

腦神經認知、生物遺傳研究與二語習得

靳洪剛

美國漢明頓大學東亞系

摘要

隨著腦科學技術的迅速發展，語言習得的跨學科研究日益增多。特別是近期，利用不同科技手段（核磁共振腦成像、腦電波、眼動儀、腦紅外測量儀等）觀察、探究人腦加工、學習語言資訊的認知生物遺傳基礎的研究不斷湧現，具體研究不同腦區的腦白質及腦灰質的結構變化（structural changes）、區域間整合性（inner integrity）、遺傳基因等因素與語言習得的相關性。漢語作為二語領域，與二語習得相關的腦神經生物遺傳研究的探索仍在起步階段，專門的腦神經生物認知研究的介紹十分有限。為使本領域的研究發展與其他跨學科領域接軌，我們必須對相關學科的基礎研究及近期發展有所了解，包括新技術的使用、新的研究方法的引入、新的與二語習得直接相關的研究結果。本文旨在綜合介紹這一領域的三個方面：一是資訊加工、傳導的腦神經生物基礎；二是不同腦成像技術、基因分析研究在語言習得研究領域的應用；三是腦神經生物認知及基因研究在二語習得領域的應用及成果。

關鍵詞：腦神經認知、生物遺傳、腦灰質、腦白質、結構變化、二語習得

隨著腦科學技術的迅速發展，語言習得的跨學科研究日益增多。特別是近期，利用不同科技手段（核磁共振腦成像、腦電波、眼動儀、腦紅外測量儀等）觀察、探究人腦加工、學習語言資訊的認知生物遺傳基礎的研究不斷湧現，具體研究不同腦區的腦白質及腦灰質的結構變化（*structural changes*）、區域間整合性（*inner integrity*）、遺傳基因等因素與語言習得的相關性。成人二語習得研究結果告訴我們，人的大腦具有相當的可塑性，大腦的各個神經組織在人的一生中可以不斷重組、不斷發展。近期，有更多的研究者利用核磁共振（*functional Magnetic Resonance Imaging, fMRI*）及擴散張量腦成像（*Diffusion Tensor Imaging, DTI*）的不同技術對二語學習者腦灰質與腦白質中的基因及纖維束等進行腦成像分析研究，結果顯示，腦灰、白質的容量、大小、密度與外語學習能力、訓練方式、個體差異有正相關，特別是腦灰、白質的液體容量變化可以用來預測學習者的語言水準及學習過程。

漢語作為二語領域，與二語習得相關的腦神經生物遺傳研究的探索仍在起步階段，專門的腦神經生物認知研究的介紹十分有限。為使本領域的研究發展與其他跨學科領域接軌，我們必須對相關學科的基礎研究及近期發展有所了解，包括新技術的使用、新的研究方法的引入、新的與二語習得直接相關的研究結果。本文旨在綜合介紹這一領域的三個方面：一是資訊加工、傳導的腦神經生物基礎，特別是與大腦語言加工、資訊傳導接收相關的腦灰質、腦白質以及相關的神經組織；二是不同腦成像技術、基因分析研究在二語習得研究領域的應用，研究對象包括單語與雙語學習者，兒童與成人，一語與二語，不同基因類型等；三是腦神經生物認知及基因研究在二語習得領域的應用及成果，包括兒童人工語言、雙語學習，成人二語密集訓練等。

1. 資訊加工、傳導、接收的腦神經生物基礎

儘管大腦是一個複雜的組織，但可以根據解剖結構分解為不同的組成部分。首先大腦可以分為左半腦和右半腦，每個半腦又分四個腦葉，分別是額葉（*the frontal lobe*）、顳葉（*the temporal lobe*）、頂葉（*the parietal lobe*）和枕葉（*the occipital lobe*）。在每個腦葉及其他部位均有與中央神經系統及其他神經系統相關共存的腦神經軸突（*axon*）、腦灰質（*grey matter*）和腦白質（*white matter*）以及髓磷脂（*myelin*）。這幾個部分構成腦神經生物傳導、加工資訊的關鍵，也是語言認知加工必不可少的組成部分。只有了解這一組成部分的特性及功能才能更好理解目前腦神經生物認知研

究的重點及結果。

1.1 大腦神經系統中的軸突

軸突（axon）是一種細長型神經纖維，也是神經元的延伸部分。圖 1 提供軸突橫截面結構。其中包括五個組成部分，都可協助軸突傳送資訊。軸突在人腦中起的作用是將神經元主體的資訊通過軸突，以化學電沖（electrochemical impulse）的方式傳導給腦的其他部位或區域。

