂ 值為98.67 ± 0.89 (%)。

兩種實驗處理間的運動表現，並未達顯著差異 ($p > .05$)，如表1。

3.2. 肺功能及PImax

兩種實驗處理間，在運動耗竭後五分鐘的肺功能及PImax皆無顯著差異 ($p > .05$)，如表1。

3.3 運動表現

3.4 呼吸頻率

在運動中呼吸頻率 (breathe frequency, BF) 在運動開始前2分鐘 (frist)、中位數前2分鐘 (before median, before Md)、中位數後2分鐘 (after median, after Md) 和耗竭前2分鐘 (last)，兩組實驗處理間，在after Md及last產生明顯影響 ($p > .05$)，如圖1。

表1. 運動表現及耗竭後5分鐘的肺功能和PImax

	HE	HEIMW	p值
耗竭後5分鐘			.37
FVC (L)	4.92 ± 1.00	5.00 ± 0.85	
FEV1 (L)	4.25 ± 0.62	4.17 ± 0.58	.50
FEV1/FVC (%)	87.50 ± 5.49	87.75 ± 5.63	.72
PImax (cmH ₂ O)	160.83 ± 50.93	170.00 ± 54.78	.16
運動表現			
W (J/s)	204.38 ± 25.76	205.31 ± 23.07	.67
時間(s)	866.25 ± 101.76	870.00 ± 90.68	.67

註：HEIMW：低氧環境吸氣肌熱身；HE：低氧環境；FVC：用力呼氣肺活量；FEV1：第一秒用力呼氣量；FEV1/FVC：第一秒用力呼氣量／用力呼氣肺活量比值；PImax：最大吸氣肌肌力。

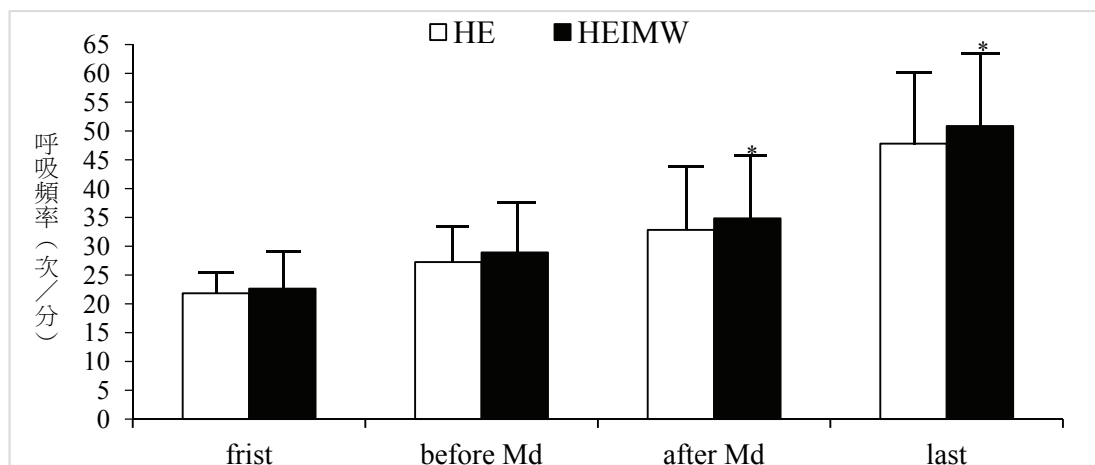


圖1. 不同實驗處理對運動中呼吸頻率之影響

說明：frist：運動開始前2分鐘；before Md：運動時間中位數前2分鐘；after Md：運動時間中位數後2分鐘；last：運動耗竭前2分鐘；* $p < .05$ 表示兩種處理之間有顯著差異。

