

# 身體活動與老年大腦功能：功能性磁共振造影的研究回顧\*

陳豐慈

國立臺灣師範大學  
體育學系

黃植懋

國立交通大學  
生物科技系暨研究所

王俊智

國立臺灣師範大學  
體育學系

張育愷

本回顧之目的係以靜息態與作業相關功能性磁共振造影取向探討身體活動對老年大腦功能之影響，其中並以橫斷式與縱貫式研究取向，將身體活動分為心肺功能/有氧訓練、太極拳、阻力健身運動、協調訓練、身體活動量，及認知性身體活動等探討其在老化大腦功能之效益。靜息態功能性磁共振造影取向之結果發現，透過心肺適能與有氧訓練與增進老年人大腦功能間有其正向關聯；該正面效益亦發現在針對高齡者的太極拳運動上，然研究對於阻力健身運動之結果仍需更多研究進一步釐清。作業相關功能性磁共振造影取向之結果則發現，心肺適能與協調訓練皆對老年人大腦功能亦有正面影響。此外，高身體活動量對一般老年或高風險失智者之大腦功能皆有其效益。另外，透過認知性身體活動介入可對老年人之大腦處理效率有正面影響。整體而言，過去研究已為身體活動與老化大腦功能間之正向關聯提供科學實證基礎，本回顧結果可能提供台灣社會針對老年族群改善大腦功能之身體活動處方。

**關鍵詞：**身體活動、執行功能、認知老化、磁共振造影

---

\* 1. 本篇論文通訊作者：張育愷，通訊方式：yukaichangnew@gmail.com。  
2. 本文由張育愷所申請之科技部計畫（MOST 107-2628-H-179-001-MY3、MOST 105-2628-H-179-001-MY3），以及黃植懋所申請之科技部計畫（MOST 105-2420-H-009-001-MY2）部分補助支持。

全球高齡化 (global aging) 浪潮已成世界各國關注的研究議題。近期人口分佈報告指出，全世界人口總數預估於 2045 年達到 90 億人，其中 2009 年 60 歲以上的人口已佔全球人口比例之 10.8%，而 2050 年則預估將攀升至 22.0% (Crampton, 2009)；事實上，高齡者的比例是所有年齡層人口群組中累積最快速的族群 (Van Bavel, 2013)。然而，老化人口的倍增與預期壽命 (life expectancy) 的延長，並無法完全預測老年的身心健康與其晚年的生活品質。世界衛生組織的研究報告指出，維持穩定的心理健康與正常的認知神經功能 (neurocognitive function) 是影響晚年生活品質，以及是否能夠成功老化 (successful aging) 的關鍵因素之一 (World Health Organization, 2017)。

在眾多老化相關的臨床疾病中，失智症 (dementia) 是 65 歲以上高齡者影響最大的神經性退化疾病之一，其與心理或認知神經功能健康關係尤深。罹患失智症的成年人除了記憶 (memory) 能力的嚴重衰退，還包括其它自主生活的認知失常，例如：思考、語言，及決策等。根據研究報告指出，全球約有 5% 至 7% 高齡人口罹患失智症，且每間隔 20 年，其罹患失智症的總人數將翻倍成長 (Prince et al., 2013)；在臺灣亦有類似之趨勢，推估報告指出 2016 年臺灣失智症人口已逾 26 萬人，亦即大約每 100 人就有 1 人罹患失智症 (臺灣臨床失智症協會，2016)。因此，為因應高齡化社會更多失能老年人口的來臨，積極尋求方法來改善、提升與強健高齡者的認知神經功能，使之能自主獨立生活、降低醫療照護與經濟安全的社會成本，已成為學界關注的重要研究議題。

過去研究證據指出，老化過程之認知功能表現與大腦健康有高度相關 (黃植懋、黃緒文、洪蘭、曾志明，2014)。事實上，35 歲後成人之大腦結構隨年齡而逐年縮小，而 60 歲後其整體大腦體積量甚至以每年下降 0.5% 的速度萎縮 (Hedman, van Haren, Schnack, Kahn, & Hulshoff Pol, 2012) (圖 1)；不同大腦區域結構體積的萎縮，也被發現與特定認知功能表現有關。例如，大腦前額葉體積較少的老年人，他們在智力測驗的分數較低、執行功能的處理效率較差、抑制控制能力不佳，以及工作記憶表現較弱 (Cardenas et al., 2011; Head, Kennedy, Rodrigue, & Raz, 2009)。此外，亦有研究發現隨年齡增長，其大腦功能也呈現顯著下降趨勢，其功能受到老化影響的大腦區域，包含背外側前額葉皮質 (dorsolateral prefrontal cortex, DLPFC)、前扣帶皮質區 (anterior cingulate cortex, ACC)、頂葉 (parietal lobule)、小腦 (cerebellum)、基底核 (basal ganglia)，及海馬回 (hippocampus) 等 (Cao et al., 2014; Grady, 2008; Greene & Killiany, 2010; Lin et al., 2017; Park & Reuter-Lorenz, 2009)。該些大腦功能的弱化導致整體的認知與心理功能下降，並與失智症或阿茲海默症 (Alzheimer's disease) 有關 (Kennedy et al., 2009)。

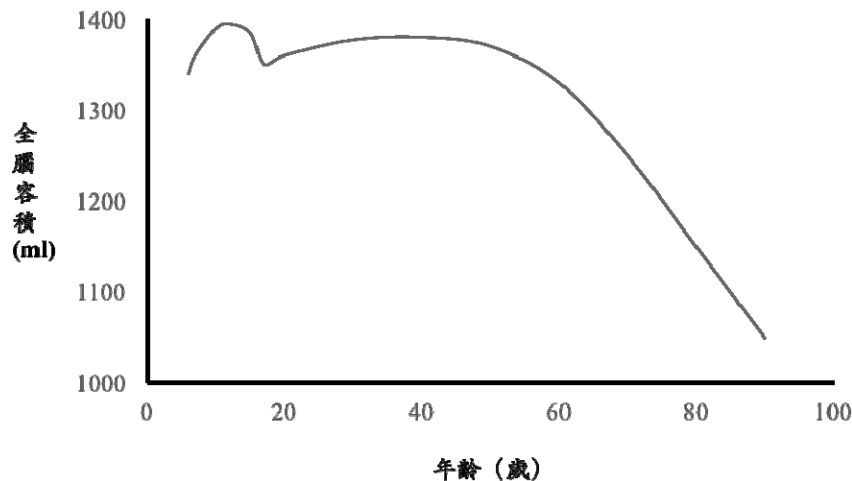


圖 1 年齡與全腦容積之關聯。

註：引自 Hedman 等人 (2012) 之回顧性文獻。

然而，延緩老化相關認知功能的衰退並非不可行，已有許多研究已經發現，身體活動（physical activity）與增進大腦認知功能表現（齊璘、陳豐慈、祝堅恆、張育愷，2014；古博文、陳俐蓉、許志宏，2016；王駿濠、蔡佳良，2017），或改善大腦神經滋養因子（王俊智、宋岱芬、祝堅恆、張育愷，2016）有關。另外，以神經科學取向探討之動物模式研究（Holschneider, Yang, Guo, & Maarek, 2007; Nokia et al., 2016; Timofeeva, Huang, & Richard, 2003）與人類研究（Colcombe et al., 2006; Colcombe, Kramer, McAuley, Erickson, & Scalf, 2004; Kramer & Erickson, 2007; McAuley et al., 2011）皆已積累較為大量之證據，支持身體活動量可正向影響大腦認知功能表現。亦有諸多回顧性與實證性研究也指出，身體活動對改善大腦結構或功能係有正面的影響（宋岱芬等人，2017；豐東洋、黃耀宗、郭正煜、高士竣，2016；Hillman, Erickson, & Kramer, 2008; Kramer, Erickson, & Colcombe, 2006; Park & Reuter-Lorenz, 2009）。

「身體活動」係指由骨骼肌導致能量消耗的所有身體動作，通常以身體活動量（如卡路里消耗量）作為測量指標。過去實證研究發現，經由身體活動可增進心肺功能（cardiovascular fitness）或有氧適能（aerobic fitness）等身體適能（physical fitness），進而改善老年人之認知功能（Netz, Dwolatzky, Zinker, Argov, & Agmon, 2011）。不過，身體適能涵蓋範疇較廣，其可廣泛延伸至心肺適能／有氧適能、肌耐力、協調、柔軟度、平衡，及爆發力等，而身體活動與身體適能或許可能產生不同認知功能結果（Barha, Davis, Falck, Nagamatsu, & Liu-Ambrose, 2017; Cai & Abrahamson, 2016; Ehlers et al., 2017; Nagamatsu et al., 2016）。有鑑於認知功能與大腦功能之諸多關聯性，身體活動與身體適能或可會使大腦功能產生不同影響。為此，本文回顧將著重於探討身體活動、身體適能與老化大腦功能間之關聯。

由於磁共振造影（magnetic resonance imaging, MRI）技術的興起與快速發展，結合認知神經科學與運動心理學的跨領域研究取向，進而探討成年人身體活動與大腦健康的關係，已成此跨領域之研究趨勢之一。MRI 為非侵入性的神經造影儀器，已廣泛應用於醫學領域診斷，及偵測神經系統的健康與損傷程度。運用 MRI 技術，研究者可迅速有效的偵測大腦生理訊號的相關數值，並運用影像分析與統計運算，獲得大腦結構與功能的相關資訊，解釋個體認知功能與行為表現的個別差異。相較於過去僅聚焦於認知行為表現，或者其他神經造影術（如：腦電波），MRI 擁有高空間解析度的大腦造影技術之優勢，可同時瞭解認知功能與特定腦區活動之結果；在身體活動相關研究議題上，許多研究已從不同分析取向探討其對大腦功能與結構之影響，例如：使用功能造影（functional imaging）研究不同認知功能作業進行時大腦活動的變化（Hall et al., 2008; Hayes, Hayes, Cadden, & Verfaellie, 2013）；使用結構造影（structural MRI）研究大腦皮質厚度與大腦區域體積的變化（Ahlskog, Geda, Graff-Radford, & Petersen, 2011; Chapman et al., 2013; Hayes et al., 2013）；使用擴散磁共振造影技術（diffusion MRI）研究大腦區域之間的結構連結性（structural connectivity）（Burzynska et al., 2014; Marks, Katz, Styner, & Smith, 2010）；使用靜息態功能性磁共振造影技術（resting-state fMRI）探討大腦區域之間的功能連結性（functional connectivity）（Boraxbekk, Salami, Wahlin, & Nyberg, 2016; Raichlen et al., 2016; Tozzi et al., 2016）；部分研究甚至結合上述數種造影技術的多元取向研究（圖 2）。

