

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

不同臨界負荷與能量消耗模式預測划船選手運動表現之研究

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC93-2413-H-034-005-

執行期間：93年08月01日至94年07月31日

執行單位：中國文化大學體育學系

計畫主持人：林正常

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中華民國 94 年 10 月 30 日

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告
不同臨界負荷與能量消耗模式預測划船選手運動表現之研究

Different models of critical concepts and energy expenditures in predicting performance of rowers

計畫編號：NSC 93-2413-H-034-005

執行期限：93 年 8 月 1 日至 94 年 7 月 31 日

主持人：林正常 中國文化大學

一、中英文摘要

本研究主要目的在探討以不同臨界負荷與能量消耗指標（效率與經濟性）評估划船測功儀上的運動表現，以確認最佳的臨界負荷預測模式，同時探討在臨界速度（CV）與臨界動力（CP）的持續運動時間與生理反應，包括心跳率（HR）、乳酸（La）、氧攝取量（ $\dot{V}O_2$ ）、二氧化碳產生量（ $\dot{V}CO_2$ ）與換氣量（ $\dot{V}E$ ）。受測對象為國內優秀的女性西式划船選手 15 名（年齡 20.73 ± 1.44 歲、身高 164 ± 0.35 公分、體重 56.64 ± 4.38 公斤），經平衡次序法，所有受試者皆在划船測功儀（Concept II）上，接受不同距離（400 公尺、600 公尺、800 公尺、1000 公尺）與時間（90 秒、240 秒、600 秒、1200 秒）的運動測驗，以線性模式分析分別獲得 CV (4.00 ± 0.14 m/s) 與 CP (139.49 ± 20.37 W)；其次進行漸進負荷測驗、CV 與 CP 的 20 分鐘持續運動測驗；實驗過程中以 Vmax29 能量代謝系統測得 $\dot{V}O_{2max}$ (2.47 ± 0.47 L) 及持續運動中的呼吸生理變化。本研究結果顯示， $\dot{V}O_{2max}$ 、CP、CV 分別與 2000 公尺划船運動成績皆有顯著相關 ($r = -.88, -.81, -.97, p < .05$)。經多元逐步迴歸分析顯示，以 CV 配合疲勞指數 (FI) 為預測 2000 公尺划船成績的最佳預測模式 ($T_{2000} = -131.44CV - 89.57FI + 1022.27, SEE = 4.08$ s, $p < .05$)，決定係數高達 0.96。在 CV 強度下運動時，運動過程中 La、HR、 $\dot{V}O_2$ 、 $\dot{V}E$ 皆不會出現穩定狀態，而 $\dot{V}CO_2$ 則無明顯變化；同時在 CP 強度下， $\dot{V}O_2$ 、 $\dot{V}CO_2$ 會出現穩定狀態，但是 La、HR 以及 $\dot{V}E$ 皆隨著運動時間的增加而上升。本研究發現相較於 CP 而言，CV 是划船運動較佳的臨界負荷指標，且配合疲勞指數是較佳的成績預測模式，因此，臨界負荷概念中的 CV 適用於划船運動的訓練評估

