

跨越心與腦的鴻溝—— 國科會人文處MRI講習課程引介

吳昌衛、郭柏呈、梁庚辰*

摘要

心智是人類生命最大的奧秘，大腦是科學研究最後一個尚待深入探索的目標，研究大腦運作如何產生心智活動是二十一世紀的新興學術領域，正逐漸受到文學、教育、道德、法律、經濟、宗教等人文社會科學領域的重視。國科會人文處有鑑於此，特地在成大、政大與台大各設立一部磁振造影（Magnetic Resonance Imaging, MRI）貴重儀器，協助人文社會科學研究者運用腦部功能性影像技術探討人文社會相關議題。爲了讓該領域學者瞭解這些技術的基本原理，三校正爲人文社會科學研究者舉辦系列性的講習，介紹功能性磁振造影的原理與研究方法，協助有興趣的學者與研究生熟悉這些技術，以期未來能順利進行此類研究。本文即針對本系列講習課程——MRI 之原理與認知研究應用——作一簡略的內容引介。

一、前言

自古以來人類渴望了解自我，能意識到自我存在的心靈活動便成爲人類好奇的問題。先哲思索心靈與身體間的關係已有幾千年之久，心臟、肚腸、肝臟與腦都會在不同文化與時代被認爲是心靈活動的主宰。經過長期的探索與研究，今天多數的科學家都認爲心智活動與神經系統，尤其是大腦，有非常密切的關聯性。大腦是人體最精細複雜的器官，在日復一日的生活中主宰著知覺、記憶、情緒、自我意識等心智功能。雖然我們對於大腦所知仍屬有

* 吳昌衛，中央大學生物醫學工程研究所；郭柏呈，政治大學心理學系 / 心智大腦與學習研究中心；梁庚辰，國立臺灣大學心理學系 / 神經生物與認知科學研究中心。



限，但過去二十年來由於認知科學與神經科學的進展，使得對於心智問題的研究邁入一個嶄新的境界。日新月異的腦部活動偵測與刺激技術使研究人類心智的大腦機制成為可能。研究的主題逐步從基本的認知歷程擴及到情緒或意圖，甚至涉及到信仰、偏見、道德、犧牲、熱忱及意識狀態等過去較難處理的高層運作。促成這樣發展的原因有二：一方面是因為腦部活動提供了語文主觀報告之外的另一指標，使高層心智活動得以客觀的量測，讓各式假設得到科學性驗證。另一方面，腦部研究使得許多心理學的理論得以與神經科學豐富的資料結合，從而得到佐證與啟發，收到左右逢源的效果。此一跨領域的整合性研究已經逐漸從心理學擴展到語言學、社會學、經濟學、教育學、法律學、政治學、人類學、藝術、哲學、甚至宗教或神學等。當代的認知神經科學研究便結合了認知科學與神經科學兩個重要的研究領域，最終目標是了解人類是如何藉由有形的大腦運作，產生無形與抽象的心智活動，進而影響日常行為表現。在此一學術氛圍下，腦功能研究在人文與社會科學中扮演的角色日形重要，將可能成為二十一世紀人文社會研究中不可或缺的一個新場域。

早期的科學家們透過觀察腦傷病患的行為表現，大致地推估對應於特定認知功能的相關腦區與可能的神經機制，並與動物研究的結果相互印證。然而這些腦傷的範圍通常無法控制，導致了利用腦傷進行認知神經科學推論上的困難。近年來在認知神經科學研究上，非侵入式的腦功能研究方法快速發展，使我們能對人類的心智歷程與運作的神經機制有更深入的認識。然而這些研究需依賴大型醫學工程儀器，這些設備無論在購置、操作、維護與資料分析上，對於國內人文社會科學研究者而言，常是難以跨越的障礙，導致國內此一學術領域的研發落後國際甚多。有鑑於此，國科會人文處數年前推動「心智科學大型儀器建置及共同使用服務計畫」，在政大、成大與台大設置研究腦功能的相關大型儀器，提供全國人文社會科學研究者探討心智神經科學、教育神經科學、經濟神經科學、道德、犯罪與法律神經科學、藝術神經科學，以及任何與大腦運作相關的人文社會科學議題，以協助人文社會科學研究者跨越長期存在於心智與大腦之間的學術研究鴻溝。在此一儀器建置與服務計畫中，包含了訓練課程，目的使人文社會科學研究者，能夠領略這些大型儀器的運作原理，以及如何運用它們來探討心智歷程的運作。功能性磁共振造影技術 (functional Magnetic Resonance Imaging, fMRI) 在探討人類大腦功

