

四肢發達，頭腦不簡單： 腦造影觀點下的運動與認知

張智宏、姚在府*

一、前言

「四肢發達，頭腦簡單」是社會上對於有運動能力專長者一種玩笑式的評語。在升學主義掛帥的華人文化，智育一向是大多數人投注心力的焦點，體育則長久被視為課餘副業，不管是教學時數或是經費資源都被排擠。然而近年來不論是橫斷式（cross-sectional）或是介入式（interventional）研究，種種有力的輻輳證據（converging evidence）指出，各個年齡層個體的體適能，與其認知能力表現或心理健康有顯著的關聯性。而體育影響智育的神經機制，在日益精進的腦電波及腦造影技術輔助探索下，亦已廣受國際研究者重視，衍生出成果豐碩的運動認知神經科學研究領域。忽視這些證據而繼續迫使莘莘學子但知有國英數物理化學，但是缺乏如何鍛鍊及保護自己身體的運動素養；或是任老年人終日閒坐靜待日升月落三餐電視節目，都是相當令人遺憾的事情。從神經科學的觀點來看，運動訓練提升的不僅是體適能（fitness），還藉由提升大腦的可塑性及訊息傳遞效能，促進心智運作流暢及減緩老化。因此，本文擬重點介紹晚近文獻中，應用腦造影探討身體活動訓練對於認知功能影響的研究發現，希望能在推動一般大眾重視身體活動的思維上，略盡棉薄之力。

二、運動促進認知功能的行為及腦造影實驗證據

在各類型的運動訓練方式中，因為有氧運動訓練的強度容易量化，又有

* 張智宏，國立中央大學認知神經科學研究所副教授；姚在府，國立中央大學認知神經科學研究所碩士生。



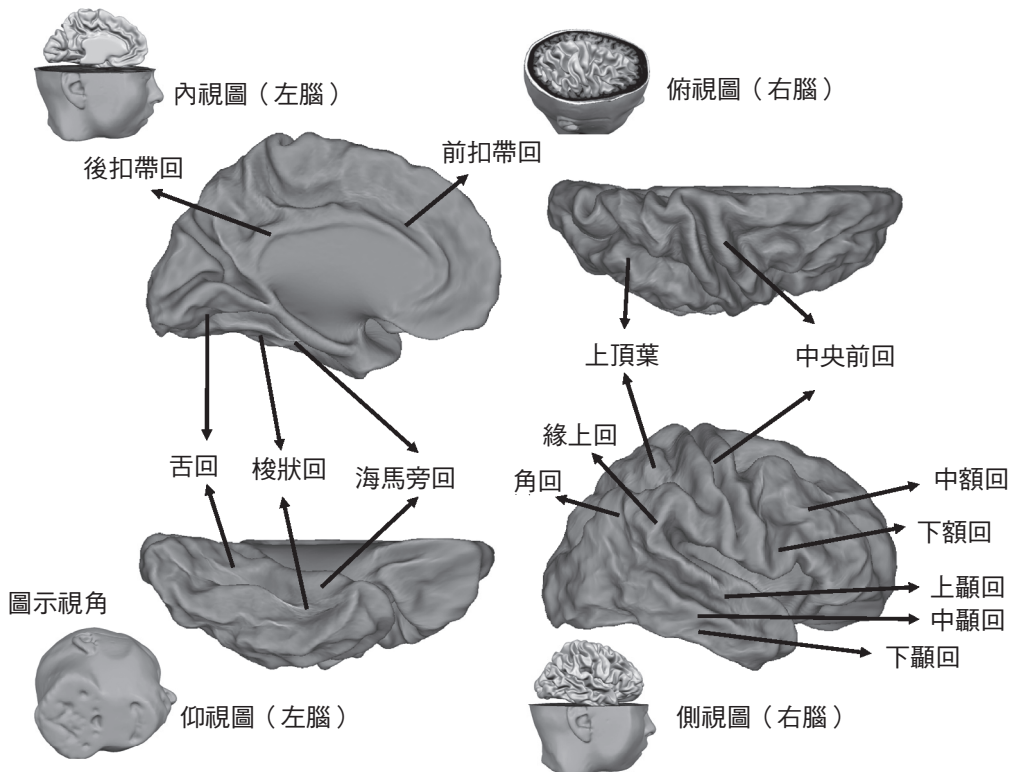
多種便於監控的電子產品，它對於大腦與認知功能影響目前最廣為探討。進入有氧運動狀態的一個簡易評估標準，是以讓心跳數維持在「220 減去個體年齡，再乘以 60%~70%」的區間達至少 30 分鐘。心跳數與心肺適能 (cardiovascular fitness) 的指標「最大攝氧量」(maximal oxygen uptake, VO_2 -max) 間有著相當可靠的換算關係，可用以評估個體有氧作業能量及心肺耐力。有許多研究指出，單次性及長期性的有氧運動訓練都能改善成年受試者的認知彈性、知覺訊息轉換及執行控制能力 (例如在 Stroop 作業¹ 或是 Flanker 作業² 上的表現)。除此之外，亦有證據顯示有氧運動訓練可促進成年人工作記憶與處理速度。事實上，運動訓練促進認知能力的效果普及各個年齡層。例如學童體適能高低和學業成績與認知功能有正向的關係；運動訓練介入甚至可以改善注意力不足過動 (ADHD) (Chuang et al., 2015) 或是動作發展協調障礙 (DCD) (Tsai et al., 2014; Wu et al., 2010) 兒童的認知功能。