關鍵詞：臨界速度、臨界動力、能量消耗、划船表現

ABSTRACT

The purpose of this study was to compare critical velocity (CV) and critical power (CP) for predicting indoor rowing performance by combining different physiological variables, including heart rate (HR), lactate (La), oxygen intake ($\dot{V}O_2$), expired CO_2 ($\dot{V}CO_2$) and ventilation ($\dot{V}E$). Fifteen elite female rowers (age 20.73 ± 1.44 years, height 1.64 ± 0.35 m, weight 56.64 ± 4.38 kg) were recruited in this study. Four test times of duration 90s, 240s, 600s, and 1200s were used to determine CP (139.49 ± 20.37 W), whereas CV (4.00 ± 0.14 m/s) was estimated by 400m, 600m, 800m, 1000m maximal exertion trials in different days as well by using Linear distance-time model. $\dot{V}O_{2max}$ (2.47 ± 0.47 L) and physiological variables were measured during a continuous graded exercise test by Vmax29 analyzer. Physiological variation of intensity at CV and CP, including $\dot{V}O_2$, $\dot{V}CO_2$, $\dot{V}E$, HR and La were measured every 5 minutes in 20-min constant rowing tests. The results of study showed that $\dot{V}O_{2max}$, CP, CV were significantly correlated with 2000m indoor rowing performance ($r = -0.88, -0.81, -0.97, p < .05$). By submitting mean power, fatigue index (FI), $\dot{V}O_{2max}$ with each index to a stepwise regression analysis, it produced one individual critical concept models as following to predict 2000m indoor rowing performance by CV model: $T_{2000} = -131.44 CV - 89.57 FI + 1022.27$ ($R^2 = 0.96, SEE = 4.08, p < .05$). When rowing at CV significantly changed, $\dot{V}O_2$, $\dot{V}E$, HR, La didn't reach steady state and $\dot{V}CO_2$ was not different at different time points. Under CP, $\dot{V}O_2$ and $\dot{V}CO_2$ didn't change with time,

however, there were significant differences of $\dot{V}E$, HR and La at different time points. Our findings in this study indicated that CV has more predictive power than CP to predict 2000m of rowing performance, and FI is also an important factor. Therefore, CV could be used when applying critical concept in training and evaluate indoor performance in rowing.

Key words: critical velocity, critical power, energy expenditure, rowing, performance.

二、緣由與目的

自從 Hill 與 Lupton 於 1923 年提出最大攝氧量（maximal oxygen consumption, $\dot{V}O_{2max}$ ）的概念後， $\dot{V}O_{2max}$ 即代表運動生理學研究的發展歷史與應用上非常重要的生理變項。近幾年研究也陸續指出無氧閾值 (anaerobic threshold, AT) 與臨界負荷可用來評估耐力性運動員的運動表現，而能量消耗 (energy expenditure) 也是影響耐力成績表現的重要因素之一。然而，AT 方面的研究必須借助昂貴的科學儀器或研究者的主觀判斷，因此利用更簡單與更客觀的評量方法評估耐力性運動員的運動表現便成了至今運動科學研究者努力的方向。

關於臨界負荷的研究，Monod & Scherrer (1965) 首先提出肌肉的臨界動力 (Critical Power, CP) 概念，意指肌肉在固定負荷下進行最大能力運動時，肌肉所做的功與最大持續運動時間成直線正比關係。後來 Pepper 等 (1992)、Billat 等 (1994) 進行跑步運動的 CV (critical velocity) 負荷研究，隨著時間的演進與研究的豐富，CV 已衍成為評估臨界負荷的主流。王順正與林正常 (1995) 進一步利用統合分析 (meta-analysis) 的效度概化 (validity generalization) 研究法，發現不管運動的方式是腳踏車或游泳，臨界負荷已被證實是有效的無氧閾值評量方式。

對於划船運動項目而言，划船運動是屬於

需要大肌肉群與高代謝率的活動 (Steinacker, 1993), 同時也屬於爆發耐力的運動表現 (Peltonen & Rusko, 1993)。雖然研究指出動力與速度是預測 2000 公尺划船的重要指標 (Hill 等, 2003; Ingham, 2002), 但是將臨界動力概念應用於划船運動時, 究竟是以速度 (CV) 或者動力 (CP) 來預測成績表現與有氧能力孰者為佳, 是值得進一步釐清的問題。故本研究除了試圖找出 CV 與 CP 何者預測成績或有氧能力較佳之外, 並比較建立預測室內 2000 公尺划船成績的較佳模式, 以及觀察划船選手在 CV 與 CP 強度運動時的相關生理指標。

三、研究方法

(一) 受試者

本研究以國內優秀女性划船選手 15 名為受試對象, 年齡 20.73 ± 1.44 歲, 身高為 164.37 ± 3.50 公分, 體重 56.64 ± 4.38 公斤。經初步測驗後之 CV 值為 4.00 ± 0.14 m/s, CP 為 139.49 ± 20.37 W, 最大攝氧量為 2.47 ± 0.47 L/min, 2000m 成績為 493.44 ± 19.20 秒。