能與心理歷程的關連性上提供了一個非常好的量測工具。此一技術自 1992 年發展至今，歷經 20 年期間的研究，其絕佳的腦部解析能力已幫助神經科學界更深入了解腦部各網絡間的功能性，亦愈來愈接近人類瞭解自我心智之渴望。

此一技術能在無侵入性與無輻射性的條件下，使科學家得以觀察到人類在執行各種行為作業或從事特定心智歷程時，所涉及的大腦功能運作。它不但讓科學家們能重新檢驗已經存在問題，探詢其證據與解答，也能更進一步激發出有待解決的新問題。目前台大、政大與成大團隊所舉辦的 MRI 講習課程正是冀望針對磁共振造影原理至分析層面，為人文社會科學研究者作一系統性介紹。本文將概略地說明 fMRI 的運作原理及它在人類認知功能研究上的應用，作為這一系列課程的引言。我們將首先解釋其成像原理與生物基礎，然後再進一步闡明這技術如何探討涉及認知歷程的特定腦區，測量其神經活化激發量，建立腦區域間的功能性連結（functional connectivity），利用 fMRI 的訊息型態解讀心智內容，最後我們也將討論使用腦造影研究工具的限制，以及我們對於台灣未來使用 fMRI 進行認知神經科學研究的展望。

二、非侵入性方法解析腦部組織

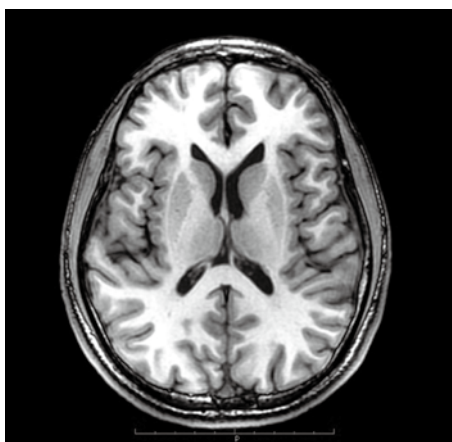
磁共振造影儀對於醫學中心的操作人員或研究者來說並不陌生，它即是放射醫學科看板上的核磁共振儀器。由於其運作不涉及核種放射性，近年來已更名為磁共振造影儀，目前主要是透過偵測人體中的水分子來量測身體中各種軟組織之信號，尤其以解析腦部構造的能力最為突出。好奇的人或許會問：究竟磁共振造影儀是以什麼方法，在體外便能量測到大腦的細部結構甚至活動狀態呢？

回答這個問題之前，讓我們先對其原理做個簡單的介紹。顧名思義，磁共振造影儀是由三個部分組合而成，一為強大的磁場（Magnet），二為共振線圈（Radio-frequency coil），三為造影專用之梯度磁場線圈（Gradient coil）。當人體進入強磁場時（醫院用 MRI 多為 1.5 Tesla 或 3 Tesla，分別為地磁強度的 3 萬及 6 萬倍），體內水分子中，一小部分的氫原子核（質子）會順著強磁場的方向排列，猶如一排立正站好的軍隊，但其數量甚為稀少（約為百萬分之一），所以人體不會在 MRI 儀器內被強磁場吸附住。接著以共振線圈貼附在欲掃描區域周圍，發射一特定頻率（Larmor frequency）之電磁波與質子產生共振，以干擾質子的磁場列隊。這個電磁波的作用類似於對這一排的質子軍