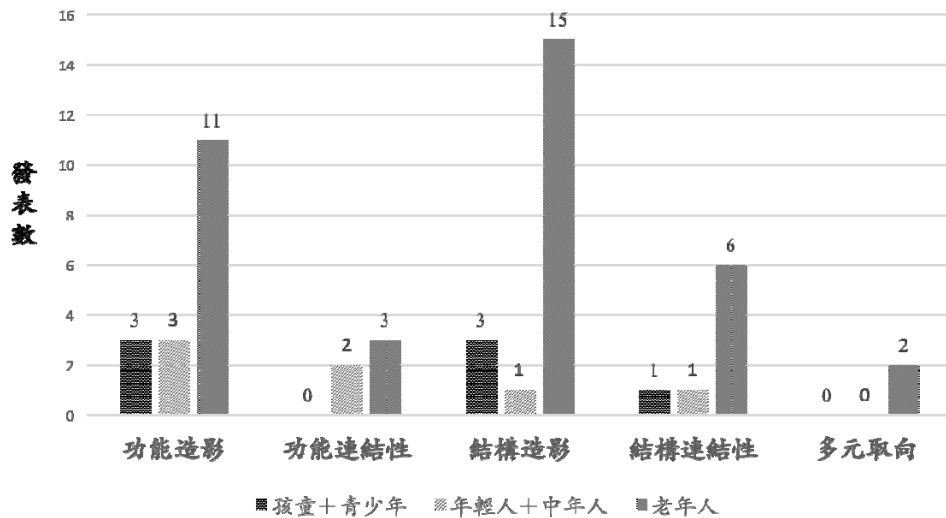


圖 2 身體活動與大腦健康之研究：以不同分析取向與不同族群進行區分。

註：引用至 Voelcker-Rehage and Niemann (2013) 之回顧性文獻。

然而，目前國內以 MRI 研究探討身體活動如何影響老化大腦與認知功能尚少。雖有部分研究回顧，然多聚焦於大腦結構的相關研究（吳治翰、齊璘、張育愷，2015；張育愷、祝堅恆、王俊智、楊高騰，2013），在身體活動與大腦功能之回顧較為缺乏，亦即，相較於國外研究已在該議題上近年之諸多著墨，國內相關研究仍屬於初始階段。另外，猶如過去研究之發現，身體活動與身體適能可能對老化大腦功能產生不同影響，因此本文亦嘗試提出改善老化大腦功能之相關處方與策略。有鑑於此，本文嘗試統整國外的老化研究相關文獻，主要聚焦族群設定在年齡為 65 歲以上之老年族群，且亦包含與認知相關神經性退化疾病（如：阿茲海默症、輕微認知障礙），並以功能性磁共振造影（functional MRI, fMRI）取向探討身體活動對大腦功能之影響。另有鑑於靜息態功能性磁共振造影（resting-state fMRI, RS-fMRI）與作業相關功能性磁共振造影（task-based fMRI, TB-fMRI）為探討 fMRI 之主要取向，因此本研究回顧亦將以此研究為回顧聚焦。具體而言，本文首先會針對此兩 fMRI 技術進行簡介與其在認知神經老化研究上之應用；其後統整相關文獻探討身體活動對大腦功能之影響，並整合各個研究之實驗設計與研究結果；最後再對整篇回顧進行總結與提出未來可行性之方向，期望透過該回顧能提供國內學界日後在此議題研究之參考依據。

## fMRI 介紹與應用

功能性磁共振造影（fMRI）是藉由測量大腦區域神經活動所引發的血氧濃度相依對比（blood-oxygen-level-dependent, BOLD）訊號，進而推論與行為表現或認知功能有關大腦活動的功能性神經造影技術。一般認為，BOLD 訊號與個體面對外在環境刺激時大腦做出適當神經反應（neural response）有關，例如：呈現與臉孔特徵有關的視覺作業刺激時，人類大腦枕葉腹側區域會引發比一般視覺作業刺激較高的 BOLD 訊號，藉此可推論這些腦部區域與臉孔辨識高度有關（Kanwisher, McDermott, & Chun, 1997）。在 fMRI 之應用上，主要可分為靜息態功能性磁共振造影與作業相關功能性磁共振造影兩種研究取向。本文以下即針對該兩種功能性磁共振造影研究取向進行簡要介紹。

## 一、靜息態功能性磁共振造影研究取向

RS-fMRI 係指個體處於生心理安靜狀態下，測量低頻（low-frequency, 0.01-0.1Hz）BOLD 訊號觀察內因性（endogenous）的大腦神經活動（Lowe, Mock, & Sorenson, 1998），並以計算模型評估大腦不同區域間的功能性連結狀態。在典型 RS-fMRI 掃描時，研究對象必須將眼睛閉上或觀看無意義的視覺刺激，並處於無特定主題思考的放空狀態，但需避免入睡。以 RS-fMRI 分析了解大腦功能連結的研究，Biswal, Yetkin, Haughton, and Hyde (1995) 首次指出大腦左側與右側的感覺運動聯合皮質區（somatomotor cortices）之間有較高的之相關性（coherence），顯示不同大腦區域在沒有任何特定外在感官或認知刺激出現，仍保持功能相互連結與傳遞神經訊號的生理狀態。

近幾年 RS-fMRI 的研究亦著墨於老化相關研究（Chen et al., 2016; Kawagoe, Onoda, & Yamaguchi, 2017; Lee & Hsieh, 2017），或輕微認知障礙（mild cognitive impairment MCI），以及阿茲海默症等神經相關疾病等族群（Brier et al., 2012; Qi et al., 2010）。以 RS-fMRI 取向應用於健康或病理老化的研究，諸多文獻已指出大腦網絡功能性連結下降，可能反映大腦功能老化程度的指標（Greenwood, 2007; Reuter-Lorenz & Lustig, 2005; Supekar, Menon, Rubin, Musen, & Greicius, 2008）。在 RS-fMRI 的研究發現，常見大腦功能性連結網路有預設模式網絡（default mode network, DMN）、前額葉執行網路（frontal-executive network, FEN）與額頂葉注意力網路（frontal-parietal network, FPN）等（Joo, Lim, & Lee, 2016）。其中，DMN 係指大腦較多時間處於預設模式（default mode），當個體無外在作業處理要求（external processing demands）或休息狀態時，其某些大腦網路仍保持警醒狀態、並呈現較高活動，以因應即將可能出現的認知作業或環境刺激的改變（Greicius, Krasnow, Reiss, & Menon, 2003）。被歸為 DMN 的常見大腦區域包含後扣帶回（posterior cingulate cortex, PCC）延伸至楔前葉（precuneus）、側頂葉（lateral parietal regions），及內側前額區（medial prefrontal regions）等解剖位置（圖 3）。目前已有多篇 RS-fMRI 應用於大腦功能老化的研究發現，隨著年齡增加，大腦前側與後側區域間的功能性連結會顯著降低（Andrews-Hanna et al., 2007; Damoiseaux et al., 2008），顯示老化影響大腦功能性連結的強度。RS-fMRI 取向的相關研究仍在起步階段，未來的研究可以逐步探討老年大腦功能性連結網路程度的降低，是否與相關認知功能，例如：注意力（attention）、資訊處理（information processing），以及工作記憶（working memory）等日常認知能力（Park et al., 1996; Salthouse & Ferrer-Caja, 2003）的衰退有關。

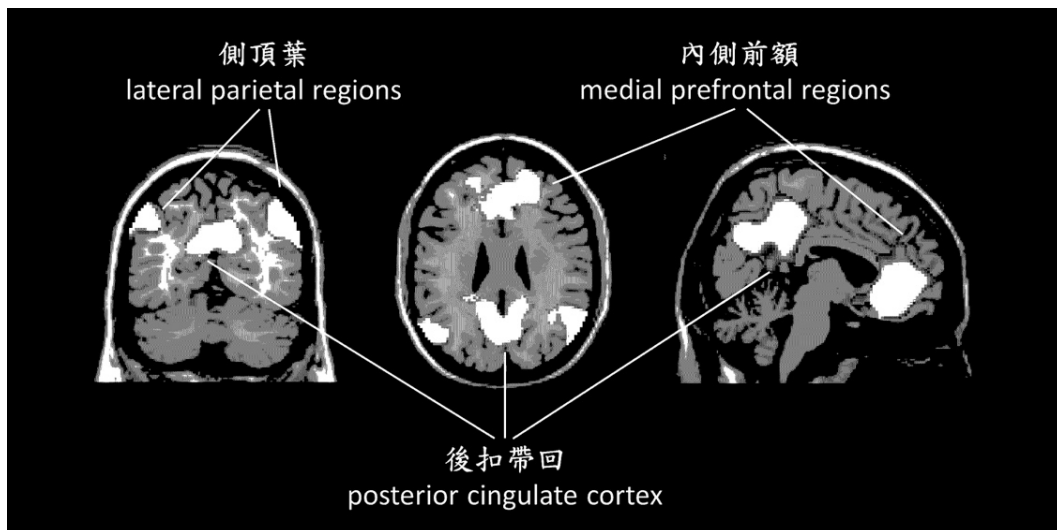


圖 3 靜息態功能性磁共振造影的預設模式網絡相關大腦區域

註：左方為腦造影冠狀面、中間為軸狀面，右方為矢狀面。

## 二、作業相關功能性磁共振造影研究取向

不同於 RS-fMRI，TB-fMRI 取向結合認知心理學的實驗研究典範設計，在進行功能性磁共振造影掃描的同時，提供研究對象認知行為作業或感官知覺刺激，並測量特定大腦區域神經元活動所引發的血氧濃度變化，進而推論與行為表現或認知功能有關的神經機制。在認知神經科學研究上，其認知作業設計可區分：區組設計 (block design) 與事件相關設計 (event-related design) (圖 4)。區組設計是在 fMRI 實驗進行時，每種實驗情境刺激以群組型態 (每個區組時間約 20-40 秒) 呈現，用來提高訊雜比 (signal-to-noise ratio) 並增加統計檢定能力。而事件相關設計則採取不同實驗情境穿插出現 (interspersed) 型態，每個實驗試驗 (trial) 以隨機方式呈現，用以維持每個試驗的訊號特性，也避免研究對象預測實驗情境並產生行為適應。

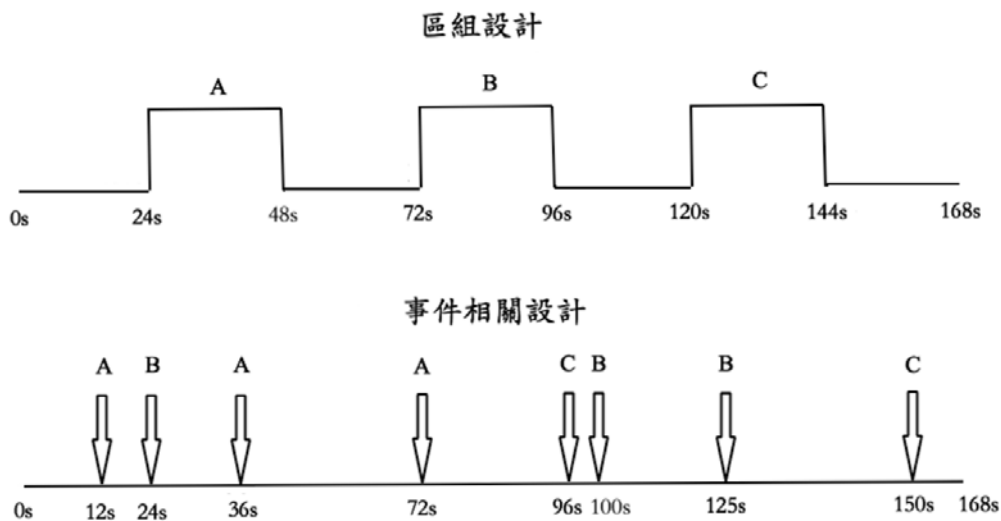


圖 4 區組設計範式與事件相關範式圖

註：兩取向皆為 168 毫秒，區組設計範式為每 24 毫秒出現刺激，而事件相關範式則以隨機出現刺激。

過去數十年來，TB-fMRI 取向已廣泛應用於研究正常與病理老化議題，例如：輕微認知障礙族群 (Pihlajamaki, Jauhiainen, & Soininen, 2009)、阿茲海默症族群 (Pihlajamaki & Sperling, 2009)、正常老化 (normal aging) (Calautti & Baron, 2003; Pantano et al., 2002; Ward & Frackowiak, 2003)，甚至是橫跨不同人類生命週期的整合性討論 (Sperling, 2007)。過去文獻指出，相較於正常老化族群，輕微認知障礙或阿茲海默症者在執行記憶相關作業時，海馬迴功能均呈現較低的活化程度 (Pariante et al., 2005; Sperling et al., 2003)。除了神經性退化相關疾病外，年齡增加亦會減弱大腦功能。例如：Kleerekooper et al. (2016) 為瞭解老化與抑制控制認知能力之大腦功能的關聯，招募了 73 位年齡介於 30 至 70 歲之健康成年人，以 TB-fMRI 取向探討當研究對象進行停止訊號作業 (stop-signal task) 時大腦的活化反應。停止訊號作業常用於檢驗一般人的抑制執行功能，研究對象除要以快速反應刺激外，另還需抑制習慣性反應。研究結果發現，年齡與反應時間呈現正相關，意即年紀愈大，反應抑制能力較低。而在大腦活化反應上，發現年齡與右側額下回 (right inferior frontal gyrus) 有顯著負向關聯，意即年紀愈大，神經活化程度愈低。這項研究結果說明年齡增加不僅認知功能會下降，且其大腦功能亦有減弱趨勢。必須注意的是，許多研究也發現，正常老年族群無論是在測量語言、工作記憶、動作控制、注意力，及抑制功能等不同認知作業，其大腦的