3.5 心跳率

兩種實驗處理間心跳率在運動中，並未達顯著差異 ($p > .05$)，如圖2。

3.7 RPE量表

兩種實驗處理間RPE量表在運動中，並未達顯著差異 ($p > .05$)，如圖4。

3.6 血氧濃度

兩種實驗處理間血氧濃度在運動中，並未達顯著差異 ($p > .05$)，如圖3。

3.8 RPB量表

兩種實驗處理間RPB量表在運動中，並未達顯著差異 ($p > .05$)，如圖5。

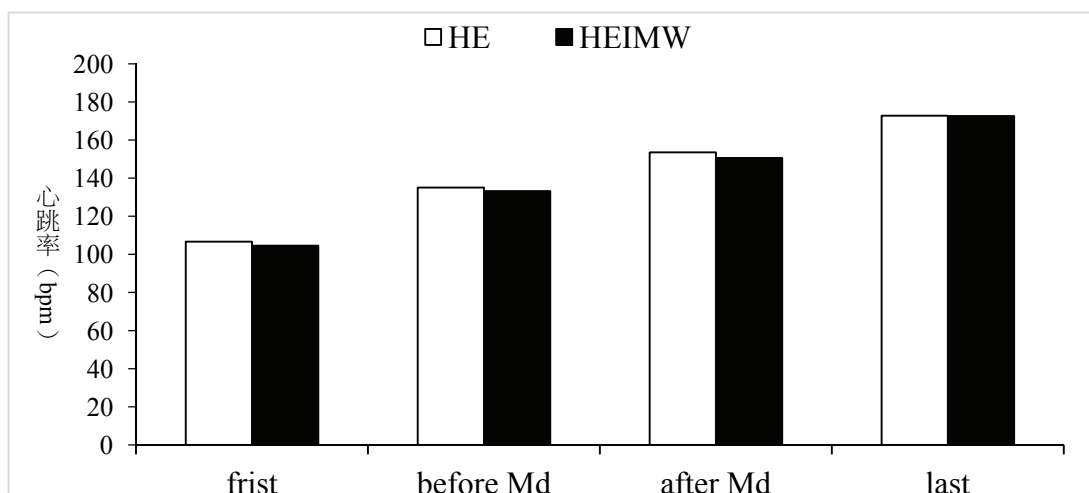


圖2. 不同實驗處理對運動中心跳率之影響

說明：frist：運動開始前2分鐘；before Md：運動時間中位數前2分鐘；after Md：運動時間中位數後2分鐘；last：運動耗竭前2分鐘。

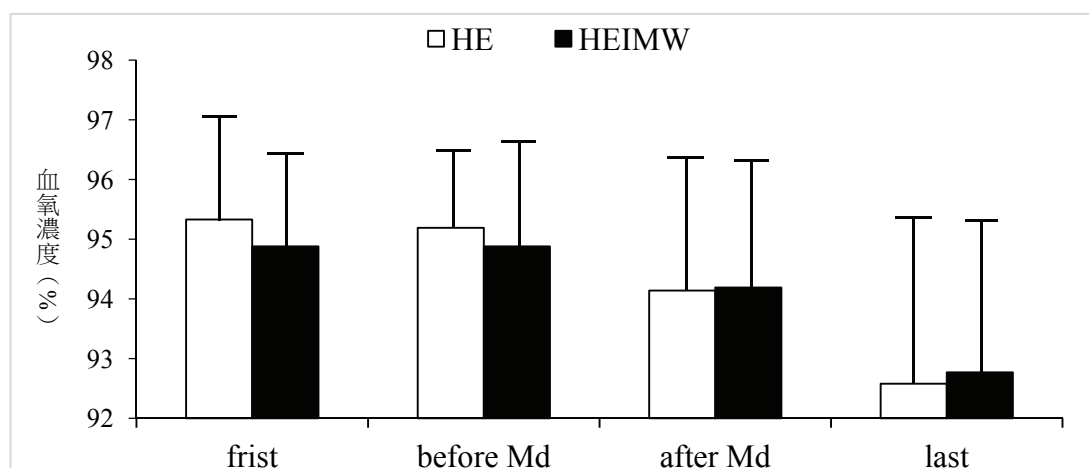


圖3. 不同實驗處理對運動中血氧濃度之影響。

說明：frist：運動開始前2分鐘；before Md：運動時間中位數前2分鐘；after Md：運動時間中位數後2分鐘；last：運動耗竭前2分鐘。

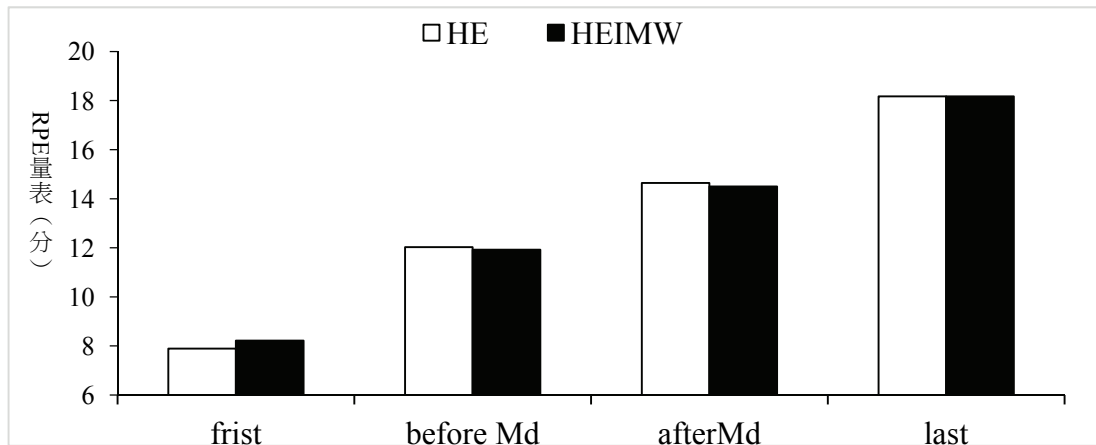


圖4. 不同實驗處理對運動中RPE量表之影響

說明：frist：運動開始前2分鐘；before Md：運動時間中位數前2分鐘；after Md：運動時間中位數後2分鐘；last：運動耗竭前2分鐘。