隊發出「臥倒」的口令，質子們便順從地伏倒 90 度；待電磁波關閉後，每個質子又會回歸到原來立正的狀態，稱之為回復 (Recovery) 現象。雖然最終質子都會回到原始立正狀態，不過由於人體裡每個組織的細胞結構與化學鍵結不盡相同，因而導致回復曲線有快有慢，例如腦中的白質 (White matter) 回復速度非常快 (~0.1 秒)，腦脊髓液則約需要一至數秒的時間。如果我們把體內組織回復的磁矩分為垂直與水平兩個分量，這兩個分量的回復速度亦顯現極大的差異，我們稱之為 T_1 與 T_2 回復曲線，它們在臨床醫學上各有重要的診斷價值。最後，梯度磁場線圈再外加額外的磁場，且其強度隨著 X、Y、Z 三個軸向的空間位置不同而有差異，這等於賦予了腦組織每個相素點 (Pixel) 不同的空間編號，如此一來便可分辨不同位置的身體組織所產生的訊號強度，經過影像處理之後，就成為我們肉眼得以辨識的腦部影像 (如圖一)。

磁振造影所取得之影像完全是利用硬體設備與成像序列來偵測身體內產生之磁場變化，其不具有侵入性與輻射性的特質，使得 MRI 成為眾多醫學影像儀器裡最安全的一項，再加上它可同時兼顧時間及空間解析度 (掃瞄快、影像細膩)，因此不只在臨床診斷上被廣為應用，更在認知神經科學領域的研究上成為關鍵的技術。強磁場本身在過去幾十年間並沒有直接危害人體的報導，目前美國國家藥物食品檢驗局 (FDA) 對磁振造影的安全規範為成年人低於 9 Tesla，嬰幼兒則低於 4 Tesla。唯一的安全顧慮是強磁場所造成的危險因

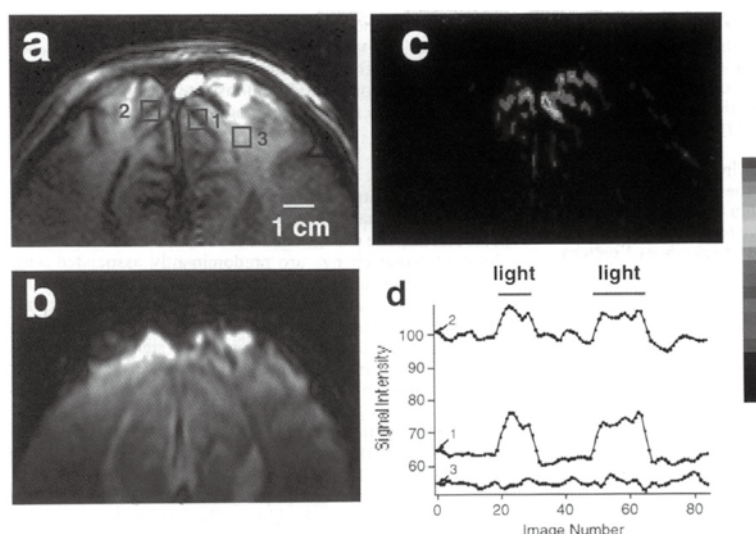


圖一、3 Tesla磁振造影儀取得之影像範例：橫切面之T1-weighted 結構性掃瞄 (3D-FSPGR, Spatial resolution: $0.5 \times 0.5 \times 0.8 \text{ mm}^3$)。

子，例如施工不慎將鐵磁性物品放至 MRI 環境內可能會對操作人員或受試者造成危害，或裝有心律調節器或金屬植入物（含刺青）之人員接近強磁場環境而使得金屬植入物喪失原有功能，這些都是操作人員在進行實驗前務必要事先排除，以免造成可能的意外。另外如身處密閉狹小空間可能產生幽閉恐懼症或周邊神經受到刺激等現象則因人而異，因此受試者進入 MRI 環境時應具有隨時能夠向外溝通身體狀況之能力並享有隨時可終止實驗之權力。至於發送電磁波的能量雖會使人體體溫略微升高，但目前市面上的機器都會根據 FDA 所訂定的能量吸收指標（Specific Absorption Rate, SAR）進行保護措施，如單位時間內吸收過多能量即會停止 MRI 機器的運作，絕無安全疑慮。但如同所有使用儀器的實驗，安全操作永遠是實驗室的最高守則，這在課程中會有詳細的介紹。