行為改變的根本原因，在於腦部的結構與活動發生對應的變化。上述從行為研究中發現的證據，也在腦造影研究中得到支持。磁共振腦造影 (Magnetic Resonance Imaging, MRI) 技術可以取得高空間解析度的腦部結構或功能影像，讓研究者藉以探討腦部運作的結構 (structural) 或功能 (functional) 特性，與認知能力之間的關聯。在腦部結構特性的探討方面，結構性磁共振造影 (structural MRI) 可探討全腦灰質、白質及腦脊髓液所占比例 (像素形態分析法; Voxel-based Morphometry, VBM)，或探討神經纖維 (即白質) 完整程度 (擴散張量造影; Diffusion Tensor Imaging, DTI)。下文中將介紹多個受運動訓練影響之腦區，為方便讀者參考，圖一列舉了由四個視角所見的大腦表面區域示意圖，並且標示各個相關腦區。

由結構性磁共振造影發現， VO_2 -max 值較高 (亦即心肺適能較佳) 的學齡前孩童，海馬回體積大於 VO_2 -max 較低者。長期世代追蹤研究亦發現，老年

¹ Stroop task (史卓普作業) 要求受試者念出字體有顏色的色彩名稱。例如「紅」字以綠色寫出，而受試者需念出「綠」。從事此作業時除了需要強化其選擇性注意力 (selective attention) 與持續性注意 (sustain attention)，也必須隨時抑制已過度學習而固著的習慣性反應 (對於「紅」字字義及字音的表徵)。

² Flanker task (旁側干擾作業) 要求受試者判斷螢幕正中央的箭頭指向左或右。而目標箭頭的兩側有與目標方向一致 (congruent <<<<<) 或不一致 (incongruent: << >><) 的箭號，形成干擾。抑制干擾訊息能力越佳者，一致與不一致情況的反應時間差異越少。



圖一 磁振造影研究中與運動促進認知功能相關大腦皮質區域。左上、左下、右上及右下圖分別為四個不同視角所見之大腦區域。每一圖旁之小圖示意該視角與頭部外型之相對方位

人海馬回體積和心肺適能之間有顯著的相關性；接著在追蹤這些受試者一年後，研究者發現有氧運動讓實驗組的老年受試者海馬回體積增加，而進行伸展運動的控制組一年後則海馬回體積微幅減少。同樣的，將一小群精神病患者在運動介入前後的結構腦造影變化程度與控制組相比，也發現其海馬回增加容積。此外，亦有研究發現前額葉和顳葉的大腦白質完整性與 $VO_2\text{-max}$ 分數變化之間的相關性。簡言之，運動可以提升神經纖維結構的完整性，亦可以增加負責記憶固化功能的海馬回體積增生。