(二) 實驗設計

本研究採受試者內設計與平衡次序方式處理。每位受試者分別進行不同距離 (400 公尺、600 公尺與 800 公尺與 1000 公尺) 與不同時間 (90 秒、240 秒、600 秒與 1200 秒) 的衝刺測驗, 以公式換算分別獲得 CV 與 CP 值。接著受試者於划船器測功儀上進行漸增負荷的最大攝氧量測驗, 同時採集血乳酸以計算 2000 公尺划船測功儀的衝刺測驗, 作為運動表現的指標以獲得能量消耗與無氧動力參數。在獲得 CP 及 CV 後, 再分別進行 20 分鐘臨界負荷的固定強度運動測驗, 運動測驗過程中的 5 分鐘、10 分鐘、15 分鐘與 20 分鐘, 詳細記錄每位受試者的心跳率、換氣量、氧攝取量、二氧化碳產生量等人體生理反應的變化情形。每位受試者每次進行運動測驗至少間隔 24 小時以上。

四、結果與討論

(一) 比較不同臨界負荷與運動表現之關係

經皮爾遜積差相關統計分析後, 發現 CV、CP 與 $\dot{V}O_2\max$ 變項分別與 400m、600m、800m、1000m 和 2000m 成績達到顯著相關 (表一)。

表一 臨界負荷指標與運動表現之相關係數資料表

	400m	600m	800m	1000m	2000m
CV(m/s)	-.79*	-.82*	-.92*	-.96*	-.97*
CP(W)	-.55*	-.58*	-.66*	-.71*	-.81*
$\dot{V}O_2\max$ (L/min)	-.64*	-.71*	-.78*	-.82*	-.88*

* $p < .05$, N=15

表一結果顯示, 無論是 $\dot{V}O_2\max$ 、CV 或 CP, 其與運動表現的相關程度隨著距離增加而提升, 顯見三者皆適用於預測長距離的耐力運動表現, 但以相關程度而言, CV 略優於 $\dot{V}O_2\max$ 又優於 CP。長久以來應用 $\dot{V}O_2\max$ 預測耐力運動成績的表現一直備受爭議 (Kolbe 等, 1995; Noakes 等, 1988), 對此不同研究結果的解釋, 王順正 (1998) 認為除了受試者能力與取樣人數不同之外, $\dot{V}O_2\max$ 的不同測量方式可能是影響最大差異的主因, 但確實之影響因素仍須進一步探討。此外, 以速度為單位的 CV 指標, 其與 2000m 運動成績表現具有顯著相關, 此結果與 Hill 等 (2003)、Kennedy & Bell (2000) 研究結果趨近一致。然而可惜的是, 針對 CP 在划船選手的研究僅止於對測驗方式的探討, 並沒有針對預測的 CP 與實際運動表現進行考驗 (Clingeffer 等, 1994), 而本研究首次發現, 經線性模式所計算出來的 CP 與 2000m 成績具有顯著相關。綜合以上討論得知, 以 CV 作為划船運動的臨界負荷指標優於 $\dot{V}O_2\max$ 和 CP, 因此教練可藉由不同距離的划船器測功儀檢定與評估划船選手的訓練效果與預測成績表現, 如果 CV 提升, 耐力成績應該會有所進步, 反之亦然。

(二) 不同情境變項預測成績表現之模式

在划船的作功效率與經濟性之結果顯示, 經濟性 ($r = -.04 \sim .10$, $p > .05$)、作功效率 ($r = -.07 \sim 0.3$, $p > .05$) 與不同距離的運動表現並無顯著相關 (表二)。

表二 划船經濟性與作功效率和運動表現之相關係數資料表

	400m	600m	800m	1000m	2000m
RE (L/min)	.10	.05	-.04	.05	.06
ME (%)	-.07	.00	.08	-.01	-.05