三、功能性磁共振造影（fMRI）之生理成因

雖然磁共振造影之影像能夠精細地辨析出腦中不同組織（灰質、白質、腦脊髓液等）的對比，我們如何使用這一張張 MRI 影像進一步來研究不同腦區的功能呢？藉由超快速影像技術的發展，全腦的 MRI 掃描時間得以大幅縮短，早期的研究人員發現如果對全腦持續進行 MRI 掃描，同時給予外在刺激（例如：燈光開關刺激），發現腦中的視覺相關區域在 MRI 影像強度上有著微弱（~2%）但極可靠的反應變化（如圖二）。美國 AT&T 貝爾實驗室的 Seiji Ogawa 博士對此現象提出一生理解釋：當身體接受外在刺激（強光）時，接收感官（眼睛）便會將外在刺激轉變為電信號，藉由神經束將信號傳至相對應的大腦皮質（視覺皮質區），使得該處的神經細胞被活化。神經細胞活化產生動作電位時需要能量，此一能量來自周遭微血管提供的葡萄糖及氧氣以進行代謝反應，氧氣是由微血管裡紅血球的血紅素所攜帶，血紅素的性質會隨著氧氣是否被細胞取用而改變性質。帶氧血紅素（Oxygenated Hemoglobin, Oxy-Hb）本身是逆磁性，與大部分身體組織相同，不影響周遭組織的磁場均勻度；反之去氧血紅素（Deoxygenated Hemoglobin, Deoxy-Hb）則為順磁性，在 MRI 環境裡就等同於一個個的小磁鐵，會降低周遭組織的磁場均勻度，使得 MRI 影像訊號強度下降。於是當神經細胞活化時，需要從微血管抽取氧氣當作能量來源，使得血管中的去氧血紅素濃度大幅增加。此時血管的自我調控機制開始運作，透過腦血流量的增加補充超過所需求的帶氧血紅素進入微



圖二、1992 年功能性磁振造影之範例：(a) 視覺區橫切面之結構性掃描，(b) 同一切面之快速影像 (FISP)，(c) 對光刺激有反應之腦部區域，以色彩呈現，空間位置相對應於 (a) 和 (b)，(d) 功能性掃描之時間訊號，可看出不同空間位置上有不同的功能性影像強度。(Ogawa et al., Proc. Natl. Acad. Sci. USA 1992; 89:5951-55)

血管，以支援活化的神經細胞。由於這種過度補償的現象非常明顯（5% 的氧氣需求量卻補充近 70% 的帶氧血），濃度過高的帶氧血紅素會使得活化神經細胞周圍的磁場變得超乎常態地均勻，進而提高活化區周遭的 MRI 影像強度。學界常用一個有趣的比喻來形容這樣的過度補償現象：當整片花園裡的一株花感到口渴時，調節系統會調度足以淹沒整片花園的水來進行灌溉。Ogawa 博士於 1992 指出這種 MRI 影像強度上的變化，是對應由神經細胞活化之後帶動周遭血管中帶氧與去氧血紅素的濃度改變，這個假設很快地獲得相關研究的驗證與支持，此後這種反映腦部功能的影像強度變化便被稱為血氧濃度相依 (Blood Oxygenation Level Dependent, BOLD) 訊號，自此便揭開了功能性磁振造影應用於腦神經科學的序幕。

雖 BOLD 理論提供了功能性磁振造影可靠且有效的生理解釋，也成功地帶領起運用功能性磁振造影於腦神經科學研究之風潮，然而值得注意的是 BOLD 信號真正能解釋的是因神經元因為活化而造成的血氧變化量（間接測量），而不像神經電生理記錄能夠直接量測神經元活動。至於能造成血中帶氧