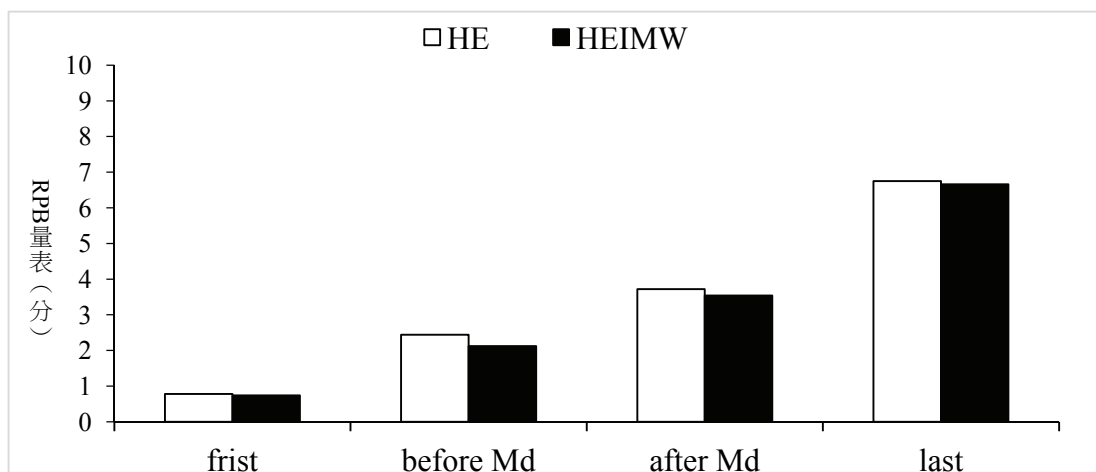


圖5. 不同實驗處理對運動中RPB量表之影響

說明：frist：運動開始前2分鐘；before Md：運動時間中位數前2分鐘；after Md：運動時間中位數後2分鐘；last：運動耗竭前2分鐘。

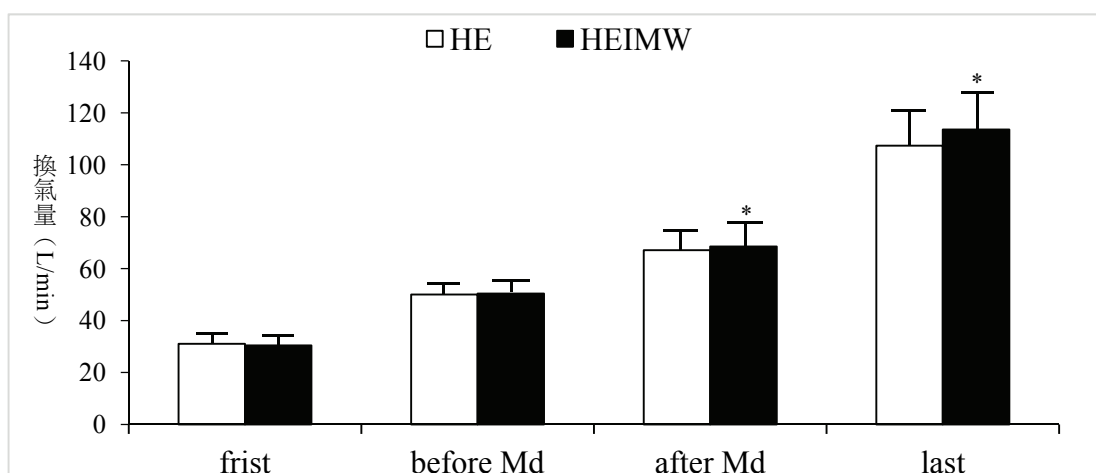


圖6. 不同實驗處理對運動中換氣量之影響

說明：frist：運動開始前2分鐘；before Md：運動時間中位數前2分鐘；after Md：運動時間中位數後2分鐘；last：運動耗竭前2分鐘。

3.9 換氣量

兩種實驗處理間換氣量在運動中，並未達顯著差異 ($p > .05$)，如圖6。

4. 討 論

本實驗運動環境為低氧環境，在低氧環境下， SPO_2 立即下降並出現生理代償反應 (21-23)，如呼吸困難感上升、心跳率上升和呼吸頻率上升等現象，而在本實驗處理中，RPB量表指數在常氧安靜休息 (HE, 0.08 ± 0.19 ; HEIMW, 0.04 ± 0.14) 與低氧安靜休息 (HE, 0.33 ± 0.62 ; HEIMW, 0.17 ± 0.25) 進行比較發現，低氧環境安靜休息，都較常氧環境安靜休息數值高，表明低氧環境已造成輕微的呼吸困難感，而處於高海拔低氧環境時，因大氣壓力、氣溫、空氣密度及氧分壓，會隨著海拔的高度提升而降低，而氧分壓的降低，可能降低動脈血及靜脈血的含氧量、 SPO_2 、心臟每跳輸出量及心輸出量 (cardiac