活化程度比年輕人較高，尤其是前額葉和頂葉區域（Dennis & Cabeza, 2008; Huang, Polk, Goh, & Park, 2012; Park & Reuter-Lorenz, 2009），反應的可能是因為大腦功能減弱而導致的功能補償效應（compensation）。

### 三、身體活動與相關指標間之應用

綜合上述兩種功能性核磁共振照影取向，認知神經科學相關研究已將之應用老化認知功能之探討。若要將之使用於身體活動與 RS-fMRI 大腦功能之相關研究，DMN 大腦網絡或特定腦區連結性可視為身體活動與改善大腦功能之相關指標。另外，TB-fMRI 的相關研究發現，認知功能老化與特定大腦區域活動下降有關。其中，大腦前額葉、海馬迴，以及頂葉腦區受老化認知功能影響頗大，身體活動是否能增加該些區域之大腦活動，值得後續研究持續探討。

## 身體活動與大腦功能：RS-fMRI 取向

本節將回顧以 RS-fMRI 取向探討高齡者的身體活動與大腦功能之關聯。在實驗設計區分上，分為橫斷式研究（cross-sectional study）與縱貫式研究（longitudinal study）討論，並就心肺適能、太極拳，及阻力健身運動（resistance exercise）等個面向進行探討。

### 一、橫斷式研究

#### （一）心肺適能

心肺適能為身體適能的主要類別之一，其係透過有氧健身運動（aerobic exercise）增加心臟的帶氧能力。其中，最大攝氧量（VO<sub>2</sub> max）為廣泛量測心肺能力之方式，該指標與大腦功能之關聯已有研究所聚焦。例如：Voss, Erickson, et al. (2010) 以 RS-fMRI 取向探討心肺適能與 DMN 大腦功能的關聯。該研究招募 120 位老年人（平均年齡 66.5 歲）與 32 位年輕人（平均年齡 24.1 歲）進行實驗。所有參與者不僅接受 fMRI 掃描，亦接受最大攝氧量的量測來評估個體心肺適能程度。首先，該研究結果支持年齡相關 DMN 大腦連結性之差異：相較於年輕人，老年人在後扣帶回（posterior cingulate cortex）、中額回（middle frontal gyrus）、前中額葉皮質（frontal medial cortex）、雙側中顳葉回（bilateral middle temporal gyri），以及雙側海馬旁回（bilateral parahippocampal gyri）等腦區連結性顯著較低。將心肺適能變項進行個別差異分析後發現，高心肺適能的老年人在後扣帶回與前中額葉區間、中顳葉回與左中額回間、以及左中額回與前中額葉皮質間的功能性連結有顯著提升，提供了心肺適能可能有效改善老化大腦在大腦區域間功能性連結的研究證據。

#### （二）太極拳

太極拳為一種建立在中國哲理的身心健身運動型態（mind-body exercise），由於其特殊的運動形式與促進身心健康之連結，此運動已受到學界較大重視。近年太極拳與認知功能之關聯亦開始被探討，目前已有許多太極拳如何影響認知功能模之提出，提供該正向連結可能之連結（Chang, Nien, Chen, & Yen, 2014; Chang, Nien, Tsai, & Etnier, 2010）。

Wei, Dong, Yang, Luo 與 Zuo (2014) 以橫斷式研究比較太極拳組（研究人數 22 位；年齡 52.1 歲；運動經驗約 14.6 年）與控制組（研究人數 18 位；年齡 54.8 歲；均無運動經驗）在大腦局部功能一致性（functional homogeneity）是否受到太極拳長期訓練的影響。該研究除了讓參與者實施 RS-fMRI 檢測外，亦量測注意力網絡作業（attention network test, ANT）。結果發現，相較於控制組，太極拳組在右側中央溝後側腦回（right post-central gyrus）（動作感覺腦區）展現較高的局部功能一致性，顯示太極拳經驗有助於整合來自不同感覺動作相對應的大腦區域；此外，太極拳組也發現左側前扣帶回皮質區（left anterior cingulate cortex）與右背外側前皮質區（right dorsal lateral

prefrontal cortex) (注意力控制相關腦區) 展現較低的大腦局部功能一致性, 此亦顯示太極拳強化了注意力相關腦區的運作。後續回歸分析更進一步指出, 這些局部腦區功能一致性的程度可以預測 ANT 作業的表現。這些結果揭示了太極拳運動不僅能增進老年人在運動控制與感官知覺腦區功能, 亦能有效增強專注力表現。這項老年研究結果提供了特定身體活動如何藉由大腦功能性連結的變化, 進而影響高齡者認知表現的神經機制證據。

## 二、縱貫式研究

### (一) 心肺適能／有氧訓練

除上述橫斷式研究已開始進行 DMN 探討外, Voss, Prakash 等人 (2010) 更進一步以長期性身體活動介入檢驗心肺適能是否可增進 DMN、FEN, 及 FPN 等大腦功能性連結等網絡的強度。具體來說, 個體之心肺適能提升係透過多次身體活動累積, 進而探討其在大腦網絡功能性之變化。該研究共招募 32 名年輕人與 75 名老年人, 以隨機方式將老年人分為有氧健身運動組與控制組。有氧健身運動組係以 1 年心肺功能訓練進行, 而控制組則以相同介入時間進行柔軟度或平衡訓練。所有參與者於前測、介入後 6 個月, 及介入後 12 個月進行 RS-fMRI 掃描。由於過去研究指出, 增加大腦連結性與改善執行功能有關 (Andrews-Hanna et al., 2007), 因此該研究亦量測執行功能作業, 以瞭解大腦功能與執行功能之關係。

在 RS-fMRI 結果發現, 兩組別於介入 6 個月後無任何顯著差異。然介入 12 個月後, 相較於控制組, 有氧健身運動組有顯著較高的 DMN 與 FE 功能連結性 (圖 5)。這項結果建議心肺適能訓練介入時間長度亦扮演重要因素, 心肺適能訓練需維持 12 個月時間, 才可能有效促進前額、頂葉、及顳葉間之大腦網絡功能連結性。另值得注意的是, 老年人經心肺適能訓練後, 產生與年輕人組類似之 DMN 與 FE 大腦網絡之連結性, 意味著身體活動或許可減緩大腦功能老化。此外, 後續相關分析也發現, 大腦功能連結性與執行功能有關, 顯示提升大腦功能連結性在老年人執行功能表現的改善上扮演重要角色。

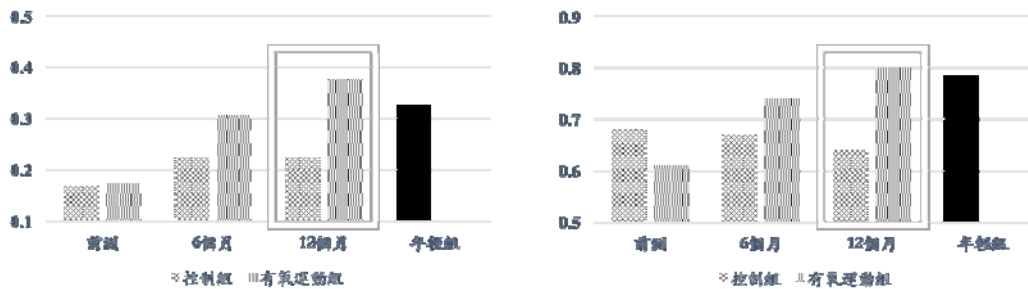


圖 5 有氧運動與控制組在大腦連結性之比較

註：橫軸代表不同介入時間；縱軸代表大腦連結性數值，顯著值為  $p < 0.05$ 。

左圖：DMN 網絡；右圖：FE 網絡。

不同於過去研究, Burdette 等人 (2010) 則聚焦於不同大腦區域的探討, 並發現心肺功能與海馬回功能連結性之關聯。該項研究共招募 80 位 70 至 85 歲之老年人, 以隨機分派的實驗設計分為身體活動組與控制組。身體活動組係以每週進行 150 分鐘心肺功能訓練為主, 而控制組則係以健康教育演講或輕度肌力訓練 (stretching training) 為主。經 4 個月介入訓練後, 兩組別進行大腦血流量 (cerebral blood flow, CBF) 與 RS-fMRI 之量測。CBF 的結果發現, 相較於控制組, 健身運動組在海馬回區域有顯著較高大腦血流量。而 RS-fMRI 結果則發現, 相較於控制組, 身體活動組展現出海馬回腦區與前扣帶回 (anterior cingulate cortex) 之間較高的功能性連結。由於認知神經科學



相關研究已顯示，海馬回腦區（掌管記憶與空間能力）受年齡老化影響甚大（Raz, Rodrigue, Head, Kennedy, & Acker, 2004），這項研究發現可作為身體活動有效改善大腦功能老化，特別是長期記憶與空間能力之直接證據。

值得注意的，許多身體活動能改善大腦功能的機制已被提出。動物實驗發現，身體活動能促進細胞外神經營養物（extracellular neurotrophin）的生成（Neeper, Gomez-Pinilla, Choi, & Cotman, 1996），例如腦源性神經滋養因子（brain-derived neurotrophic factor, BDNF）或神經生長因子（nerve growth factor）等。這些神經滋養因子可增進突觸連結可塑性（synaptic plasticity），並有效改善認知功能（Creer, Romberg, Saksida, van Praag, & Bussey, 2010; Pereira et al., 2007）。不僅如此，神經滋養因子與大腦健康亦有其關聯性。舉例來說，經心肺適能訓練之老年人，不僅提升大腦 BDNF 濃度，亦使大腦海馬迴區域產生變化（Erickson et al., 2010），顯示身體活動、BDNF、及大腦健康之關聯性。Voss et al. (2013) 進一步確認高心肺適能可提升 RS-fMRI 之連結性，而該效益受到 BDNF 提升所調節。另外，相似結果亦在後續研究獲得支持（Byun & Kang, 2016; Driscoll et al., 2012），顯示神經營養物質滋養因子可能是身體活動影響大腦功能之重要機制之一。