量變化的因素，除了神經元活化以外，其他如使用藥物（如咖啡因）或呼吸換氧量不足，皆有可能在神經元沒有活化的情況下產生 BOLD 信號，因此 fMRI 的結果在生理層面的解釋要比直接量測技術（如微電極之生理電訊號量測）要來得轉折。此外，也由於 BOLD 信號受到很多生理因素之干擾，所以信號本身並不具量化意義，無法針對生理現象進行定量。不過現階段技術面除最普遍的面迴訊影像（Echo-planar imaging, EPI）以外，藉由先進成像序列的設計，還有能夠針對腦血流量（Cerebral Blood Flow）、腦血容積（Cerebral Blood Volume）及腦氧代謝率（Cerebral Metabolic Rate of Oxygen）等生理參數進行量化之功能性磁共振造影技術，在進行發展或復健等需長期研究的議題來說，將能提供更進一步地定量腦功能數據。

四、認知功能的腦部定位研究

為了探討人類複雜的心理歷程與認知運作，科學家們發展了不同實驗設計方式來進行 fMRI 研究。最典型的實驗設計通常包含了兩種實驗作業，一種為實驗嘗試項目組，另一種為控制嘗試項目組。實驗項目通常是用一組知覺刺激引發特定的認知歷程，控制嘗試項目通常具有與實驗嘗試項目相同的知覺刺激屬性，但是不具有實驗嘗試項目所欲測試的關鍵性認知歷程。這種實驗設計的邏輯奠基於心理學家 Posner 與其同僚所提出的認知相減（Cognitive subtraction）假設，它源自於荷蘭心理學者 Donders 所提的法則：完成複雜心理歷程所需的時間等於完成該歷程所含個別成分所需時間之總和。同理，對某一作業接受知覺刺激並對該知覺刺激進行心智運作的腦部興奮程度（或區位），會等同於僅接受知覺刺激之腦部興奮加上僅進行心理歷程之腦部興奮。因此我們可以導出下列公式：

針對某一特定心理歷程的腦部興奮 = 接受實驗嘗試項目所引發的知覺刺激加上對其進行心智運作的腦部興奮 - 控制嘗試項目所引發的知覺刺激的腦部興奮。

實驗與控制兩種嘗試項目在 fMRI 掃描的過程中可以用區塊化的形式交替出現（Block design），或是將這些實驗與控制嘗試項目以隨機的形式呈現（Event-related design）。例如為了尋找記憶負荷相關的腦區，研究者會操弄不同的記憶負荷量，比較高記憶負荷量與低記憶負荷量在不同腦區的 BOLD 訊



號是否具有統計上的顯著差異，以此來推論與記憶負荷相關的神經生理證據。雖然認知相減的概念已經被普遍的使用在 fMRI 的實驗設計上，我們必須謹記使用認知相減方法的假設有兩個重要的前提，一是假設認知歷程可以被單純的嵌入在不同的認知歷程之間，另一個則是假設認知歷程間具有線性的加成關係。雖然我們知道這兩個前提假設過於簡化人類的認知歷程，可是認知相減的邏輯仍然能夠提供研究者們，在以 fMRI 為工具進行認知神經科學研究時，在實驗設計能有比較大的彈性與空間。