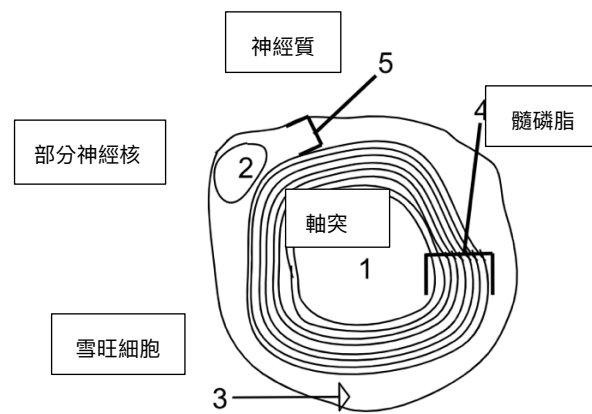


圖 1. 軸突（axon）橫截面結構：（1）軸突（axon）、（2）部分神經核（nucleus）、（3）雪旺細胞（Schwann cell）、（4）髓磷脂（myelin）、（5）神經質（neurilemma）

軸突傳導的資訊有的來自感知系統，有的來自運動肌系統、有的來自體腺系統。軸突（axon）和樹突（dendrites）都是神經元的一部分，都跟資訊傳導、接收相關，但是兩者的物理外形及傳導功能不盡相同。就外形講（見圖 2），樹突由粗到細呈尖形錐體，體積通常較小，而軸突的直徑、大小、長度通常持恆，直到軸突終端（axon terminal），雖有叉出，但不是錐體。軸突一般較長，體積也較大。就功能講，樹突通常是從其他神經元接受信號的接收體，但軸突則是傳導主體，神經元要傳導給其他神經元的信號必須通過軸突。此外，少數樹突也可承擔傳導主體信號的工作。

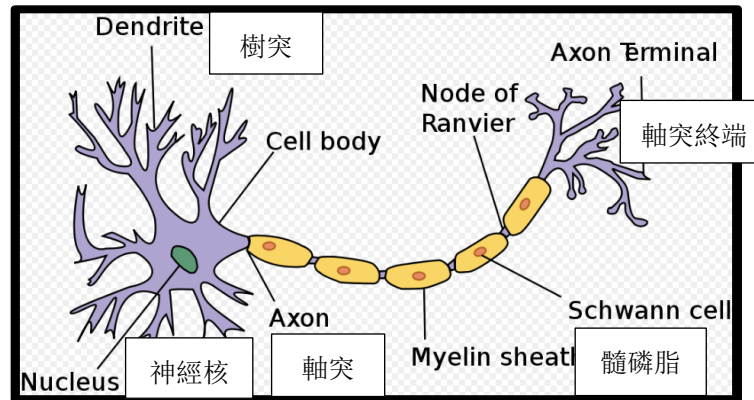


圖 2. 樹突與軸突的物理外形差別

1.2 腦灰質與腦白質 (the grey and white matter of the brain)

如下面圖 3 所示，腦灰質與腦白質同在大腦的不同腦區交織存在。腦灰質占整個大腦體積的 10%，是一種腦神經細胞纖維組織，也是神經元 (neuron)、神經核 (nucleus)、未經髓磷化的軸突 (axon)、樹突 (dendrites) 存在的核心地帶。

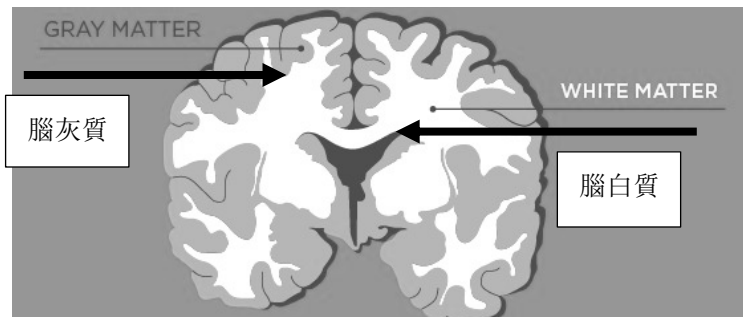


圖 3. 大腦的腦灰質與腦白質

腦灰質的組成部分除了與以上的神經細胞相關的成分外，還包括膠質細胞 (glial cell)、毛細血管 (capillary blood vessels)。腦灰質分佈在大腦和小腦等不同區域，其作用是協助大腦神經網路的資訊傳導及與大腦各部位的聯繫。傳導的資訊主要來自三個系統：肌體系統 (動作、運動等)、感知系統 (視覺、聽覺、嗅覺等)、腎腺系統傳送來的資訊。灰質區是高級學習、注意控制、思維的重鎮。