output, CO) 也跟著降低 (24)，最後影響到攝氧量 (oxygen consumption, VO_2)，而在本研究中HE實驗處理和HEIMW實驗處理中 $\text{VO}_{2\text{max}}$ 並無顯著差異 (HE vs. HEIMW, 52.83 ± 6.07 vs. 55.08 ± 7.24 ml/min/kg, $p > .05$)，但二種實驗處理皆高於前測 $\text{VO}_{2\text{max}}$ (46.17 ± 7.35)，但未達顯著差異。而二種實驗在運動開始前2分鐘、中位數前2分鐘、中位數後2分鐘和耗竭前2分鐘的血氧濃度，都低於前測運動，由此可知在低氧環境運動，使血氧濃度降低，造成缺氧情形發生，而急性缺氧的情況發生，會導致骨骼肌交感神經放電增加，從而提高血流量與血管擴張調節 (25, 26)。Hanada與González-Alonso (2003) 研究發現，在缺氧期間運動，骨骼肌的交感神經與血管收縮活動增加 (27)。而血流量的增加是代償性血管舒張的結果，其目的是保持輸送至肌肉總氧氣量恆定 (28)。Millet等 (2019) 研究發現缺氧條件下，可能影響氧信號傳遞和攜氧能力，以代償性血管舒張，使血管擴張和提升微血管氧輸送及磷酸肌酸 (creatine phosphate) 再合成，改善快肌纖維的利用 (29)。Welch等 (1977) 研究中，給予受試者在運動中100%氧氣及常氧，並測試肌肉組織血流及攝氧情況，結果發現高