## （二）太極拳與阻力健身運動訓練

實證性研究亦以縱貫式研究針對太極拳訓練進行探討。Tao 等人（2016）招募 62 名介於 50 至 70 歲之健康老年族群，以隨機實驗分派方式分為身體活動組與控制組。而身體活動組又再分類為太極拳與八段錦（保健氣功）訓練，介入時間共 12 週、每週 5 次、每次 60 分鐘，而控制組則不進行任何身體活動介入。RS-fMRI 研究結果發現，相較於控制組，兩組身體活動組在前額葉與海馬迴之間的大腦功能性連結強度均顯著增加。類似結果亦在後續研究得到支持，近期 Li 等人（2014）以 6 週太極拳結合認知訓練與團體諮商，探討其在大腦功能之影響。結果發現，相較於控制組，太極拳結合其他訓練能顯著提升前額葉與顳葉之間的大腦功能性連結。類似實驗設計，Zheng 等人（2015）的研究則發現，太極拳結合認知訓練與團體諮商亦可提升認知功能表現，且進一步發現該結合訓練可增進前顳葉回、中顳葉回與後小腦腦區的功能性連結性強度。該研究之後續分析更發現，增進大腦功能連結性與改善認知表現有其關連性，進一步確認身體活動、大腦功能，及認知功能間之關聯，以及對健康老化族群的正面效益。

此外，亦有研究以阻力健身運動型態探討其對大腦或認知功能的影響。阻力健身運動亦稱為重量訓練（weight training），其係增進骨骼肌肉組織的活化為主要目的。過去已有回顧性文獻指出，阻力健身運動能有效增加老年認知功能表現（Chang, Pan, Chen, Tsai, & Huang, 2012）。然而，阻力健身運動對大腦功能則有多樣化之結果，例如 Suo, Singh, Gates, Wen 與 Sachdev (2016) 並未發現阻力健身運動的介入訓練可改善大腦功能的研究結果。該研究共招募 100 位健康老年人（平均年齡：70.1 歲），將所有老年人分為阻力健身運動與認知訓練組、阻力健身運動訓練與觀看影片組、認知訓練與肌肉伸展組、及觀看影片與肌肉伸展組等四組。6 個月介入訓練前、後，所有參與者均進行整體認知功能評估測驗、大腦結構磁共振造影掃描，以及大腦功能性連結掃描。研究結果發現，包含阻力健身運動之群組均可改善整體認知功能，並且有效提升後扣帶回區域的大腦體積。不過，該研究僅發現包含認知功能訓練之群組則可增加海馬迴與前額葉大腦區域間的功能性連結，然在阻力健身運動並沒有發現任何顯著效益。這項研究結果建議阻力健身運動影響大腦結構，而認知訓練則對大腦功能效益較為敏感。該結果或可說明不同介入方式對促進大腦功能的效益有所不同，然目前聚焦在阻力健身運動與大腦功能的研究仍然較少，未來需要進行不同運動型態的磁共振造影研究，確認不同身體活動型態對老年大腦的影響，作為將來發展與設計高齡者適合的身體活動型態的參考。

## 身體活動與大腦功能：TB-fMRI 取向

本節以 TB-fMRI 取向探討身體活動對老年大腦功能的影響，並分為橫斷式與縱貫式研究探討。在橫斷式研究設計上，研究以心肺適能或身體活動量為主。而在縱貫式研究設計上，研究則以心肺適能訓練或認知型身體活動介入模式為主，進而探討這些身體活動訓練型態對老化大腦功

能的影響。雖然 TB-fMRI 取向可區分為區組設計與事件相關設計，不過在身體活動與大腦功能相關研究上多採取事件相關設計為多，其原因係避免實驗參與者對認知刺激產生適應而使得無法量測個體認知功能之可能。

以下即針對每篇研究之研究方法、實驗結果，以及可能的認知神經機制進行討論。

## 二、橫斷式研究

### (一) 心肺適能

Colcombe、Kramer、Erickson 等人 (2004) 是首篇以 TB-fMRI 取向探討心肺適能如何影響老化大腦功能的研究。該研究分別以橫斷式與縱貫式兩種實驗設計進行研究。在實驗一，他們先以橫斷式研究量測 41 名健康老年人的心肺適能，並在功能性磁共振造影掃描同時請研究對象進行旁側抑制作業 (flanker task) 量測大腦血氧濃度變化。旁側抑制作業是一項常用來檢驗抑制執行功能 (executive function) 高低的認知心理學作業；此作業可分為一致性 (congruent) 與不一致性 (incongruent) 兩種實驗情境。過去的行為研究指出：研究對象按鍵判斷不一致性實驗情境時，為避免犯錯則需要較高抑制執行能力，比起一致性實驗情境將導致更高的錯誤率與較慢的反應時間。Colcombe 與同儕的研究結果指出，相較於低心肺適能者，高心肺適能老年人在旁側抑制作業的不一致性實驗情境上展現較佳的抑制衝突控制能力。此外，高心肺適能老年人的大腦在 TB-fMRI 結果上也發現有顯著增加的右側中額回、中央前額回 (superior frontal gyrus)、前頂葉 (superior parietal lobes) 等大腦區域的功能活化，且前扣帶回的區域活化較低。

在實驗二，該研究則以 6 個月的心肺適能介入訓練，以縱貫式研究設計探討對老年大腦功能的直接影響。研究結果與實驗一相似，也發現高心肺適能的老年人有顯著較佳的抑制執行功能。此外，這些老年人的大腦功能上也與實驗一的活化結果相似。該研究以兩種實驗設計進行，同時發現心肺適能可以有效增加前額葉與頂葉等注意力控制相關大腦區域的功能活化，提供了心肺適能介入與訓練對老年大腦功能有正面效益的直接證據。

使用不同執行功能認知作業，Prakash 等人 (2011) 則以史初普叫色作業 (Stroop task) 探討心肺適能與老年大腦功能的關聯。叫色作業是一種常用來測量個體抑制控制能力的執行功能作業，其方法主要係讓研究對象針對視覺呈現目標字的「顏色」(例如：紅、綠、及藍色) 進行按鍵或口頭反應，同時抑制目標字本身提供的「意義」。史初普叫色作業同樣也包含一致性實驗情境 (顏色與字義相同)、中性 (neutral) 情境 (以無關顏色的字呈現)，及不一致性實驗情境 (顏色與字義完全不同)。該研究控制 70 位老年人之年齡、性別、教育，及口語智力後，行為結果發現心肺適能與不一致實驗情境的反應時間有顯著負相關 ( $p = -.20$ )。這項結果意味著兩個重要發現：第一，高心肺適能老年人有較佳的抑制控制認知能力；第二，相較於簡單情境 (意即一致性實驗情境)，心肺適能的正向影響在困難情境 (意即不一致性的實驗情境) 的效益更為顯著。另在大腦功能活化的觀察，TB-fMRI 的研究結果指出高心肺適能老年人有顯著較多的大腦前額葉區域的神經活化，顯示高心肺適能老年人展現了較高的大腦活動模式，因此在執行複雜認知功能作業時，可以有效提供更多的大腦認知資源來處理。

除抑制執行功能外，雙重作業 (dual-task) 在近年研究亦受到許多關注。該作業包含認知協調、注意力維持，及資訊整合等高階認知的執行功能，過去統合分析 (meta-analysis) 指出雙重作業受到認知老化的影響很大 (Verhaeghen, Steitz, Sliwinski, & Cerella, 2003)。因此，Wong 等人 (2015) 設計了數字與英文字母雙重作業的 TB-fMRI 實驗來探討心肺適能如何影響雙重作業表現與老年大腦的活化情形。該研究招募了 128 位 59 歲至 80 歲的健康老年為研究對象，在控制了年齡、性別、教育，以及大腦體積之後，其研究結果發現高心肺適能老年人在前扣帶回/動作輔助區 (supplementary motor area, SMA)、視丘 (thalamus)、基底核 (basal ganglia)、雙側感覺皮質區 (somatosensory area)，以及中前額葉回等大腦區域呈現較高的功能活化。此外，前扣帶回/動作輔助區的大腦活化程度與雙重作業的行為表現有顯著正相關。而中介分析結果則進一步指出，心肺

適能與雙重作業行為表現皆受到前扣帶回／動作輔助區的大腦活化調節，顯示心肺適能對老年人維持認知協調、注意力等高階認知功能上有正面影響。

然而，有些 TB-fMRI 研究並沒有發現特殊族群在心肺適能的正面效益。例如，Vidoni 等人（2013）招募 34 位年齡介於 60 至 85 歲的老年人，其中包含 16 位阿茲海默症老年人與 18 位一般老年人。該 TB-fMRI 研究以叫色作業探討心肺適能是否影響神經退化性疾病患者的大腦功能。研究結果支持過去的發現：健康老年人心肺適能與中前額葉的大腦活化有正相關，且與前扣帶回的大腦活化有負相關。不過，在阿茲海默症老年人卻沒有發現心肺適能與大腦功能活化的明顯關聯。探討心肺適能對與老化疾病之間的關聯仍須較多研究支持。然而，由於神經退化性疾病的患者多伴隨著認知功能的嚴重退化，受限於這些研究對象是否能有效執行受測的認知作業（例如：旁側抑制作業、史初普叫色作業、雙重作業）。以研究結果而言，本文認為雙重作業難度應用於特殊老年族群上，相對較為困難。

## （二）身體活動量

為了解身體活動量與老年大腦功能的關聯，Kimura、Yasunaga 與 Wang（2013）招募 72 位年齡介於 60 至 79 歲健康老年人參與 TB-fMRI 實驗。這群老年研究對象在進行身體活動時，會配戴智慧型穿戴裝置，以紀錄 3 個月內每日的行走步數與運動強度/時間（exercise intensity/duration）等身體活動量之資訊。該研究使用任務轉換（task-switching）作業，進而探討研究對象之大腦功能。作業轉換任務也是一種測量執行功能的認知作業，但是特別強調認知彈性（cognitive flexibility）在執行功能的重要性。在任務轉換的作業中，研究對象需快速轉移注意力至不同作業任務上。研究結果發現，老年人每日身體活動量的時間與強度，可以預測任務轉換作業的行為表現。而在大腦功能活化的結果：每日少於 26.4 分鐘中等強度身體活動的老年人，觀察到有左側前額葉與頂葉區域的大腦活化；而每日高於 26.4 分鐘身體活動的老年人，更觀察到左右兩側大腦的背側前額葉皮質區（bilateral dorsolateral prefrontal cortex, DLPFC）皆有顯著大腦活化。再進行兩群組比較後，相較於低於 26.4 分鐘者，高於 26.4 分鐘身體活動量者仍展現較活躍的左右兩側大腦背側前額葉皮質區活動，顯示高活動量老年人有較高的認知彈性運用與大腦資源來因應執行功能作業所需的認知挑戰。此外，為了瞭解日常生活規律性的身體活動，是否能有效延緩大腦功能老化，Zlatař 等人（2013）招募年輕與老年族群共同參與研究。依身體活動量分為規律身體活動的老年人組（3 年運動習慣：每週 3 次；每次 45 分鐘）、坐式生活習慣的老年人組，及年輕人之對照組。TB-fMRI 採用語意流暢作業（semantic fluency test）探討老年大腦活化情況。語意流暢作業主要用來量測語言表達與語意記憶的能力。研究結果發現，規律身體活動的老年人與年輕人大腦活化的狀況相似，顯示規律身體活動係可延緩因年齡導致大腦功能衰弱的現象；此外，與規律身體活動的老年人組比較，坐式習慣生活的老年人呈現較低注意力相關腦區的活化，顯示坐式習慣生活對老年人大腦有負向影響。上述研究皆提供了相關證據支持身體活動量對老化大腦功能的正面效益，此結果可提供高齡化社會改善老化大腦功能的身體活動處方參考，將有助於以預防醫學的積極觀點推廣活躍老年、降低失能風險並提高身心健康。