腦白質事實上是腦灰質的不同形式，是髓磷化後的軸突所在地。髓磷脂通常長在長串軸突的外圍，其白色脂肪物質使得這一部分的腦質呈白色，因而稱為腦白質。

腦白質的組成部分，除了軸突、髓磷脂外，還有用來製造髓磷脂的少突膠質細胞（oligodendrocytes）、毛細血管和星形膠質細胞（astrocytes）。腦白質的主要功能是承載已經髓磷化了的軸突（axon）。軸突在中央神經系統中起重要作用：即傳導來自不同神經元的資訊，是與大腦其他部位實現具體連結傳導的管道。白質內髓磷脂的作用是在軸突外圍建立厚厚的保護層（見圖 1），保證軸突內的資訊不但快速傳導，而且不會外漏。目前不同的腦成像技術（如 fMRI、DTI 等技術，詳細解釋見第二節）即可捕捉腦灰質或腦白質纖維束的擴散方式及特質，用來研究包括語言在內的資訊加工過程。

除了髓磷脂外，軸突還有幾個重要的組成部分也都分佈在腦白質內（見圖 4）：（1）軸突崗（hillock），即在軸突前端與神經細胞相接，是負責向軸突運送信號的第一站；（2）軸突端粒（telodendria），是軸突後端由一系列呈顆粒狀的物質組成的枝叉；（3）軸突終端（axon terminal），是端粒枝叉的較粗部分；（4）行動電位（action potential），每個軸突端粒都有一個終端，行動電位的資訊傳導都是通過端粒終端進行傳導的，其過程精密複雜，這裡有必要詳細介紹一下。

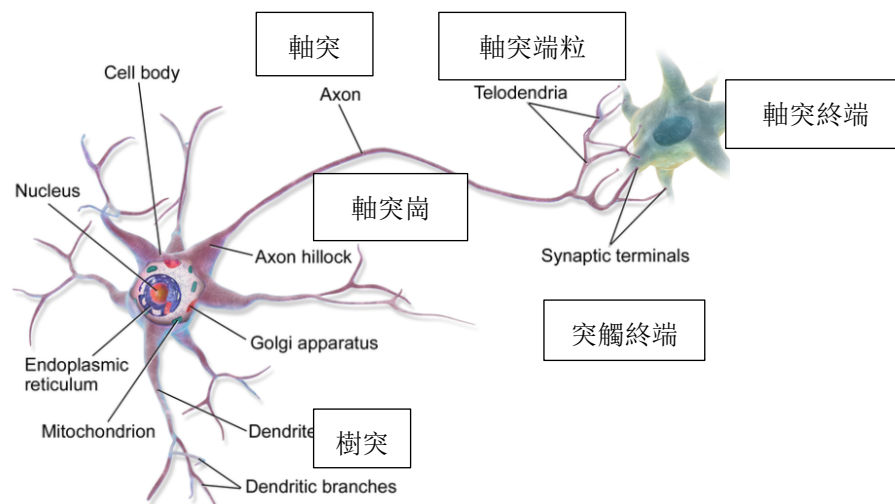


圖 4. 軸突的幾個重要組成部分

行動電位是一種獨立存在的化學電沖。詳細解釋見圖 5。它從細胞主體 A 開始攜帶資訊，穿過軸突，到有軸突端粒的終端去尋找與目標細胞相關的化學突觸（chemical synapse），由此釋放帶有主體資訊的化學電沖，以期得到另一神經元 B 樹突的接收。化學突觸是指生物間傳導資訊的交叉通道或空隙。只有通過突觸