註: RE 為划船經濟性, ME 為作功效率。* $p < .05$, N=15

表二結果與 Cosgrove 等 (1999) 研究結果雷同。顯見並非所有受試者的攝氧量皆能在一定時間內達到穩定狀態，這與選手平日的訓練情況、體能水準與 $\dot{V}O_2\max$ 有關。雖然有關於運動經濟性方面的研究較多應用於跑步選手，其重要性在於具備相同水準 $\dot{V}O_2\max$ 的選手具有較佳的經濟性與運動成績；但本結果並未發現有此關係，可能原因為本研究之受試者並未具備相同水準之 $\dot{V}O_2\max$ ，或者是與不穩定的攝氧量有關，因此將經濟性應用於划船運動上仍須進一步驗證其實用性。而作功效率之結果與其他研究結果相似 (Fukunaga, 1986; Russel 等, 1998)，經比較後發現，於划船測功儀上所獲得作功效率比實際划船值低，原因可能與槳頻有關 (diPrampo, 1971)。diPrampo 認為效率會降低的原因是由於槳頻較高，造成較多能量消耗。除此之外，Fukunaga 指出效率的不同可能與應用划船測功儀的計算公式不同所致。

經多元逐步回歸處理後發現，CV 和經濟性預測運動表現所得公式如下：

$$T_{2000} = -131.83CV - 1.00FI + 1023.91, \text{SEE} = 4.10 \text{ (s)}$$

所獲得的迴歸係數 (R) 為 0.98，調整後的決定係數 (R^2) 為 0.96，估計標準誤 (SEE) 為 4.10 秒。此外，CP 與作功效率預測運動表現所得公式為： $T_{2000} = -25.95 \dot{V}O_2\max \text{ (L/min)} - 0.29CP \text{ (W)} + 597.32, \text{SEE} = 9.27 \text{ (s)}$

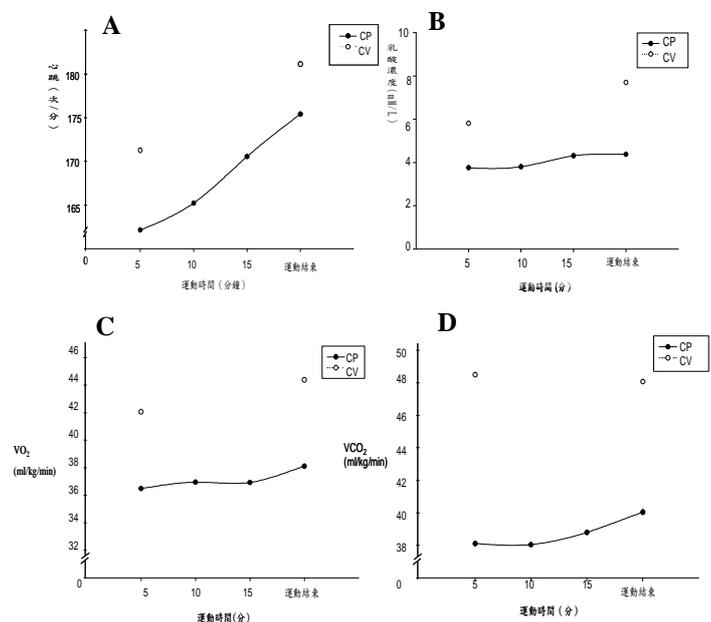
上述公式之 R 值為 0.89，調整後的 R^2 為 0.77，SEE 為 9.27 秒。故此結果顯示，CV 是作為預測 2000m 划船成績最佳生理變項，並配合無氧動力的疲勞係數 (FI) 所獲得的預測公式更能精確地預測成績表現。

以預測能力而言，Bourdin 等 (2004)、Cosgrove 等 (1999) 和 Riechman 等 (2002) 對划船選手進行預測分析之結果一致表示， $\dot{V}O_2\max$ 是預測 2000m 划船成績的重要變項，此解釋與本研究以 $\dot{V}O_2\max$ 為單一變項的回歸模式中，決定係數亦高達 0.75 的指標與概念相同。在以往有關划船運動的研究中，並沒有研究嘗試以非侵體性生理指標作為預測因素並進行回歸分析，然而，本研究首次證實以臨界速度所代表的臨界負荷指標，對於 2000m 的成績