此外，身體活動量與老化大腦功能研究，近年來亦有結合基因型態探討研究。分子醫學的研究已經有明確的證據指出，若攜帶有 APOE-ε4 的基因型（Apolipoprotein E-ε4），個體於 60 歲後有極高的風險將罹患阿茲海默症（Kim, Basak, & Holtzman, 2009）。為瞭解身體活動是否能減緩基因型 APOE-ε4 對與大腦認知功能的負向影響，Smith, Nielson, Woodard, Seidenberg, Durgerian 等人（2011）招募介於 65 至 85 歲的健康老年人，並依照基因型態與身體活動量分為低風險／低身體活動量、低風險／高身體活動量、高風險／低身體活動量，及高風險／高身體活動量等四個組別，探討基因型態與身體活動量兩者的交互作用。研究對象在 TB-fMRI 實驗中進行名人姓名辨認作業（famous name recognition task），該作業分為熟悉與不熟悉實驗情境，主要用來量測個體的語意記憶能力。結果發現，高風險/高身體活動組在熟悉實驗情境時，比較起其餘三組，觀察到顯著的大腦功能活化。這項研究結果建議，身體活動可以改善基因型態風險對老年大腦功能的影響，且身體活動對高風險之老年人似乎效果較大。

除正常老年族群外，亦有研究探討身體活動如何改變神經退化性疾病老化族群的大腦功能。Smith、Nielson、Woodard、Seidenberg、Verber 等人（2011）以 MCI 老年族群作為研究對象，依身體活動參與情形分為低身體活動組（ $n = 9$ ，每週進行 2 天或少於 2 天低強度健身運動）與高身

體活動組 ( $n = 9$ , 每週進行 3 天或高於 3 天中至高強度健身運動)。研究對象在 TB-fMRI 實驗中採用語意記憶測驗, 被要求需分別回憶 30 組名人姓名與 30 組一般姓名。研究結果顯示, 相對於低身體活動組, 高身體活動組在左腦尾狀核 (left caudate) 有顯著較高的大腦活化。該結果不僅支持過去身體活動量能有效延緩老化大腦功能的研究, 並將此正面效益延伸至認知老化疾病相關的族群。

### 三、縱貫式研究

#### (一) 心肺適能／有氧訓練與協調訓練

Voelcker-Rehage、Godde 與 Staudinger (2011) 運用 TB-fMRI 實驗探討不同身體適能訓練對老化大腦功能的影響。該研究是首次以縱貫式研究設計取向, 直接比較不同身體適能指標與老化大腦功能的關連, 並聚焦於年齡介於 62 至 79 歲之老年人, 以隨機分配至心肺適能訓練組、協調訓練組, 及控制組。心肺適能訓練組以慢跑身體活動為主, 起初介入時間長度為 35 分鐘, 並於三個月後延伸至 45 至 50 分鐘; 協調訓練組則以複雜動作訓練為主, 例如: 身體平衡、手眼協調、肢體協調、空間訓練、以及動作反應等; 而控制組則進行放鬆練習與基礎肌力訓練。該研究分別在前測、訓練介入後 6 個月、以及訓練介入後 12 個月等三個時間點測量旁側抑制作業。研究結果發現, 兩組身體活動組在 12 個月的介入訓練後, 在旁側抑制作業的行為表現上有顯著較佳的正確率。而 TB-fMRI 的結果顯示, 心肺適能訓練組與協調訓練組兩組分別於 6 或 12 個月介入後, 在前額葉、頂葉, 及動作皮質區的大腦活化有顯著提高。此外, 心肺適能訓練組與感覺動作控制有關的腦區有顯著活化, 而協調訓練組在視覺空間處理相關的腦區有較高的活化, 顯示兩種訓練型態對於大腦功能皆有正面效益, 而訓練型態不同對於老化大腦功能的影響也不盡相同。

此外, Smith 等人 (2013) 更進一步運用 TB-fMRI 實驗, 以縱貫式研究設計進行 12 週健身運動介入訓練, 探討心肺適能訓練是否對 MCI 老年族群的大腦功能有正面效益。該研究的身體活動介入訓練模式以慢跑健身運動為主, 訓練內容為每週 4 次、每次 30 分鐘的模式, 且每次訓練強度皆會達到 50 至 60% 儲備心跳率。該研究招募 17 位 MCI 老年族群與 18 位健康老年人進行姓名辨識作業。結果發現, 相較於前測, MCI 老年族群與健康老年人於 12 週的介入訓練心肺適能功能約提升了 10%; 而 TB-fMRI 的結果發現, 雖然 MCI 老年族群於前測時有較低的大腦活化表現, 但介入訓練後, 與正常老年人的大腦功能活化已無差別。這項研究結果顯示 MCI 老年族群經過適當的身體活動介入訓練後, 也與健康老年人同樣展現了改善老化大腦功能的正面效果。

#### (二) 認知性身體活動訓練

認知性身體活動訓練是在身體活動訓練內容中搭配認知需求 (cognitive demand)。近年 Nishiguchi 等人 (2015) 使用 TB-fMRI 實驗, 探討認知性身體活動介入訓練對老年大腦功能的影響。該研究以隨機分配方式將 48 名老年人分為 24 名身體活動組與 24 名控制組。身體活動組參與了為期 12 週的訓練課程, 每次課程包含 15 分鐘基礎肌力訓練、15 分鐘進階肌肉訓練, 及 60 分鐘混合訓練。其中, 混合訓練內容更在身體活動訓練中, 結合口語流暢作業, 或利用數字搭配身體活動 (例如: 1 = 右手肩膀、2 = 左手肩膀等訓練方式)。兩組別於前、後測皆進行 N-back 工作記憶作業搭檢驗大腦執行功能。N-back 工作記憶作業廣泛用於測量執行功能中工作記憶的能力。仔細來說, 研究對象需回憶之前呈現過的視覺刺激 (字母或數字), 並在間隔短暫時間後, 按鍵判斷接續呈現的視覺刺激是否曾經出現過。研究結果發現, 相較於前測, 身體活動組於訓練後, 在行為量測上有顯著較佳的工作記憶表現。而在 TB-fMRI 結果, 相較於前測, 身體活動組於訓練後, 在與工作記憶相關的前額葉腦區大腦活動顯著降低, 顯示大腦有較佳的處理效率。該研究結論指出, 結合認知性的身體活動訓練, 可顯著增進老年人在執行困難認知作業時的大腦活動效率。

## 結論與未來方向

研究文獻回顧後清楚發現，身體活動對老年大腦功能可能扮演重要角色。靜息態功能性磁共振造影研究（RS-fMRI）取向的橫斷式與縱貫式研究都發現，心肺適能對老年大腦功能有顯著正向的影響。具體而言，相較於低心肺適能者，高心肺適能之老年人增進了大腦功能連結性。此外，縱貫式研究也發現太極拳訓練亦可增進許多大腦區域之功能性的連結。不過，該正面效益還未在阻力健身運動訓練上有清楚結論，意味著身體活動型態的選擇也是影響因素之一。綜合來說，本回顧結果建議老年族群可選取提高心肺適能（如慢走）或太極拳等身體活動，進而改善個體大腦健康之可能，可做為高齡社會提升日常生活認知能力參考模式。

另一方面，作業相關功能性磁共振造影（TB-fMRI）研究取向的橫斷式研究發現，心肺適能對老年大腦前額葉區域功能活化有正面影響，顯示高心肺適能之老年人可增進執行功能相關腦區的大腦活動。另外，在縱貫式研究回顧進一步顯示，高心肺適能不僅影響正常老年族群的大腦功能，且該正面效益亦延伸至輕微認知障礙老年族群上。除了心肺適能訓練外，協調性訓練亦增加了大腦功能與活化程度。綜合來說，老年族群不僅可透過心肺適能訓練，或不同身體適能改善老年大腦功能。另外，對於已有認知障礙之族群，亦可透過身體活動而改善大腦功能，這結果有利將身體活動作為認知復健課程之有利證據，我們建議政府單位或醫療院所可以倡導身體活動的訓練方式做為針對神經性退化疾病族群非藥物的治療處方之一。近年始，行動學習裝置已受到各界許多關注（李漢岳、楊介銘、宋曜廷，2017），若能結合身體活動與認知功能的相關設置，或許能視為老年族群進行身體活動之額外輔助。

本篇文獻係國內首篇以 fMRI 回顧方式探討身體活動對高齡者大腦功能的影響。根據這些最新研究的發現，本文提供下列幾項建議與未來方向，或可提供國內未來研究者之參考。其一，目前在老化議題上，僅有少數研究聚焦於神經性退化疾病族群的探討，且過去研究在結論上並不完全一致，未來運動心理學界可與臨床醫學領域合作，探討身體活動訓練作為改善疾患高齡者在認知、生理與心理等面向的可能性。其二，過去研究雖顯示不同身體適能型態可對老年大腦功能有所效益，然該議題目前屬初始階段，仍有許多問題待後續研究進一步釐清。例如：身體適能分為健康相關體適能與技能相關體適能兩種，而目前研究多以健康相關體適能為主軸，較無法釐清何種身體適能型態對大腦功能有最佳效益；若相關研究持續進行，將可以提供身體適能如何提升身心健康的個人化訓練內容，也可作為將來發展與設計高齡者適合的身體活動型態的參考，將有助於身體適能的推展。最後，目前研究多聚焦在探討身體活動與抑制執行功能的關連，然而，老年族群也有短長期記憶、決策判斷與邏輯推理等能力的衰退，這些能力與高齡者是否能日常自主生活息息相關，其他認知類別的影響也是未來研究值得探討的方向，研究成果將有助於以預防醫學的積極觀點推廣活躍老年、降低老化失能風險並提高個人身心健康。

## 參考文獻

- 李漢岳、楊介銘、宋曜廷（2017）：數位學習實驗研究品質評估與現況分析：以行動學習為例。**教育科學研究期刊**，**62**（2），31-60。doi：10.6209/jories.2017.62(2).02。[Lee, H. Y., Yang, J. M., Sung, Y. T., (2017). Quality Assessment and Situational Analysis of Experimental E-Learning Designs: A Case Study of Mobile Learning. *Journal of Research in Education Sciences*, *62*(2), 31-60. doi: 10.6209/jories.2017.62(2).02]
- 王俊智、宋岱芬、祝堅恆、張育愷（2016）：健身運動與認知功能：大腦神經滋養因子調節機制之探討。**應用心理研究**，**64**，95-134。doi：10.3966/156092512016060064004。[Wang, C. C., Song,