(synapse)，腦神經網路系統的資訊才能從軸突終端傳達至鄰近的其他神經元或細胞的樹突，最後傳導至大腦各區，形成中央控制的神經通路。這裡行動電位的傳播特點是收齊全送、缺一不送，即資訊要麼全部傳導，要麼都不傳導。所以行動電位的大小形狀是統一的，以保障傳導的資訊從一個終端到另一個終端是一致的，是完好無缺的。軸突終端產生行動電位的運作十分快速，通常不到千分之一毫秒，而且同時可以成倍增長。科學家早已通過動物和人類觀察研究對這一軸突傳導過程，有詳細記錄和確切科學證據，其中涉及圖 5 提到的各個具體傳導接收組成部分，這裡不再贅述。

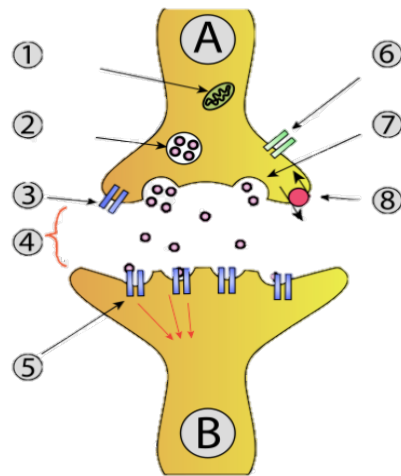


圖 5. 神經元 A 與 B 的資訊傳導、接收過程：(1) 線粒 (mitochondrion)、(2) 神經傳導機制攜帶的突觸小泡 (synaptic vesicle)、(3) 自動接收器 (autoreceptor)、(4) 神經傳導機制發放突觸 (synapse released)、(5) 突觸發放後的電位接收 (postsynaptic potential)、(6) 鈣通道 (calcium channel)、(7) 囊泡的胞吐 (exocytosis)、(8) 神經導質回收 (recaptured neurotransmitter)

1.3 大腦的髓磷化 (myelinization)

我們這裡討論的髓磷化主要是在腦白質的中央神經系統中發生的過程，因為這一過程與語言資訊的傳導加工有關係。如前所述，髓磷脂是一種附在腦白質中軸突外的白色脂肪性物質，通常生長在軸突的外圍，是神經元組織內的重要成員，也是一種神經系統的保護隔離層。髓磷脂通常分兩種：一種是腦白質的一部分，由成熟的少突膠質細胞 (oligodendrocytes) 組成，另一種是腦灰質的一部分，由未成熟的前體少突膠質細胞 (oligodendrocytes) 組成，通常留在灰質神經細胞系統中。髓磷

層的厚薄決定資訊傳導速度的快慢及順暢程度。髓磷脂的功能主要是通過髓磷保護層，提升軸突的傳遞（具體說放電）的速度與效率。比較無髓磷化與髓磷化後的軸突傳導方式就可知其作用的不同，無髓磷化的軸突放電傳導的方式是連續波動式，而髓磷化後的軸突傳導方式是跳躍式鹽水傳導速度，後者較前者快得多。髓磷脂的發展從懷胎的最後三個月開始，隨著大腦的認知發展及軸突數量的增多而增多、增厚，一直到成人早期，其發展才開始減緩。事實上，在人的一生中，髓磷脂的發展可以持續不斷，未成熟時停留在大腦灰質中，成熟後轉入到大腦白質區域，成為軸突的外圍保護層。腦白質均帶有毛細血管，用來輸送氧氣、乳糖等給白質的纖維細胞。這也就是為什麼使用腦成像技術可以測量到血流量的變化，以此推導資訊傳導的區域、速度及結構變化。

以上討論的大腦軸突、腦白質、腦灰質、腦髓磷化等神經組成部分都與語言認知加工息息相關，只有清楚了解它們的基本屬性及功能才能更好地了解並使用目前二語領域腦神經及生物研究的方法及結果。

2. 不同腦成像技術、基因分析研究在語言習得研究領域的應用

兩千年後，利用 fMRI 技術與 DTI 技術逐漸普及化，探究大腦不同部位功能及結構的研究也層出不窮。其中腦灰質與腦白質運作中的結構變化、區域聯繫及生物遺傳因素也是探究的一部分。這兩種技術也為二語習得研究人員引入語言習得研究領域，用來從腦神經認知加工角度及語言層次探究二語習得的腦神經認知結構及生物基因基礎。

fMRI 技術在本世紀初就用來研究腦灰質組織的變化與語言的關係（Petersson et al., 2004; Forkstam et al., 2006 等）。研究不但涉及人工語言，而且也採集使用自然語言的學習資料（Bookheimer, 2002; Friederici et al., 2002; Kaan & Swaab, 2002 等）。研究結果顯示，在語言資訊加工的同時有與腦灰質、腦白質相關的一系列腦區活動，分別是左中內側額葉回、前扣帶回皮層、顳葉頂皮層以及右腦區，這些不同腦區的腦成像分析可以具體到語言的語義、語音、句法等層面的加工、習得等。