在腦部功能特性的探討方面，運用功能性磁振造影 (functional MRI, fMRI) 可以探討從事特定作業時腦部的活動情況，或是計算腦區之間的功能



性連結³。第一個呈現運動訓練和大腦功能性改變間關係的研究 (Colcombe et al., 2004)，係對老年人進行持續 6 個月的運動訓練，比較不同類型的運動如何影響認知功能及腦部活動；關鍵的實驗組從事心肺功能運動訓練，每次訓練要達到心跳儲備率 (Heart Rate Reserve, HRR)⁴ 之 70%。結果發現進行有氧運動介入相對於伸展運動的控制組在進行 Flanker 作業時，側前額葉及頂葉區域的活化增加，但是負責監控反應衝突的前扣帶回活化下降。功能性腦造影所發現的受運動訓練影響區域，可能有多重因素同時作用，包括：刺激神經突觸增生的腦衍生神經滋養因子、誘發微血管增生的血管內皮生長因子，以及促進學習的膽鹼類神經傳導物。值得注意的是：由於影響區域有其局限性，所以運動改變大腦並不是無選擇性地增加全腦血流量，而是促進了特定區域的功能。

Voelcker-Rehage 等研究者 (2011) 則比較了持續 12 個月、每週進行三次有氧訓練 (走路) 或協調性訓練 (伸展和放鬆)，對認知與腦功能的影響。結果發現接受走路處方的老年人，相對於接受伸展和放鬆處方者，在進行旁側干擾作業的不一致嘗試 (incongruent trials) 時，大腦前扣帶回、左側中額回、左側海馬旁回和左側中顳回及上顳回都發現活化下降的情形。相對的，在協調性訓練組則發現在處理不一致情況下的旁側干擾作業時，下額回、上頂葉和一些皮層下區域包括尾狀核跟丘腦都有活化增加的趨勢。上述協調訓練組的活化程度增加，而有氧訓練組活化程度下降的趨勢，在訓練達 6 個月時就可以觀察到，而且持續至第 12 個月時所進行的第二次評估。由此可知，運動訓練對認知功能的影響，需要持續一定期間的訓練計畫，才能在腦部觀察到明顯的效果。

Voss 等人 (2010) 檢視了預設網絡區域間的功能性連結強度，以及與執行功能有關的「額葉—腦島網絡」和「額葉—頂葉網絡」如何受有氧運動介入

³ 功能性連結 (functional connectivity) 係計算腦部各體素之血氧濃度訊號隨時間共變的程度，亦即計算統計相依性 (mutual information)。大腦區域間的相依程度變化快速，代表不同認知作業、行為、注意力狀態、覺察及學習歷程等作業，是由腦區中的不同子區域及神經迴路所參與。而這些相關性的強度被認為提供一個測量不同腦區之間運作的一致性指標。若有一群腦區在執行特定認知功能時，彼此活動高度相關，則這些腦區可被視為同屬一個功能性網絡 (functional network)。

⁴ 心跳儲備率 (HRR) 係指當下個體心跳與其安靜態心跳的差值，占其最大心跳與安靜態心跳差值的比率。以 HRR 為基準的運動強度判定方式，長期以來一直被認為是評估運動強度的有效方式。

影響。他們研究老年人在 6 個月及 12 個月的有氧運動訓練（走路）或是柔軟度和舉重訓練（toning）及平衡訓練。與非有氧訓練組相比，此研究發現進行 12 個月的有氧訓練，導致在中顳葉、頂葉、前額葉的連結增加，包括提高海馬旁回和中顳回、側海馬回和雙側內頂葉皮質，以及左中額回和中顳回之間的連結。老年人身上發現預設網絡的連結改變，傾向發生於「額葉—島葉」和「額葉—頂葉」兩組網絡。此研究亦發現成年人心肺適能與後扣帶皮質和前扣帶皮質等腦區間的功能性連結強度有正向的關係。此研究中的受試者進行了以下執行功能與工作記憶測驗：作業轉換（task-switching）、威斯康辛卡片分類（Wisconsin Card Sorting Task）和空間記憶作業測試。研究者計算這些測驗表現與功能連結強度間的相關性，結果發現「後扣帶—前扣帶皮質」之間的功能性連結，會決定心肺適能和威斯康辛卡片分類作業的重複性錯誤間的關係強度。由此研究可知，不僅個別腦區的活化程度受到運動訓練調節，腦區間互相協調從事認知作業的連結強度，也為運動所影響。