- T. F., Chu, C. H., & Chang, Y. K. (2015). Exercise and cognitive function: A BDNF-moderated mechanism. *Research in Applied Psychology, 64*, 95-134. doi: 10.3966/156092512016060064004]
- 王駿濠、蔡佳良 (2017): 四肢發達頭腦卻不簡單—運動員與認知神經功能之研究回顧與展望。 **體育學報**, **50** (2), 119-136。 Doi: 10.3966/102472972017065002001。 [Wang, C. H., Tsai, C. L. (2017). Well-developed limbs and bright brain: A review and prospect of athletes and neurocognitive functioning. *Physical Education Journal, 50*(2), 119-136. doi: 10.3966/102472972017065002001]
- 古博文、陳俐蓉、許志宏 (2016): 老年靜態行為與認知老化之文獻回顧。 **體育學報**, **49** (S), 1-16。 doi: 10.3966/10247297201606490S001。 [Ku, P. W., Chen, L. J., Xu, Z. H. (2016). A review of late-life sedentary behaviors and cognitive aging. *Physical Education Journal, 49*(S), 1-16. doi: 10.3966/10247297201606490S001]
- 宋岱芬、陳豐慈、祝堅恆、齊璘、劉思聰、張育愷 (2017): 肥胖、心血管適能與抑制相關執行功能之關係：事件相關電位研究。 **體育學報**, **50** (1), 43-56。 doi: 10.3966/102472972017035001004。 [Song, T. F., Chen, F. T., Chu, C. H., Chi, L., Liu, S., Chang, Y. K. (2017). Obesity and cardiovascular fitness associated with inhibition of executive function: An ERP study. *Physical Education Journal, 50*(1), 43-56. doi: 10.3966/102472972017035001004]
- 吳治翰、齊璘、張育愷 (2015): 以磁共振成像回顧健身運動與大腦結構之關聯。 **中華體育季刊**, **29** (2), 153-160。 doi: 10.3966/102473002015092902009。 [Wu, C. H., Chi, L. & Chang, Y. K. (2015). A review of magnetic resonance imaging in the relationship between exercise and brain structure. *Quarterly of Chinese Physical Education, 29*(2), 153-160. doi: 10.3966/102473002015092902009]
- 張育愷、祝堅恆、王俊智、楊高騰 (2013): 以磁共振造影取向探討身體活動與神經認知功能老化：回顧與展望。 **教育心理學報**, **45** (1), 83-102。 doi: 10.6251/BEP.20130114。 [Chang, Y. K., Chu, C. H., Wang, C. C., & Yang, K. T. (2013). Exploring the relationship between physical activity and aging of neurocognitive functioning aging: A magnetic resonance imaging approach. *Bulletin of Educational Psychology, 45*(1), 83-102. doi: 10.6251/BEP.20130114]
- 黃植懋、黃緒文、洪蘭、曾志朗 (2014): 健康老年的心智：認知神經科學的觀點。 **中華心理學刊**, **56** (3), 313-334。 doi: 10.6129/CJP.20140708。 [Huang, C. M., Huang, H. W., Hung, D. L., & Tzeng, J. L. (2014). Insights into the healthy aging mind: A cognitive neuroscience perspective. *Chinese Journal of Psychology, 56*(3), 313-334. doi: 10.6129/CJP.20140708]
- 齊璘、陳豐慈、祝堅恆、王俊智、張育愷 (2014): 男大專生身體適能與認知功能之關聯。 **大專體育學刊**, **16** (3), 311-320。 [Chi, L., Chen, F. T., Chu, C. H., & Chang, Y. K. (2014). Relationship

- between physical fitness and cognitive function in male college students. *Sport and Exercise Research*, 16(3), 311-320. doi: 10.5297/ser.1603.005]
- 臺灣臨床失智症協會 (2016)：台灣長期照護機構失智患者之盛行率調查摘要。取自台灣失智症協會網站：[http://www.tada2002.org.tw/tada\\_event\\_detail.aspx?pk=567](http://www.tada2002.org.tw/tada_event_detail.aspx?pk=567)，2017年06月15日。  
[Taiwan Dementia Society. (2016). *A survey about the prevalence of dementia in Taiwan*. Retrieved from website: [http://www.tada2002.org.tw/tada\\_event\\_detail.aspx?pk=567](http://www.tada2002.org.tw/tada_event_detail.aspx?pk=567), 2017/6/15.]
- 豐東洋、黃耀宗、郭正煜、高士竣 (2016)：身體活動量對老年人執行控制功能影響之探討。《體育學報》，49(S)，17-31。doi：10.3966/10247297201606490S002。[Fong, D. Y., Huang, Y. C., Kuo, C. Y., Kao, S. C. (2017). The effect of physical activity on the function of executive control in older adults *Physical Education Journal*, 49(S), 17-31. doi: 10.3966/10247297201606490S002]
- Ahlskog, J. E., Geda, Y. E., Graff-Radford, N. R., & Petersen, R. C. (2011). Physical exercise as a preventive or disease-modifying treatment of dementia and brain aging. *Mayo Clinic Proceedings*, 86(9), 876-884. doi: 10.4065/mcp.2011.0252
- Andrews-Hanna, J. R., Snyder, A. Z., Vincent, J. L., Lustig, C., Head, D., Raichle, M. E., & Buckner, R. L. (2007). Disruption of large-scale brain systems in advanced aging. *Neuron*, 56(5), 924-935. doi: 10.1016/j.neuron.2007.10.038
- Barha, C. K., Davis, J. C., Falck, R. S., Nagamatsu, L. S., & Liu-Ambrose, T. (2017). Sex differences in exercise efficacy to improve cognition: A systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials in older humans. *Frontiers in Neuroendocrinology*, 46, 71-85. doi: 10.1016/j.yfrne.2017.04.002
- Biswal, B., Yetkin, F. Z., Haughton, V. M., & Hyde, J. S. (1995). Functional connectivity in the motor cortex of resting human brain using echo-planar MRI. *Magnetic Resonance in Medicine*, 34(4), 537-541.
- Boraxbekk, C. J., Salami, A., Wahlin, A., & Nyberg, L. (2016). Physical activity over a decade modifies age-related decline in perfusion, gray matter volume, and functional connectivity of the posterior default-mode network-A multimodal approach. *Neuroimage*, 131, 133-141. doi: 10.1016/j.neuroimage.2015.12.010
- Brier, M. R., Thomas, J. B., Snyder, A. Z., Benzinger, T. L., Zhang, D., Raichle, M. E., . . . , & Ances, B. M. (2012). Loss of intranetwork and internetwork resting state functional connections with Alzheimer's disease progression. *Journal of Neuroscience*, 32(26), 8890-8899. doi: 10.1523/jneurosci.5698-11.2012

- Burdette, J. H., Laurienti, P. J., Espeland, M. A., Morgan, A., Telesford, Q., Vechlekar, C. D., . . . , & Rejeski, W. J. (2010). Using network science to evaluate exercise-associated brain changes in older adults. *Frontiers in Aging Neuroscience*, 2, 23. doi: 10.3389/fnagi.2010.00023
- Burzynska, A. Z., Chaddock-Heyman, L., Voss, M. W., Wong, C. N., Gothe, N. P., Olson, E. A., . . . , & Kramer, A. F. (2014). Physical activity and cardiorespiratory fitness are beneficial for white matter in low-fit older adults. *PLoS One*, 9(9), e107413. doi: 10.1371/journal.pone.0107413
- Byun, J. E., & Kang, E. B. (2016). The effects of senior brain health exercise program on basic physical fitness, cognitive function and BDNF of elderly women - a feasibility study. *Journal of Exercise Nutrition and Biochemistry*, 20(2), 8-18. doi: 10.20463/jenb.2016.06.20.2.2
- Cai, Y., & Abrahamson, K. (2016). How exercise influences cognitive performance when mild cognitive impairment exists: A literature review. *Journal of Psychosocial Nursing and Mental Health Services*, 54(1), 25-35. doi: 10.3928/02793695-20151109-03
- Calautti, C., & Baron, J. C. (2003). Functional neuroimaging studies of motor recovery after stroke in adults: A review. *Stroke*, 34(6), 1553-1566. doi: 10.1161/01.str.0000071761.36075.a6
- Cao, W., Luo, C., Zhu, B., Zhang, D., Dong, L., Gong, J., . . . , & Yao, D. (2014). Resting-state functional connectivity in anterior cingulate cortex in normal aging. *Frontiers in Aging Neuroscience*, 6, 280. doi: 10.3389/fnagi.2014.00280
- Cardenas, V. A., Chao, L. L., Studholme, C., Yaffe, K., Miller, B. L., Madison, C., & Weiner, M. W. (2011). Brain atrophy associated with baseline and longitudinal measures of cognition. *Neurobiology of Aging*, 32(4), 572-580. doi: 10.1016/j.neurobiolaging.2009.04.011
- Chang, Y. K., Nien, Y. H., Chen, A. G., & Yen, G. (2014). Tai Ji Quan, the brain, and cognition in older adults. *Journal of Sport and Health Science*, 3, 36-42. doi: 10.1016/j.jshs.2013.09.003
- Chang, Y. K., Nien, Y. H., Tsai, C. L., & Etnier, J. L. (2010). Physical activity and cognition in older adults: The potential of Tai Chi Chuan. *Journal of Aging and Physical Activity*, 18(4), 451-472. doi: 10.1123/japa.18.4.451
- Chang, Y. K., Pan, C. Y., Chen, F. T., Tsai, C. L., & Huang, C. C. (2012). Effect of resistance exercise training on cognitive function in healthy older adults: A review. *Journal of Aging and Physical Activity*, 20(4), 497-516. doi: 10.1123/japa.20.4.497
- Chapman, S. B., Aslan, S., Spence, J. S., Defina, L. F., Keebler, M. W., Didehbani, N., & Lu, H. (2013). Shorter term aerobic exercise improves brain, cognition, and cardiovascular fitness in aging. *Frontiers in Aging Neuroscience*, 5, 75. doi: 10.3389/fnagi.2013.00075
- Chen, P. Y., Chiou, J. M., Yang, Y. F., Chen, Y. T., Hsieh, H. L., Chang, Y. L., & Tseng, W. I. (2016). Heterogeneous aging effects on functional connectivity in different cortical regions: A



- resting-state functional MRI study using functional data analysis. *PLoS One*, *11*(9), e0162028. doi: 10.1371/journal.pone.0162028
- Colcombe, S. J., Erickson, K. I., Scalf, P. E., Kim, J. S., Prakash, R., McAuley, E., . . ., & Kramer, A. F. (2006). Aerobic exercise training increases brain volume in aging humans. *The Journals of Gerontology: Series A, Biological Sciences and Medical Sciences*, *61*(11), 1166-1170. doi: 10.1093/gerona/61.11.1166
- 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.
- Colcombe, S. J., Kramer, A. F., McAuley, E., Erickson, K. I., & Scalf, P. (2004). Neurocognitive aging and cardiovascular fitness: Recent findings and future directions. *Journal of Molecular Neuroscience : MN*, *24*(1), 9-14. doi: 10.1385/jmn:24:1:009
- Crampton, A. (2009). Global aging: Emerging challenges. *The Pardee Papers*, *6*, 1-25.
- Creer, D. J., Romberg, C., Saksida, L. M., van Praag, H., & Bussey, T. J. (2010). Running enhances spatial pattern separation in mice. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *107*(5), 2367-2372. doi: 10.1073/pnas.0911725107
- Damoiseaux, J. S., Beckmann, C. F., Arigita, E. J., Barkhof, F., Scheltens, P., Stam, C. J., . . ., & Rombouts, S. A. (2008). Reduced resting-state brain activity in the "default network" in normal aging. *Cerebral Cortex*, *18*(8), 1856-1864. doi: 10.1093/cercor/bhm207
- Dennis, N. A., & Cabeza, R. (2008). Neuroimaging of healthy cognitive aging. *The Handbook of Aging and Cognition*, *3*, 1-54.
- Driscoll, I., Martin, B., An, Y., Maudsley, S., Ferrucci, L., Mattson, M. P., & Resnick, S. M. (2012). Plasma BDNF is associated with age-related white matter atrophy but not with cognitive function in older, non-demented adults. *PLoS One*, *7*(4), e35217. doi: 10.1371/journal.pone.0035217
- Ehlers, D. K., Daugherty, A. M., Burzynska, A. Z., Fanning, J., Awick, E. A., Chaddock-Heyman, L., . . ., & McAuley, E. (2017). Regional brain volumes moderate, but do not mediate, the effects of group-based exercise training on reductions in loneliness in older adults. *Frontiers in Aging Neuroscience*, *9*, 110. doi: 10.3389/fnagi.2017.00110
- Erickson, K. I., Prakash, R. S., Voss, M. W., Chaddock, L., Heo, S., McLaren, M., . . ., & Kramer, A. F. (2010). Brain-derived neurotrophic factor is associated with age-related decline in hippocampal volume. *Journal of Neuroscience*, *30*(15), 5368-5375. doi: 10.1523/jneurosci.6251-09.2010
- Grady, C. L. (2008). Cognitive neuroscience of aging. *Annals of The New York Academy of Sciences*, *1124*, 127-144. doi: 10.1196/annals.1440.009