DTI 技術是類似 fMRI 的另一種有潛力的腦成像技術，常常用來測量腦白質微

觀結構層面的變化，如白質的軸突大小、病理特徵、異性度、擴散方向等。測量主要通過兩個項目來完成：一是非等向性指標（fractional anisotropy, FA），用來測量腦白質在不同腦區資訊加工時的腦漿水分子的流動、異性擴散情況；二是徑向擴散值（radial diffusivity, RD），用來測量腦白質在不同腦區資訊加工時的腦漿液體徑向垂直的擴散率，這些測量都能在某種程度上捕捉腦白質的細微變化。

FA 指標是 DTI 的主要測量手段，通常是針對正常人的大腦結構分析，一般分析從零開始，觀察腦液水分子遞增程度及過程。在 FA 基礎上發展出的後期測量方法有定向非等向性指標（orientation fractional anisotropy, OFA）及綜合非等向性指標（generalized fractional anisotropy, GFA），都是更為全面的測量方法。FA 檢測的擴散遞增程度通常與大腦的資訊加工相關：如軸突的髓磷化程度、纖維密度、腦軸突直徑、水分子濃度等（Beaulieu, 2002）。這些因素的高低、大小可以在不同程度上影響資訊加工與傳播的快慢。因此，髓磷脂的厚度多少和腦軸突直徑大小等都能揭示資訊傳播的過程、速度及順暢度。RD 測量反映腦液體相對於腦纖維束來說的徑向垂直擴散率。主要用來比較正常人 FA 標準與非標準測量之間的不同，尤其是用來判斷病理特徵與程度，如缺血程度、軸突破壞程度、髓磷發育不良、產生炎症等方面的白質表現。

不同實驗結果顯示，腦白質的 FA、RD 是兩個反向常數，FA 的上升通常預示著 RD 的下降。這兩個測量項目通常用來推測髓磷脂變化和腦軸突大小變化。FA 的垂直或平行擴散特質反映人腦神經元資訊傳播的生物基礎：即垂直擴散反映髓磷化過程及程度，平行擴散反映樹突大小，這些都是大腦資訊傳遞、加工的一部分，自然也可反映二語資訊的加工、學習過程。為此，用 DTI 技術測量 FA 與 RD 兩者的變化可以讓我們精確知道腦白質組織的細微結構變化，尤其是掌管語言加工的各腦區之間加工的相同及差異，以期推斷與技能相關的二語學習結果。例如，兒童經過訓練是否提高了閱讀能力（Keller et al., 2009; Gebauer et al., 2012），第二語言的密集訓練是否預測學習者的語言成績及可能達到的語言水準（Flöel et al., 2009; Qi et al., 2015; Mamiya et al., 2016; Pliatsikas et al., 2015 等），這些問題都能借助 DTI 的前測、後測掃描腦成像對比，來追述不同腦區的腦白質纖維組織及軌跡的變化與不同腦區間腦白質的內部協調性，最終推斷學習過程（如閱讀或密集語言訓練等）與學習結果的相關性（詳細討論見第三節）。