氧介入組比起常氧少了11%的血流量 (30)，由此可知在氧氣足夠的情況下，肌肉組織攝氧能力反而較差。而本實驗皆在低氧環境進行，在氧氣濃度較低的情況下，可能加劇刺激交感神經活性使攝氧能力變高，本實驗運動中HEIMW實驗處理的 VO_2 皆高於HE實驗處理，而同在低氧環境下進行運動，吸氣肌熱身是否有更大神經激活反應有待未來研究進一步研究釐清。

急性暴露低氧環境，身體 SPO_2 血紅素氧氣結合能力降低，會導致心臟運輸血液的含氧量減少，產生作用肌群氧氣不足情形 (31)，使呼吸系統VE增加、最大攝氧量下降、心血管系統及肌肉組織適應的現象 (24)，而在此低氧環境下運動，會使呼吸頻率變快，相對肺的換氣量需要增加，來因應環境挑戰 (32)，本研究在運動中位數後2分鐘和運動耗竭前2分鐘呼吸頻率中，兩組實驗處理間有明顯差異 ($p < .05$)，換氣量也在運動中位數後2分鐘和運動耗竭前2分鐘，HEIMW實驗處理皆高於HE實驗處理，由此可知在運動時間中位數之後代償反應逐漸發生。可能就是低氧環境下代償反應的產生，使呼吸頻率變得比較快，相對肺的換氣量增加次數 (32)。

本研究中測驗方式為漸增負荷腳踏車運動，腳踏車運動在踩踏時，身體為前傾的姿勢Szal與Schoene (1989) 認為此姿勢橫膈膜上升，胸腔受到壓迫，使運動時胸腔容積受到限制，導致VE降低，此時需藉由增加呼吸頻率來達到補償的效果 (33)。運動後期的強度約從75%的 $\text{VO}_{2\text{max}}$ 漸增至耗竭接近耗竭，而運動誘發吸氣肌疲勞，可能因運動方式、強度及持續時間而有不同影響。Johnson等 (1993) 認為運動相對強度超過最大攝氧量的85%時，可能會發生吸氣肌疲勞程度增加，橫膈肌對總呼吸運動作功，隨著運動時間的延長而逐漸降低 (34)。此外研究中呼吸肌熱身模式根據Volianitis等 (1999)、Tong與Fu (2006) 和Lin等 (2007) 吸氣肌熱身組設定40% P_{Imax} ，以快吸慢吐方式進行1組30下 (4-6)，共2組，組間休息2分鐘的吸氣肌熱身，因在早期研究中Roussos與Macklem (1977) 研究中指出40% P_{Imax} 負荷接近橫膈膜開始產生疲勞 (35)，所以近年來有關吸氣肌熱身的研究，皆以相

同熱身強度進行探究。而潘賢章等（2006）研究中以10名有運動習慣之男性大學生，以80% P_Imax進行1組30下，共2組，組間休息5分鐘的吸氣肌熱身，隨後進行漸增負荷腳踏車測驗直到耗竭，在各項指標中皆無差異（36），其主要原因可能是80% P_Imax吸氣肌熱身強度過高，而影響預期效益，所以熱身強度的高低與隨後運動表現息息相關。在眾多研究中結果都顯示，急性暴露低氧環境會造成生理代償反應，導致運動中心肺系統作功負荷增加（22-24），本實驗中吸氣肌熱身強為，常氧環境中測量的40% P_Imax運動強度，此強度在低氧環境下進行，是否造成吸氣肌熱身強度偏高，讓呼吸肌群在運動前已產生疲勞現象，使吸氣肌熱身效益不佳，有待未來研究進一步探討。