- Greene, S. J., & Killiany, R. J. (2010). Subregions of the inferior parietal lobule are affected in the progression to Alzheimer's disease. *Neurobiology of Aging, 31*(8), 1304-1311. doi: 10.1016/j.neurobiolaging.2010.04.026
- Greenwood, P. M. (2007). Functional plasticity in cognitive aging: Review and hypothesis. *Neuropsychology, 21*(6), 657-673. doi: 10.1037/0894-4105.21.6.657
- Greicius, M. D., Krasnow, B., Reiss, A. L., & Menon, V. (2003). Functional connectivity in the resting brain: A network analysis of the default mode hypothesis. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 100*(1), 253-258. doi: 10.1073/pnas.0135058100
- Hall, P. A., Elias, L. J., Fong, G. T., Harrison, A. H., Borowsky, R., & Sarty, G. E. (2008). A social neuroscience perspective on physical activity. *Journal of Sport and Exercise Psychology, 30*(4), 432-449. doi: 10.1123/jsep.30.4.432
- Hayes, S. M., Hayes, J. P., Cadden, M., & Verfaellie, M. (2013). A review of cardiorespiratory fitness-related neuroplasticity in the aging brain. *Frontiers in Aging Neuroscience, 5*, 31. doi: 10.3389/fnagi.2013.00031
- Head, D., Kennedy, K. M., Rodrigue, K. M., & Raz, N. (2009). Age differences in perseveration: Cognitive and neuroanatomical mediators of performance on the Wisconsin Card Sorting Test. *Neuropsychologia, 47*(4), 1200-1203. doi: 10.1016/j.neuropsychologia.2009.01.003
- Hedman, A. M., van Haren, N. E., Schnack, H. G., Kahn, R. S., & Hulshoff Pol, H. E. (2012). Human brain changes across the life span: A review of 56 longitudinal magnetic resonance imaging studies. *Human Brain Mapping, 33*(8), 1987-2002. doi: 10.1002/hbm.21334
- Hillman, C. H., Erickson, K. I., & Kramer, A. F. (2008). Be smart, exercise your heart: Exercise effects on brain and cognition. *Nature Reviews Neuroscience, 9*(1), 58-65. doi: 10.1038/nrn2298
- Holschneider, D. P., Yang, J., Guo, Y., & Maarek, J. M. (2007). Reorganization of functional brain maps after exercise training: Importance of cerebellar-thalamic-cortical pathway. *Brain Research, 1184*, 96-107. doi: 10.1016/j.brainres.2007.09.081
- Huang, C. M., Polk, T. A., Goh, J. O., & Park, D. C. (2012). Both left and right posterior parietal activations contribute to compensatory processes in normal aging. *Neuropsychologia, 50*(1), 55-66. doi: 10.1016/j.neuropsychologia.2011.10.022
- Joo, S. H., Lim, H. K., & Lee, C. U. (2016). Three large-scale functional brain networks from resting-state functional MRI in subjects with different levels of cognitive impairment. *Psychiatry Investigation, 13*(1), 1-7. doi: 10.4306/pi.2016.13.1.1
- Kanwisher, N., McDermott, J., & Chun, M. M. (1997). The fusiform face area: A module in human extrastriate cortex specialized for face perception. *Journal of Neuroscience, 17*(11), 4302-4311.

- Kawagoe, T., Onoda, K., & Yamaguchi, S. (2017). Apathy and executive function in healthy elderly-resting state fMRI study. *Frontiers in Aging Neuroscience*, *9*, 124. doi: 10.3389/fnagi.2017.00124
- Kennedy, K. M., Erickson, K. I., Rodrigue, K. M., Voss, M. W., Colcombe, S. J., Kramer, A. F., . . . , & Raz, N. (2009). Age-related differences in regional brain volumes: a comparison of optimized voxel-based morphometry to manual volumetry. *Neurobiol Aging*, *30*(10), 1657-1676. doi: 10.1016/j.neurobiolaging.2007.12.020
- Kim, J., Basak, J. M., & Holtzman, D. M. (2009). The role of apolipoprotein E in Alzheimer's disease. *Neuron*, *63*(3), 287-303. doi: 10.1016/j.neuron.2009.06.026
- Kimura, K., Yasunaga, A., & Wang, L. Q. (2013). Correlation between moderate daily physical activity and neurocognitive variability in healthy elderly people. *Archives of Gerontology and Geriatrics*, *56*(1), 109-117. doi: 10.1016/j.archger.2012.10.004
- Kleerekooper, I., van Rooij, S. J., van den Wildenberg, W. P., de Leeuw, M., Kahn, R. S., & Vink, M. (2016). The effect of aging on fronto-striatal reactive and proactive inhibitory control. *Neuroimage*, *132*, 51-58. doi: 10.1016/j.neuroimage.2016.02.031
- Kramer, A. F., & Erickson, K. I. (2007). Capitalizing on cortical plasticity: Influence of physical activity on cognition and brain function. *Trends in Cognitive Sciences*, *11*(8), 342-348. doi: 10.1016/j.tics.2007.06.009
- Kramer, A. F., Erickson, K. I., & Colcombe, S. J. (2006). Exercise, cognition, and the aging brain. *Journal of Applied Physiology*, *101*(4), 1237-1242. doi: 10.1152/jappphysiol.00500.2006
- Lee, H. H., & Hsieh, S. (2017). Resting-state fMRI associated with stop-signal task performance in healthy middle-aged and elderly people. *Frontiers in Psychology*, *8*, 766. doi: 10.3389/fpsyg.2017.00766
- Li, R., Zhu, X., Yin, S., Niu, Y., Zheng, Z., Huang, X., & Li, J. (2014). Multimodal intervention in older adults improves resting-state functional connectivity between the medial prefrontal cortex and medial temporal lobe. *Frontiers in Aging Neuroscience*, *6*, 39. doi: 10.3389/fnagi.2014.00039
- Lin, C. S., Wu, C. Y., Wu, S. Y., Lin, H. H., Cheng, D. H., & Lo, W. L. (2017). Age-related difference in functional brain connectivity of mastication. *Frontiers in Aging Neuroscience*, *9*, 82. doi: 10.3389/fnagi.2017.00082
- Lowe, M. J., Mock, B. J., & Sorenson, J. A. (1998). Functional connectivity in single and multislice echoplanar imaging using resting-state fluctuations. *Neuroimage*, *7*(2), 119-132. doi: 10.1006/nimg.1997.0315

- Marks, B. L., Katz, L. M., Styner, M., & Smith, J. K. (2010). Aerobic fitness and obesity: Relationship to cerebral white matter integrity in the brain of active and sedentary older adults. *British Journal of Sports Medicine*, *45*(15), 208-1215. doi: 10.1136/bjism.2009.068114
- McAuley, E., Szabo, A. N., Mailey, E. L., Erickson, K. I., Voss, M., White, S. M., . . ., & Kramer, A. F. (2011). Non-exercise estimated cardiorespiratory fitness: Associations with brain structure, cognition, and memory complaints in older adults. *Mental Health and Physical Activity*, *4*(1), 5-11. doi: 10.1016/j.mhpa.2011.01.001
- Nagamatsu, L. S., Weinstein, A. M., Erickson, K. I., Fanning, J., Awick, E. A., Kramer, A. F., & McAuley, E. (2016). Exercise mode moderates the relationship between mobility and basal ganglia volume in healthy older adults. *Journal of the American Geriatrics Society*, *64*(1), 102-108. doi: 10.1111/jgs.13882
- Neeper, S. A., Gomez-Pinilla, F., Choi, J., & Cotman, C. W. (1996). Physical activity increases mRNA for brain-derived neurotrophic factor and nerve growth factor in rat brain. *Brain Research*, *726*(1-2), 49-56.
- Netz, Y., Dwolatzky, T., Zinker, Y., Argov, E., & Agmon, R. (2011). Aerobic fitness and multidomain cognitive function in advanced age. *International Psychogeriatrics*, *23*(1), 114-124. doi: 10.1017/s1041610210000797
- Nishiguchi, S., Yamada, M., Tanigawa, T., Sekiyama, K., Kawagoe, T., Suzuki, M., . . ., & Tsuboyama, T. (2015). A 12-week physical and cognitive exercise program can improve cognitive function and neural efficiency in community-dwelling older adults: A randomized controlled trial. *Journal of the American Geriatrics Society*, *63*(7), 1355-1363. doi: 10.1111/jgs.13481
- Nokia, M. S., Lensu, S., Ahtiainen, J. P., Johansson, P. P., Koch, L. G., Britton, S. L., & Kainulainen, H. (2016). Physical exercise increases adult hippocampal neurogenesis in male rats provided it is aerobic and sustained. *Journal of Physiology*, *594*(7), 1855-1873. doi: 10.1113/jp271552
- Pantano, P., Mainero, C., Iannetti, G. D., Caramia, F., Di Legge, S., Piattella, M. C., & Lenzi, G. L. (2002). Contribution of corticospinal tract damage to cortical motor reorganization after a single clinical attack of multiple sclerosis. *Neuroimage*, *17*(4), 1837-1843. doi: 10.1006/nimg.2002.1313
- Pariente, J., Cole, S., Henson, R., Clare, L., Kennedy, A., Rossor, M., & Frackowiak, R. S. (2005). Alzheimer's patients engage an alternative network during a memory task. *Annals of Neurology*, *58*(6), 870-879. doi: 10.1002/ana.20653
- Park, D. C., & Reuter-Lorenz, P. (2009). The adaptive brain: Aging and neurocognitive scaffolding. *Annual Review of Psychology*, *60*, 173-196. doi: 10.1146/annurev.psych.59.103006.093656