Lustig 等研究者（2009）指出，反映出代償歷程的額外腦部活化，經常發生在單次回合性的研究中，尤其是在練習作業前有比較好表現的成年人身上。他們預測訓練造成的腦部活化模式改變，會減少不必要的處理過程，使老年人的腦部活動變得更類似年輕人。而筆者實驗室針對臺北市北投地區一群 65 歲以上老年人進行持續 6 個月的「每日一萬步」運動訓練（Chang & Wang, 2013），比較前後測受試者在進行注意力網路測驗（Attention Network Test）時腦部活動的改變。結果發現，老年人在經過提升身體活動量的運動訓練後，其與衝突解決相關的腦部活動，從活動量不足，改變為與年輕人相近。綜上所述，若以年輕人的腦部活動方式為標準，運動對於老年人腦部活化的影響可能是雙向的：過度活化者會向下修正，而活動不足者則向上提升。

雖然前述 fMRI 研究多以年輕老年人為受試群體，文獻中亦不乏對兒童進行的運動訓練腦造影研究。Davis 等人（2011）在孩童身上，進行為期 3 個月的介入性研究，發現運動對於孩童在 antisaccade 作業（視線移動到提示點的反方向的位置）的執行功能和數學成績有劑量依賴（dose-dependent）的效益。每天 40 分鐘的運動介入比起每天 20 分鐘的運動介入，有較高的認知表現分數。而在前後測的 fMRI 的訊號顯示在運動介入組進行 antisaccade 作業時的雙側前額葉皮質的活化增加，而雙側後頂葉皮質的活化下降。Krafft 等人（2014）將 43 個 8-11 歲體重過重的小孩隨機分成運動組及控制組，每天課



後進行訓練持續 8 個月，在介入前後都以 fMRI 紀錄相關腦部變化。結果發現運動組比起控制組在幾個與反掃視作業表現相關的中額回與後頂葉呈現出活化下降的情況，而在旁側干擾作業表現相關的前扣帶回和上額回出現活化增加的現象。

最後值得一提的是，雖然強調心肺適能的有氧運動訓練對認知功能影響最廣為探討，其他種類的運動也開始有報告指出其對認知能力的功效。Nagamatsu 等人（2012）發現每週兩次強調增進肌肉力量的阻抗性運動，持續 26 週之後，可以提高聯想記憶（associative memory）表現，並且提高右側舌回、枕葉梭狀回及額葉的活化程度。

三、結語

關於運動訓練對於腦部活動方式影響的方式，可能有兩個模式：一方面是當增加作業負荷時，引發更多的神經系統資源參與，而運動訓練可能有助於提升認知作業相關腦區參與處理的活動量。另一方面，則有可能當運動訓練改善生理條件，提高了認知歷程的處理效率，降低補償作用的需求，更有效地利用資源而導致在一些認知作業相關腦區上減少了活化。上述兩種模式何者發生，可能取決於運動訓練處方、個體在訓練前的認知及大腦功能狀況，以及用以評估訓練效果的認知功能測驗類型。這些變項之間如何共同影響運動訓練對認知功能的調節，相信會成為未來十年運動認知神經科學領域在建立運動訓練處方時所探討的重點。

運動介入後行為表現的改善、腦部結構的改變以及腦部活化的變化，可以理解為身體活動帶來對認知功能的益處。身體活動訓練可能有助於擴充認知資源，而使得作業相關的腦區活化方式能夠適應作業需求，調整為適合表現較佳的活化形態。由運動生理機制來看，腦部結構及腦部活動的改變，可能肇因於有氧運動所導致的神經元和神經突觸增生，以及微血管增生。這些生理的變化可以比擬做神經系統基礎建設的改善，讓大腦變得訊息傳遞更有效率、養分和氧氣的供給更充分。然而，要充分利用這些升級的基礎條件，其他種類的運動或是運用大腦認知功能的挑戰，也不可偏廢。雖然目前大多數的腦造影研究都還著重於有氧運動訓練（走路、慢跑、飛輪健身車……等），建議一般人在從事運動時仍需注意均衡發展；諸如強調增加肌肉量的阻抗性運動（重量訓練、核心肌群訓練）、強調策略運用及團隊合作的球類運