功能性腦造影研究第一要務在於澄清心理歷程與大腦運作的關係，為解決身心關聯性問題提供第一步的證據。以短期或工作記憶 (Short-term or working memory) 的研究為例，早期研究者為了探討大腦前額葉 (Prefrontal lobe) 的角色，在猴子的前額葉外側皮質 (Lateral prefrontal cortex) 埋入電極，同時訓練猴子在見到目標刺激時不得作反應，需等目標刺激消失一段時間後才可反應。他們發現在目標刺激消失後到反應出現前的一段延宕時間內 (並沒有任何物理視覺刺激在此階段出現)，前額葉內某些神經細胞出現強烈的神經活動。認知神經科學家們利用 fMRI 掃描，在正常人類受試者重複同樣的實驗，發現與動物研究類似的結果：將訊息維持在短期記憶的階段裡，前額葉外側皮質的 BOLD 訊號也具有持續性活化的特性，更重要的是受試者執行短期記憶作業的正確率與 BOLD 訊號強度具有正相關。記憶研究者推論這種持續性的神經活化是連結知覺刺激與稍後的反應選擇或記憶提取重要的神經生理證據，而此短暫維持的訊息表徵可以作為後續高階複雜認知歷程的基礎，前額葉外側皮質也因此被認為與工作或短期記憶有密切關係。

五、認知歷程中展現的腦部功能性聯結

功能區域化 (Functional localization) 是研究心智與大腦關係時爭論不休的議題，爭論的焦點在於對每一心智官能 (Mental faculty) 是否能在腦中找到單一的區域負責。但近年來一些研究發現，對應於一個心智歷程的，通常不是一個腦區，而是涉及了多個腦區，這也與動物研究的結果相互呼應。這些證據暗示著支撐一項認知運作的，並不是單一區域，而是分布於幾個區域的一個系統或細胞集團，一如心理學家 Hebb 在半世紀前所預測的。在此情況下，找到特定腦區與認知歷程對應關係的證據已經不再能夠繼續滿足科學家探詢心智如何運作的渴求。縱使面對非常嚴峻的挑戰與技術上的限制，在動

物研究上，神經科學家努力嘗試著在動物的多個不同腦區埋入電極，希望能同時記錄當進行特定作業時，這些不同腦區間在神經活化訊號上的交互溝通。fMRI 本來就具有可以同時偵測多個腦區活動的特性，一些動態訊號的數理計算模型讓認知神經科學家能針對人腦不同區域 BOLD 訊號的在時間軸向上的變化，輔以統計分析的策略，推估個體進行特定作業時數個腦區間相互溝通的變化情形（fMRI 術語謂之「功能性聯結強度」），甚至可以進一步探討區域間如何互相影響與調節，讓我們能夠推論區域間在運作與調節上的因果關係（例如 A、B 兩區進行某一作業有互動時，究竟是 A 影響 B，還是 B 影響 A?）。舉例來說，使用功能性聯結的分析方法，我們可以得到證據顯示前額葉皮質由上而下地調節（Top-down modulation）早期視覺處理歷程；又以記憶研究為例，我們也發現前額葉皮質與知覺處理腦區的功能性聯結強度與個體的視覺短期記憶的作業表現有密切關係。這些以人類受試者為主的功能性聯結的研究證據，與腦損傷病人或動物研究的結果有著非常高的一致性，也反映了當個體從事特定心智作業時，所涉及的其實是大腦多個區域間的整體變化，而不是只有單一腦區就完成了單一特定的心理歷程。雖然藉由功能性聯結分析方法持續地發展與改良得以讓科學家們能夠從更巨觀的角度來觀察多個腦區間的互動，我們仍然需要謹記這些分析方法依賴著時間軸上的資訊，fMRI 的時間解析度是以秒為單位，而人類心智流轉的速度卻比這要快得多。此外，BOLD 訊號具有低頻濾波的特性，這些掃描的限制與訊號的特性都增加了我們在進行資料分析與結果推論的困難性與挑戰。如何使腦部影像技術更逼近認知運作的真實，將是未來研究的一大挑戰。

六、認知內容的神經表徵探討

就心靈與身體間的關係而言，除了知道不同的心理歷程如何由腦中不同的系統完成外，另一個重要的問題就是大腦如何在細胞層次上表現出不同的訊息內容，這一問題對於知覺、記憶與思考都有重要的意義。Hebb 曾經提出訊息內容利用一整個細胞集團的反應型態來表示，果若如此，偵測一群細胞的反應型態便成為瞭解大腦如何表徵訊息的先決條件。以 fMRI 的訊息型態（Pattern）解讀心智內容是當前的熱門議題之一，結合資訊工程領域機器學習（Machine learning）的概念，科學家們可以利用多元體素型態分析法（Multivoxel Pattern Analysis, MVPA），來解譯（Decode）fMRI 訊號內可能隱