- Park, D. C., Smith, A. D., Lautenschlager, G., Earles, J. L., Frieske, D., Zwahr, M., & Gaines, C. L. (1996). Mediators of long-term memory performance across the life span. *Psychology and Aging, 11*(4), 621-637.
- Pereira, A. C., Huddleston, D. E., Brickman, A. M., Sosunov, A. A., Hen, R., McKhann, G. M., . . . , & Small, S. A. (2007). An in vivo correlate of exercise-induced neurogenesis in the adult dentate gyrus. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 104*(13), 5638-5643. doi: 10.1073/pnas.0611721104
- Pihlajamaki, M., Jauhiainen, A. M., & Soininen, H. (2009). Structural and functional MRI in mild cognitive impairment. *Current Alzheimer Research, 6*(2), 179-185. doi: 10.2174/156720509787602898
- Pihlajamaki, M., & Sperling, R. A. (2009). Functional MRI assessment of task-induced deactivation of the default mode network in Alzheimer's disease and at-risk older individuals. *Behavioural Neurology, 21*(1), 77-91. doi: 10.3233/ben-2009-0231
- Prakash, R. S., Voss, M. W., Erickson, K. I., Lewis, J. M., Chaddock, L., Malkowski, E., . . . , & White, S. M. (2011). Cardiorespiratory fitness and attentional control in the aging brain. *Frontiers in Human Neuroscience, 4*(January), 229. doi: 10.3389/fnhum.2010.00229
- Prince, M., Bryce, R., Albanese, E., Wimo, A., Ribeiro, W., & Ferri, C. P. (2013). The global prevalence of dementia: A systematic review and metaanalysis. *Alzheimers Dement, 9*(1), 63-75. doi: 10.1016/j.jalz.2012.11.007
- Qi, Z., Wu, X., Wang, Z., Zhang, N., Dong, H., Yao, L., & Li, K. (2010). Impairment and compensation coexist in amnesic MCI default mode network. *Neuroimage, 50*(1), 48-55. doi: 10.1016/j.neuroimage.2009.12.025
- Raichlen, D. A., Bharadwaj, P. K., Fitzhugh, M. C., Haws, K. A., Torre, G. A., Trouard, T. P., & Alexander, G. E. (2016). Differences in resting state functional connectivity between young adult endurance athletes and healthy controls. *Frontiers in Human Neuroscience, 10*, 610. doi: 10.3389/fnhum.2016.00610
- Raz, N., Rodrigue, K. M., Head, D., Kennedy, K. M., & Acker, J. D. (2004). Differential aging of the medial temporal lobe: A study of a five-year change. *Neurology, 62*(3), 433-438. doi: 10.1212/01.WNL.0000106466.09835.46
- Reuter-Lorenz, P. A., & Lustig, C. (2005). Brain aging: Reorganizing discoveries about the aging mind. *Current Opinion in Neurobiology, 15*(2), 245-251. doi: 10.1016/j.conb.2005.03.016

- Salthouse, T. A., & Ferrer-Caja, E. (2003). What needs to be explained to account for age-related effects on multiple cognitive variables? *Psychology and Aging, 18*(1), 91-110. doi: 10.1037/0882-7974.18.1.91
- Smith, J. C., Nielson, K. A., Antuono, P., Lyons, J. A., Hanson, R. J., Butts, A. M., & Verber, M. D. (2013). Semantic memory functional MRI and cognitive function after exercise intervention in mild cognitive impairment. *Journal of Alzheimer's Disease: JAD, 37*(1), 197-215. doi: 10.3233/jad-130467
- Smith, J. C., Nielson, K. A., Woodard, J. L., Seidenberg, M., Durgerian, S., Antuono, P., & Rao, S. M. (2011). Interactive effects of physical activity and APOE-epsilon4 on BOLD semantic memory activation in healthy elders. *Neuroimage, 54*(1), 635-644. doi: 10.1016/j.neuroimage.2010.07.070
- Smith, J. C., Nielson, K. A., Woodard, J. L., Seidenberg, M., Verber, M. D., Durgerian, S., Rao, S. M. (2011). Does physical activity influence semantic memory activation in amnesic mild cognitive impairment? *Psychiatry Research, 193*(1), 60-62. doi: 10.1016/j.psychres.2011.04.001
- Sperling, R. A. (2007). Functional MRI studies of associative encoding in normal aging, mild cognitive impairment, and Alzheimer's disease. *Annals of The New York Academy of Sciences, 1097*, 146-155. doi: 10.1196/annals.1379.009
- Sperling, R. A., Bates, J. F., Chua, E. F., Cocchiarella, A. J., Rentz, D. M., Rosen, B. R., & Albert, M. S. (2003). fMRI studies of associative encoding in young and elderly controls and mild Alzheimer's disease. *Journal of Neurology, Neurosurgery, and Psychiatry, 74*(1), 44-50. doi: 10.1136/jnnp.74.1.44
- Suo, C., Singh, M. F., Gates, N., Wen, W., & Sachdev, P. (2016). Therapeutically relevant structural and functional mechanisms triggered by physical and cognitive exercise. *Molecular Psychiatry, 21*(11), 1633-1642. doi: 10.1038/mp.2016.19
- Supekar, K., Menon, V., Rubin, D., Musen, M., & Greicius, M. D. (2008). Network analysis of intrinsic functional brain connectivity in Alzheimer's disease. *PLoS Computational Biology, 4*(6), e1000100. doi: 10.1371/journal.pcbi.1000100
- Tao, J., Liu, J., Egorova, N., Chen, X., Sun, S., Xue, X., Kong, J. (2016). Increased hippocampus-medial prefrontal cortex resting-state functional connectivity and memory function after Tai Chi Chuan practice in elder adults. *Frontiers in Aging Neuroscience, 8*, 25. doi: 10.1016/j.physbeh.2016.02.031
- Timofeeva, E., Huang, Q., & Richard, D. (2003). Effects of treadmill running on brain activation and the corticotropin-releasing hormone system. *Neuroendocrinology, 77*(6), 388-405. doi: 10.1159/000091111
- Tozzi, L., Carballedo, A., Lavelle, G., Doolin, K., Doyle, M., Amico, F., Frodl, T. (2016). Longitudinal functional connectivity changes correlate with mood improvement after regular exercise in a

- dose-dependent fashion. *The European Journal of Neuroscience*, 43(8), 1089-1096. doi: 10.1111/ejn.13222
- Van Bavel, J. (2013). The world population explosion: Causes, backgrounds and -projections for the future. *Facts, Views and Vision in ObGyn*, 5(4), 281-291.
- Verhaeghen, P., Steitz, D. W., Sliwinski, M. J., & Cerella, J. (2003). Aging and dual-task performance: A meta-analysis. *Psychology and Aging*, 18(3), 443-460. doi: 10.1037/0882-7974.18.3.443
- Vidoni, E. D., Gayed, M. R., Honea, R. A., Savage, C. R., Hobbs, D., & Burns, J. M. (2013). Alzheimer disease alters the relationship of cardiorespiratory fitness with brain activity during the stroop task. *Physical Therapy*, 93(7), 993-1002. doi: 10.2522/ptj.20120465
- 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, 26. doi: 10.3389/fnhum.2011.00026
- Voelcker-Rehage, C., & Niemann, C. (2013). Structural and functional brain changes related to different types of physical activity across the life span. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 37(9 Pt B), 2268-2295. doi: 10.1016/j.neubiorev.2013.01.028
- Voss, M. W., Erickson, K. I., Prakash, R. S., Chaddock, L., Kim, J. S., Alves, H., Kramer, A. F. (2013). Neurobiological markers of exercise-related brain plasticity in older adults. *Brain, Behavior, and Immunity*, 28, 90-99. doi: 10.1016/j.bbi.2012.10.021
- Voss, M. W., Erickson, K. I., Prakash, R. S., Chaddock, L., Malkowski, E., Alves, H., . . . , & Kramer, A. F. (2010). Functional connectivity: A source of variance in the association between cardiorespiratory fitness and cognition? *Neuropsychologia*, 48(5), 1394-1406. doi: 10.1016/j.neuropsychologia.2010.01.005
- 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, 32. doi: 10.3389/fnagi.2010.00032
- Ward, N. S., & Frackowiak, R. S. (2003). Age-related changes in the neural correlates of motor performance. *Brain*, 126(4), 873-888. doi: 10.1093/brain/awg071
- Wei, G. X., Dong, H. M., Yang, Z., Luo, J., & Zuo, X. N. (2014). Tai Chi Chuan optimizes the functional organization of the intrinsic human brain architecture in older adults. *Frontiers in Aging Neuroscience*, 6, 74. doi: 10.3389/fnagi.2014.00074
- Wong, C. N., Chaddock-Heyman, L., Voss, M. W., Burzynska, A. Z., Basak, C., Erickson, K. I., . . . , & Kramer, A. F. (2015). Brain activation during dual-task processing is associated with

cardiorespiratory fitness and performance in older adults. *Frontiers in Aging Neuroscience*, 7, 154. doi: 10.3389/fnagi.2015.00154

World Health Organization. (2017). *Dementia*. Retrieved from <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs362/en/>

Zheng, Z., Zhu, X., Yin, S., Wang, B., Niu, Y., Huang, X., & Li, J. (2015). Combined cognitive-psychological-physical intervention induces reorganization of intrinsic functional brain architecture in older adults. *Neural Plasticity*, 2015, 713104. doi 10.1155/2015/713104

Zlatar, Z. Z., Towler, S., McGregor, K. M., Dzierzewski, J. M., Bauer, A., Phan, S., & Crosson, B. (2013). Functional language networks in sedentary and physically active older adults. *Journal of the International Neuropsychological Society: JINS*, 19(6), 625-634. doi: 10.1017/s1355617713000246

收 稿 日 期：2017 年 07 月 31 日

一稿修訂日期：2017 年 08 月 01 日

二稿修訂日期：2017 年 11 月 23 日

三稿修訂日期：2017 年 12 月 15 日

接受刊登日期：2017 年 12 月 21 日



Bulletin of Educational Psychology, 2018, 50(2), 363-388

National Taiwan Normal University, Taipei, Taiwan, R.O.C.

## **Physical Activity and the Aging Brain: A Review of Functional Magnetic Resonance Imaging Studies**

**Feng-Tzu Chen**

Department of Physical Education

National Taiwan Normal University

**Chih-Mao Huang**

Department of Biological Science  
and Technology

National Chiao Tung University

**Chun-Chih Wang**

Department of Physical Education

National Taiwan Normal University

**Yu-Kai Chang**

In this article, we review recent findings of the effects of physical activities on the aging brain and cognitive functions, focusing on functional magnetic resonance imaging (fMRI) results, including resting-state functional magnetic resonance imaging (RS-fMRI) and task-based functional magnetic resonance imaging (TB-fMRI). Moreover, the present articles explored both cross-sectional studies and longitudinal studies that examined the brain function alterations induced by physical activity training, which included cardiovascular fitness/aerobic exercise training, Tai Chi training, resistance exercise/weight training, and coordination exercise training, using measured amounts of physical activity as assessment criteria, and taking into account cognitive-related physical activity responses. Results of these RS-fMRI studies showed that older adults that engaged in cardiovascular fitness and aerobic training showed evidence of increasing brain functions. Furthermore, these positive effects also extended to older adults engaging in Tai Chi training. Also, a few studies focused on resistance exercise training; however, the results of these investigations remain inconsistent and thus will require further confirmation in the future. Results of the TB-fMRI studies indicated that older adults with higher levels of cardiovascular fitness or those engaged in cardiovascular fitness training combined with coordination training, have gained beneficial effects regarding brain functions. Specifically, the positive effects of cardiovascular fitness could be found in both normal and pathological aging populations, including older adults with mild cognitive impairment (MCI). Older adults with higher amounts of physical activity benefited in their brain functions more than older cognitively intact adults, or those with a high risk for dementia. Collectively, the results of previous studies established an experimental basis for assessing positive relationships between physical activities and brain functions, revealing that physical activity approaches might induce different improved brain functions. The consequence of these reviews provides physical activity prescriptions and exercise models relevant to improving brain functions for older populations in the society of Taiwan.

**KEY WORDS:** Cognitive aging, Executive function, Magnetic reasoning imaging, Physical activity