表現具有高相關，配合無氧動力所測得的 FI 再經模式化分析後所得決定係數達 0.96，顯示臨界速度應用於划船運動中具有相當高的實用價值。

(三) 在不同臨界負荷之人體生理反應

從圖一 (A、B) 的結果發現，在臨界負荷持續運動時，CV 與 CP 的 HR 皆無法維持穩定狀態，除此之外，La 在運動過程中隨著時間增加而逐漸上升。由此可知，以線性模式推估出的 CV 並無法持續超過 20 分鐘，同時 HR 與 La 皆無法維持穩定狀態。在 CP 方面，儘管划船選手可以持續運動超過 20 分鐘，但 HR 與 La 的情況與 CV 結果相同。此結果與 Brickley 等 (2002)、Dekerle 等 (2003) 研究結果相近。但實際上在執行臨界負荷與持續時間的相關研究是有困難的，因為多半會受到選手條件與運動型態的不同而有所差異，並且推估 CV 或 CP 時易出現高估現象 (Housh, 1991)，因此理想的 CV 與 CP 之最長時間為何，有待未來進一步的研究加以釐清。



圖一 CV 與 CP 持續運動的各項生理反應。A：心跳率變化；B：血乳酸變化；C： $\dot{V}O_2$ 變化；D： $\dot{V}CO_2$ 變化。

由圖一 (C、D) 可得知，不論是在 CV 或 CP 強度下， CO_2 排出量皆呈現穩定狀態；但是在 CV 持續運動時，攝氧量會隨著時間變化逐漸上升，而 $\dot{V}E$ 也出現相同情形 (圖未列出)。此結果與 Overend 等 (1992) 發現 CP 持續運動的

$\dot{V}O_2$ 、 $\dot{V}CO_2$ 與 R 值趨於穩定的結果相似；但 Brickley (2002) 認為在 20 分鐘持續運動下，CP 不是可以持續穩定生理狀態的運動強度。然而，至今尚無類似研究可與本研究進行比較與探討，故確實之機制仍有待進一步的研究加以釐清。

五、計畫成果自評

- (一) 在划船測功儀上，以線性模式所推估出的 CV、CP 與不同距離成績皆達到顯著相關，且 CV 與 2000m 成績達到高相關。顯示臨界負荷對於預測 2000m 划船運動具有相當高的預測能力。
- (二) 經由模式化比較後發現， $T_{2000} = -131.83CV - 1.00FI + 1023.91$ ， $SEE = 4.10$ (s) 為本研究最佳的預測模式。而 CP 所得之回歸公式並非最佳模式。
- (三) 不論是在 CP 或 CV 之臨界負荷，HR 與 La 無法呈現穩定狀態，且 $\dot{V}O_2$ 、 $\dot{V}CO_2$ 與 $\dot{V}E$ 在不同情境下會有不同的反應情況。顯示 CV 會有不穩定的生理狀態，而 CP 亦處於穩定與不穩定之臨界點。