藏的活化型態資訊。在進行這類實驗時，研究者們必須先對適當的實驗訓練程序進行功能性掃描，以此資料建立個體大腦對於特定刺激類別的活化型態；隨後透過機器學習的程序，對此資料進行分析運算，並建立分類（Classification）算則；成功建立分類的算則後，科學家們便能以此算則檢驗在其他實驗測試所得到的大腦活化型態；我們最後可以利用此一算則預測正確率為指標，檢驗能夠成功解譯大腦訊號型態的程度。

以物體辨識的研究為例，如果只是單純透過 fMRI 檢驗不同物體刺激項目之間（例如鞋子與水瓶）在 BOLD 訊號反應強度，很難得到任何統計上的顯著差異，然而透過 MVPA 這種分析取向，科學家們卻能夠解譯個體大腦訊號其實在當辨識不同的物體刺激項目時，雖然激發了類似的腦區（例如對於物體刺激較敏感的側枕葉皮質，Lateral Occipital Cortex, LOC），但是事實上辨識不同的物體刺激項目所引發的 BOLD 訊號其實具有型態上的差異。MVPA 分析方法目前正在快速地發展中，且已經被大量地應用在各種認知神經科學研究議題，許多科學家也因此希望能更進一步透過這個方法，解讀個體的內在心智狀態與想法，但是這也隨之延伸出許多學術道德與倫理的討論。存在於科幻故事中的心智檢測儀，可將腦部的訊息瞬間解密，輕鬆地讀出每個人的個性或心思，或是即時判斷一個人的意圖，不讓罪犯或恐怖份子逍遙法外。這樣的情景目前依然僅止於想像，但其所涉及的道德與法律相關議題，卻是與人文社會學者的研究範疇息息相關，如果我們不瞭解這樣的可能性，就無法未雨綢繆的去思考其對人類福祉的影響與對社會的衝擊。

七、功能造影研究在方法學上的限制

認知神經科學家希望透過非侵入性的功能性磁振造影技術，探討不同的心理歷程或認知概念，找到對應特定心理或認知歷程的大腦區域或區域間的互動，最終目標是能夠建立一個機制運作的模型，來解釋與預測更高階複雜的認知歷程與社會行為。資料分析方法的快速發展，從單變項統計分析、多變項功能性聯結，到多元體素型態分析方法，讓研究者可以用簡單與直接的實驗設計方法（如靜止狀態磁振影像，resting state MRI），研究大腦、行為與心智間的關係。然而我們必須知道，腦功能造影研究仍然有許多的限制，例如腦功能造影研究是一種相關取向的研究法，它所產生的研究證據並不能證明我們所觀察到的神經活化與我們所假設的特定認知歷程存在著必然的因果