5. 結 論

低氧環境下進行吸氣肌熱身，會使隨後漸增負荷腳踏車測驗，在運動時間中位數後2分鐘及運動耗竭前2分鐘的呼吸頻率及換氣量上升，造成代償及呼吸急促的現象。但在低氧環境中進行短時間爆發性運動及不同的吸氣肌熱身強度是否對運動能力及表現有提升效益有待未來的研究進一步釐清探討。

作者貢獻：蔡佩燕：實驗執行、資料收集與分析、論文撰寫；郭培圻：實驗規畫、資料分析、論文撰寫。

經費來源：自籌。

人體試驗委員會、研究倫理委員會、動物實驗核可聲明及編號：本研究經輔仁大學人體研究倫理委員會審核通過（計畫編號：C109140）。

利益衝突聲明：本研究無任何利益衝突。

參考文獻

1. Bishop D. Warm up I: Potential mechanisms and the effects of passive warm up on exercise performance. *Sports Med* 33: 439-454, 2003.
2. Robergs RA, Pascoe DD, Costill DL, Fink WJ, Chwalbinska-Moneta J, Davis JA, and Hickner R. Effects of warm-up on muscle glycogenesis during intense exercise. *Med Sci Sports Exerc* 23: 37-43, 1991.
3. Herman K, Barton C, Malliaras P, and Morrissey D. The effectiveness of neuromuscular warm-up strategies, that require no additional equipment, for preventing lower limb injuries during sports participation: a systematic review. *BMC Med* 10: 75, 2012.
4. Lin H, Tong TK, Huang C, Nie J, Lu K, and Quach B. Specific inspiratory muscle warm-up enhances badminton footwork performance. *Appl Physiol Nutr Metab* 32: 1082-1088, 2007.
5. Tong TK, and Fu FH. Effect of specific inspiratory muscle warm-up on intense intermittent run to exhaustion. *Eur J Appl Physiol* 97: 673-680, 2006.
6. Volianitis S, McConnell AK, Koutedakis Y, and Jones DA. The influence of prior activity upon inspiratory muscle strength in rowers and non-rowers. *Int J Sports Med* 20: 542-547, 1999.
7. Wilson EE, McKeever TM, Lobb C, Sherriff T, Gupta L, Hearson G, Martin N, Lindley MR, and Shaw DE. Respiratory muscle specific warm-up and elite swimming performance. *Br J Sports Med* 48: 789-791, 2014.
8. 吳志銘、張永政、林正常。脈動氧血紅素飽和度與高地訓練生理適應之研究。《運動教練科學》18: 13-26, 2010.
9. Deb SK., Brown DR, Gough LA, Mclellan CP, Swinton PA., Andy Sparks S, and Mcnaughton LR. Quantifying the effects of acute hypoxic exposure on exercise performance and capacity: a systematic review and meta-regression. *Eur J Sport Sci* 18, 243-256, 2018.
10. 李昭慶。高地訓練的新理念。《中華體育季刊》16，37-44，2002。
11. Levine BD, and Stray-Gundersen J. "Living high-training low": effect of moderate-altitude acclimatization with low-altitude training on performance. *J Appl Physiol* 83, 102-112, 1997.
12. Park HY, and Lim K. Effects of hypoxic training versus normoxic training on exercise performance in competitive swimmers. *J Sports Sci Med* 16, 480-488, 2017.
13. Park HY, Park W, and Lim K. Living high-training low for 21 days enhances exercise economy, hemodynamic function, and exercise performance of competitive runners. *J Sports Sci Med* 18, 427-437, 2019.
14. Park HY, Shin C, and Lim K. Intermittent hypoxic training for 6 weeks in 3000 m hypobaric hypoxia conditions enhances exercise economy and aerobic exercise performance in moderately trained swimmers. *Biol Sport* 35, 49-56, 2018a.
15. Park HY, Jung WS, Kim J, Hwang H, and Lim K. Efficacy of intermittent hypoxic training on hemodynamic function and exercise performance in competitive swimmers. *J Exerc Nutrition Biochem* 22, 32-38, 2018b.