六、參考文獻

- 王順正與林正常 (1995)。臨界負荷評估無氧閾值的效度概化。中華民國大專院校 1995 年體育學術研討會專刊，1-15。
- 王順正 (1997)。長跑選手臨界速度跑的生理反應研究。國立台灣師範大學體育研究所博士論文，未出版。
- Billat, V., Renoux, J. C., Pinoteau, J., Petit, B., & Koralsztien, J. P. (1994). Times to exhaustion at 100% of velocity at $\dot{V}O_2$ max and modeling of the time-limit/velocity relationship in elite long-distance runners. *European Journal of Applied Physiology*, 69, 271-273.
- Bourdin, M., Messonnier, L., Hager, J. P., & Lacour, J. R. (2004). Peak power output predicts rowing ergometer performance in elite male rowers. *International Journal of Sports Medicine*, 25(5), 368-373.
- Brickley, G., Doust, J., & Williams, C. A. (2002). Physiological responses during exercise to exhaustion at critical power. *European Journal of Applied Physiology*, 88, 146-151.
- Clingeffer, A., McNaughton, L. R., & Davoren, B. (1994). Critical power may be determined from two tests in elite kayakers. *European Journal of Applied Physiology*, 68, 36-40.
- Cosgrove, M. J., Wilson, J., Watt, D., & Grant, S. F. (1999). The relationship between selected physiological variables of rower and rowing performance as determined by a 2000m ergometer test. *Journal of Sports Science*, 17, 845-852.
- Dekerle, J., Baron, B., Dupont, L., Vanvelcenaher, J., & Pelayo, P. (2003). Maximal lactate steady state, respiratory compensation threshold and critical power. *European Journal of Applied Physiology*, 93, 281-288.
- di Prampero, P. E., Cortili, G., Celentano, F., & Cerretelli, P. (1971). Physiological aspect of rowing. *Journal of Applied Physiology*, 31, 853-857.
- Fukunaga, T., Matsuo, A., Yamamoto, K., & Asami, T. (1986). Mechanical efficiency in rowing. *European Journal of Applied physiology and occupational physiology*, 55(5), 471-475.
- Hill, D. W., Alain, C., & Kennedy, M. D. (2003). Modeling the relationship between velocity and time to fatigue in rowing. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 35(12), 2098-3105.
- Housh, T. J.; Devries, H. A.; Housh, D. J.; Tichy, M.W., Smyth, K. D., & Tichy, A. M. (1991). The relationship between critical power and the onset of blood lactate accumulation. *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 31(1), 31-36.
- Ingham, S. A., Whyte, G. P., Jones, K., & Nevill, A. M. (2002). Determinants of 2000m rowing ergometer performance in elite rowers. *European Journal of Applied Physiology*, 88(3), 243-246.
- Kennedy, M. D., & Bell, G. J. (2000). A comparison of critical velocity estimates to actual velocity in predicting simulated rowing performance. *Canadian Journal of Applied Physiology*, 25(4), 223-235.
- Kolbe, T., Dennis, S.C., Selley, E., Noakes, T.D., & Lambert, M. I. (1995) The relationship between critical power and running performance. *Journal of Sports Sciences*, 13, 265-269.
- Monod, H., & Scherrer, J. (1965). The work capacity of a synergic muscular group. *Ergonomics*, 8, 329-338.
- Noakes, T.D. (1988). Implications of exercise testing for prediction of athletic performance: a contemporary perspective. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 20 (4), 319-330.
- Overend, T. J., Cunningham, D. A., Peterson, D. H., & Smith, W. D. (1992). Physiological responses of young and elderly men to prolonged exercise at critical power. *European Journal of Applied Physiology*, 64(2), 187-193.
- Peltonen, J. & Rusko, H. (1993). Interrelations between power, force production and energy metabolism in maximal leg work using a modified rowing ergometer. *Journal of Sports Science*, 11, 233-240.
- Pepper, M. L., Housh, T. J., & Johnson, G. O. (1992). The accuracy of the critical velocity test for predicting time to exhaustion during treadmill running. *International Journal of Sports Medicine*, 13, 121-124.
- Riechman, S. E., Zoeller, R. F., Balasekaran, G., Goss, F. L., & Robertson, R. J. (2002). Prediction of 2000m indoor rowing performance using a 30s sprint and maximal oxygen uptake. *Journal of Sports Science*, 20, 681-687.
- Russell, A. P., Le Rossignol, P. F., & Sparrow, W. A. (1998). Prediction of elite schoolboy 2000m rowing ergometer performance from metabolic, anthropometric and strength variables. *Journal of Sports Science*, 16, 749-754.
- Steinacker, J. M. (1993). Physiological aspects of training in rowing. *International Journal of Sports Medicine*, 14, S3-S10.