關係，有可能受試者在從事實驗作業時，進行著與實驗全然不相關的心智運作，而實驗者並無法完全地排除這種可能的內在干擾。其次，當我們對實驗結果進行推論也有限制。

一般而言，fMRI 的研究資料可以進行兩種推論，一種是順向推論 (forward inference)，即特定的認知處理歷程會激發特定的腦區，這通常是運用於我們確知某一作業會觸動某些已知的認知歷程時。例如我們目前已知當個體進行辨識臉孔作業時，相較於辨識其他不同種類的物體刺激，會在下顳葉腹側的梭狀回 (Fusiform gyrus) 記錄到較強的神經活化，我們可以據此推論這區域與臉孔辨識有高的關聯性。另一種則是逆向推論 (Reverse inference)，這常出現在我們不知道作業所啟動的認知歷程，而希望透過腦部的興奮來澄清作業所涉及的認知運作。即當我們觀察到一個特定的腦區被激活時，我們推論受試者在從事實驗作業時，可能動用到該區所掌管的心理運作。例如當個體進行心像旋轉作業時，研究者能夠觀察到前額葉皮質某區顯著的神經活化，由於該區過去被認為與短期或工作記憶有關，因此可導出下列推論：心像旋轉作業可能啟動了短期與工作記憶，維持物體在腦內的表徵以完成心像旋轉的作業。然而，我們知道前額葉皮質除了短期與工作記憶的訊息維持以外，還涉及了多種高階複雜認知歷程。因此當我們利用 fMRI 的研究資料進行推論時，一定要非常小心，尤其進行逆向推論時，最好能以 fMRI 資料庫的研究證據作為推論依據。最後，有一些證據顯示，當功能性影像顯示某一腦區在進行特定認知歷程有明顯的活動，但該區受損的病人該項認知歷程並未受到損害。這些內部不一致的證據在腦與心智運作的關連性上代表什麼意義，也值得我們深思。

八、結論與未來展望

探索大腦、心智與行為的關係，整合多種研究工具已經是當代認知神經科學研究的重要趨勢。每一種腦功能研究工具只能提供有限的資訊，每種工具只能回答符合該工具特性的問題，例如 fMRI 告訴了我們哪些腦區可能涉及了特定心智處理歷程。而腦電波 (Electroencephalography, EEG) 與事件關連電位 (Event-related potential, ERP) 的研究方法，雖然可以在以毫秒為單位上記錄到動態的大腦訊號，然而其在定位能力上卻不如 fMRI。腦磁儀 (Magnetoencephalography, MEG) 雖然同時具備了良好的空間與時間解



析度，卻對於環境雜訊非常敏感。穿顱磁刺激儀（Transcranial magnetic stimulation, TMS）可以提供腦區域間與腦與行為間推論因果關係的證據，然其進行實驗仍需要依賴對於大腦結構與腦區功能的知識。因此多種研究工具的整合，可以提供不同角度的觀察與不同面向的證據。其次，我們也應該更積極地朝著建立行為反應指標與大腦功能性神經活化的關聯性前進，而不是只單純地侷限在行為或神經研究的單一面向上。此外，我們也不能夠忽略大腦在神經結構與神經傳導上，與功能性神經活化間的密切的關係。

許多學者認為，人類的大腦與心智是天賦遺傳與文化環境的共同產物。它們的演變不僅在個人的一生中進行，也在世代中進行：大腦、心智、文化與環境會形成生生不息的雙向互動。在此觀點下，探討人類心智與大腦之間的關係，需要將社會環境與人類文化納入考量，才能獲得完全的理解。同時在討論人類社會制度或文明演進時，也可從心與腦之間的互動與演化，獲得若干的啓示，有學者就曾指出，從物種演化的限制中，可推論某些的語言特徵與文化類型何以在人類歷史中永遠不會出現過。在大腦、心智文化與環境的循環互動架構下，國內學者可以依循著下列三個主軸探討心智歷程與神經機制關係的本質：

1. 差異的存在：處在不同個人性格、特定社會環境或文化氛圍下，大腦與心智互動是如何受到這些差異的調節。
2. 經驗的影響：探討身體（運動、腦傷、病變與復原）、心理（學習、教育、靈修）及更重要的社會（模仿、從眾）的經驗三者如何影響大腦運作使心智產生變化。
3. 發展的過程：上述兩個因素如何在從新生兒到老年的過程中交織影響心智與大腦發展與變化。

透過這三個軸向推動腦與心智的研究，我們需要鼓勵來自不同學科領域研究者的交流與合作。雖然開始一定是困難的，畢竟各個學科領域有著自己獨特的語言，可是惟有透過領域間的積極對話，才能繼續深化研究方法，增加研究議題的廣度，並且找到理論與應用結合的方向。我們相信國科會人文處這一心智科學大型儀器計畫將有助於此類研究在國內的人文社會科學領域生根，同時發展出自己的研究特色，並對學術做出特殊的貢獻。