16. **Żebrowska A, Jastrzębski D, Sadowska-Krepa E, Sikora M, and Di Giulio C.** Comparison of the effectiveness of high-intensity interval training in hypoxia and normoxia in healthy male volunteers: a pilot study. *Biomed Res Int*, 7315714, 2019.
17. **Chen TC, Nosaka K, Lin MJ, Chen HL, and Wu CJ.** Changes in running economy at different intensities following downhill running. *J of Sports Sci* 27: 1137-1144, 2009.
18. **Borg G.** An introduction to Borg's RPE-scale. Movement, Ithaca, New York: Movement Publications, 1985.
19. **Burdon JG, Juniper EF, Killian KJ, Hargreave FE, and Campbell EJ.** The perception of breathlessness in asthma. *Am Rev Respir Dis* 126, 825-828, 1982.
20. **Wen AS, Woo MS, and Keens TG.** How many maneuvers are required to measure maximal inspiratory pressure accurately. *Chest* 111: 802-807, 1997.
21. **廖焜福、王榮錫.** 低氧環境對組織生理及運動表現的影響。大專體育 93, 168-174, 2007.
22. **Costill DL, Kenney WL, and Wilmore J.** Physiology of sport and exercise: Human kinetics, 2008.
23. **Powers SK, and Howley ET.** *Exercise Physiology: Theory and Application to Fitness and Performance* New York. NY: McGraw-Hill, 2004, p. 303-308.
24. **Wilber RL.** Altitude Training and Athletic Performance. Human Kinetics, 2004.
25. **Rowell LB, Johnson DG, Chase PB, Comess KA, and Seals DR.** Hypoxemia raises muscle sympathetic activity but not norepinephrine in resting humans. *J Appl Physiol* 66: 1736-1743, 1989.
26. **Westendorp RG, Blauw GJ, Frölich M, and Simons R.** Hypoxic syncope. *Aviat Space Environ Med* 68: 410-414, 1997.
27. **Hanada A, Sander M, and González-Alonso J.** Human skeletal muscle sympathetic nerve activity, heart rate and limb haemodynamics with reduced blood oxygenation and exercise. *J Physiol* 551: 635-647, 2003.
28. **Casey DP, and Joyner MJ.** Compensatory vasodilatation during hypoxic exercise: mechanisms responsible for matching oxygen supply to demand. *J Physiol* 590: 6321-6326, 2012.
29. **Millet GP, Girard O, Beard A, and Brocherie F.** Repeated sprint training in hypoxia—an innovative method. *Dtsch Z Sportmed* 70: 115-122, 2019.
30. **Welch HG, Bonde-Petersen F, Graham T, Klausen K, and Secher N.** Effects of hyperoxia on leg blood flow and metabolism during exercise. *J Appl Physiol Respir Environ Exerc Physiol* 42: 385-390, 1977.
31. **Geiser J, Vogt M, Billeter R, Zuleger C, Belforti F, and Hoppeler H.** Training high-living low: changes of aerobic performance and muscle structure with training at simulated altitude. *Int J Sports Med* 22: 579-585, 2001.
32. **Buskirk E, Kollias J, Piconreatigue E, Akers R, Prokop E, and Baker P.** The effects of altitude on physical performance. *Athletic Institute, Washington, DCUSA*, 1966.
33. **Szal SE, and Schoene RB.** Ventilatory response to rowing and cycling in elite oarswomen. *J Appl Physiol* 67: 264-269, 1989.
34. **Johnson BD, Babcock MA, Suman OE, and Dempsey JA.** Exercise-induced diaphragmatic fatigue in healthy humans. *J Physiol* 460: 385-405, 1993.
35. **Roussos CS, and Macklem PT.** Diaphragmatic fatigue in man. *J Appl Physiol Respir Environ Exerc Physiol* 43: 189-197, 1977.
36. **潘賢章、林正常、林信甫.** 呼吸肌熱身對腳踏車運動時生理反應與衰竭時間的影響。臺大體育學報 9: 39-54, 2006.