動、或是強調身體動作協調及呼吸控制的武術訓練，都各有其對身體的益處，若能依個人環境及身體條件搭配採用，對於身心的均衡發展將更有益處。

誌謝

本文撰稿及部分研究內容蒙科技部專題研究計畫支持（NSC 100-2628-H-008-008; MOST 103-2420-H-008-006-MY2），特此感謝。

參考文獻

- Chang, E. C., & Wang, J. Y. S. (2013). *Differential Modulation of Attentional Networks in the Elderly by Physical Activity*. Paper presented at the 2013 Society for Neuroscience Annual Meeting, San Diego, California, USA.
- Chuang, L. Y., Tsai, Y. J., Chang, Y. K., Huang, C. J., & Hung, T. M. (2015). Effects of acute aerobic exercise on response preparation in a Go/No Go Task in children with ADHD: An ERP study. *Journal of Sport and Health Science, 4* (1), 82-88. doi:10.1016/j.jshs.2014.11.002.
- Colcombe, S. J., Kramer, A. F., Erickson, K. I., Scalf, P., McAuley, E., Cohen, N. J., . . . Elavsky, S. (2004). Cardiovascular fitness, cortical plasticity, and aging. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 101* (9), 3316-3321. doi:DOI 10.1073/pnas.0400266101.
- Davis, C. L., Tomporowski, P. D., McDowell, J. E., Austin, B. P., Miller, P. H., Yanasak, N. E., . . . Naglieri, J. A. (2011). Exercise Improves Executive Function and Achievement and Alters Brain Activation in Overweight Children: A Randomized, Controlled Trial. *Health Psychology, 30* (1), 91-98. doi:10.1037/a0021766.
- Krafft, C. E., Schwarz, N. F., Chi, L. X., Weinberger, A. L., Schaeffer, D. J., Pierce, J. E., . . . McDowell, J. E. (2014). An 8-month randomized controlled exercise trial alters brain activation during cognitive tasks in overweight children. *Obesity, 22* (1), 232-242. doi:10.1002/oby.20518.
- Lustig, C., Shah, P., Seidler, R., & Reuter-Lorenz, P. A. (2009). Aging, Training, and the Brain: A Review and Future Directions. *Neuropsychology Review, 19* (4), 504-522. doi:10.1007/s11065-009-9119-9.
- Nagamatsu, L. S., Handy, T. C., Hsu, C. L., Voss, M., & Liu-Ambrose, T. (2012). Resistance Training Promotes Cognitive and Functional Brain Plasticity in Seniors With Probable Mild Cognitive Impairment. *Archives of Internal Medicine, 172* (8), 666-668. Retrieved from <Go to ISI>://WOS:000303128700018.
- Tsai, C. L., Chang, Y. K., Chen, F. C., Hung, T. M., Pan, C. Y., & Wang, C. H. (2014). Effects of Cardiorespiratory Fitness Enhancement on Deficits in Visuospatial Working Memory in Children with Developmental Coordination Disorder: A Cognitive Electrophysiological Study. *Archives of Clinical Neuropsychology, 29* (2), 173-185. doi:10.1093/arclin/act081.
- Voelcker-Rehage, C., Godde, B., & Staudinger, U. M. (2011). Cardiovascular and coordination training differentially improve cognitive performance and neural processing in older adults. *Frontiers in Human Neuroscience, 5*. doi:10.3389/fnhum.2011.00026.



- Voss, M. W., Prakash, R. S., Erickson, K. I., Basak, C., Chaddock, L., Kim, J. S., . . . Kramer, A. F. (2010). Plasticity of brain networks in a randomized intervention trial of exercise training in older adults. *Frontiers in Aging Neuroscience, 2*. doi:10.3389/fnagi.2010.00032.
- Wu, S. K., Lin, H. H., Li, Y. C., Tsai, C. L., & Cairney, J. (2010). Cardiopulmonary fitness and endurance in children with developmental coordination disorder. *Research in Developmental Disabilities, 31* (2), 345-349. doi:10.1016/j.ridd.2009.09.018.