除了像 fMRI、DTI 技術的使用外，基因工程分析研究也應用到語言習得研究中。

例如有些研究利用名叫 COMT 基因組的多態性 (polymorphism) 與腦白質 FA 的相關性預測二語習得的個體差異 (Egan et al., 2001; Thomason et al., 2010; Mamiya et al., 2016)。COMT 的全名是 Catechol-O-Methyltransferase, 中譯為「兒茶酚-O-甲基轉移酶」。COMT 是指在大腦中存在的, 用來編碼、控制神經網路中的蛋白、酵素等化學成分的基因組合。這一成分是用來分解膠質細胞 (catecholamine), 釋放多巴胺 (dopamine)、腎上腺素 (epinephrine)、去甲腎上腺素 (norepinephrine), 進而掌控人體代謝及神經元資訊傳導 (neuron-transmitter) 的基因組。COMT 基因蛋白存在於神經元及膠質細胞中, 也包括產生髓磷脂的少突膠質細胞 (oligodendrocytes)。研究顯示, COMT 的多態基因組合會影響酵素釋放活動, 例如在 158 位置上的蛋氨酸 (methionine, Met) 就較纈氨酸 (valine, Val) 的變異會產生更為低度的熱穩定性, 因而可以通過分析 Met 與 Val 基因組合來預測不同個體的語言學能差異以及這一差異導致的語言習得差異。例如, 通過分析家庭遺傳資料發現, COMT 有三類表型變異組合: Val/Val, Met/Met, Val/Met, 這三類對應三種基因類型。COMT 三類基因群組的抽血取樣顯示, Val/Val 基因型人的 COMT 血樣活動最劇烈, Val/Met 居中, Met/Met 最低。因此, 不同的 COMT 基因組合也可能通過腦成像掃描來記錄不同基因類型學習者的腦反應。實驗發現, Met/Met 組的前額葉啟動反應都弱於 Val/Met 及 Val/Val 組 (Egan et al., 2001; Mattay et al., 2003), 此外, 這三組間的前額葉啟動程度與腦中區的多巴胺組合有相關性。這些基因類型差異很可能導致不同二語學習者腦白質擴散特質的不同, 進而產生不同的語言學習或加工結果。下面的文獻綜述會引用具體的實驗研究來證實 COMT 基因組合在二語習得中的作用。

3. 腦神經生物認知及基因研究在二語習得領域的應用及成果

我們知道, 學習一種新的語言意味著大腦生物結構的相應改變。這種改變是反映在語言加工相關區域的腦灰質或腦白質中, 具體說是 FA 或 RD 值的變化。例如布羅卡區 (即大腦的巴氏 44、45 區) 是加工自然語言和人工語言的重鎮。此外, 不同腦區腦白質的內部協調、一致性整合也是人類語言交流的關鍵。腦白質組織在任何區域的輕微失常都會導致語言失常, 例如閱讀障礙 (dyslexia)、發展性口吃 (developmental stuttering), 甚至正常人的某個腦區的某種技能問題等, (Klingberg et al., 2000; Sommer et al., 2002; Watkins et al., 2008 等)。這是因為不同腦區的腦白質負責不同的技能加工及學習。例如, 在頂顳葉交界區的腦白質掌管閱讀能力, 頂葉

與額葉交界區的掌管語義決策速度 (Gold et al., 2007)，胼胝體 (CC 區) 掌管雙手協調技能 (Johansen-Berg et al., 2007)，後頂葉皮質掌管視空間能力 (Wolbers et al., 2006) 等。許多研究者從涉及語言的大腦區域出發，對正常二語學習者的腦白質的 FA 的垂直、平行變化進行觀察，以期了解加工二語語言資訊時大腦的組織結構及其功能。二語學習者包括不同年齡的單語、雙語兒童及成人，也包括不同語言水準、不同訓練方式的成人一語使用者與二語學習者的對比等。

3.1 對單語、雙語兒童及成人的腦白質變化的研究

Floel 等 (2009) 採用 DTI 技術考察十二名兒童學習人工語言的語法規則的過程。該研究考察的重點是布羅卡區附近腦白質 FA 值的增長變化，以期了解語法規則學習的個人差異。通過測量在布羅卡區附近的纖維分布及各項異性增長情況，兩個實驗結果都顯示，在左腦布羅卡區附近的腦白質纖維束 FA 值的上升或下降與句法加工有關，但與右腦同區域無關，與學習者對規則的熟悉度也無關。這一結果還反映該區域與其他語言區域的整合度有相關性，即 FA 值的上升預示整合度的完好，首次證實兒童語法規則的學習能力及學習者之間的個人差異可以通過 DTI 的 FA 值進行測量並預測。換句話說，語法規則學習與人左腦布羅卡區的腦白質組織的 FA 值有密切關係，不同的腦白質組織結構髓磷化程度和軸突大小及 FA 值可能導致語法學習的個人差異。研究者還強調，語言資訊從布羅卡區到其他腦區的有效協調、迅速傳送（即整合性 integrity）是語法規則學習的決定性環節。

除了兒童人工語言學習外，還有腦成像研究者探究不同年齡的雙語學習者的不同腦區腦白質結構變化及其內部整合性 (integrity) 與語言加工、使用、認知能力的關係，特別是雙語使用者的語言學習及使用經驗（如關鍵期前後的早期、後期雙語使用、平行性雙語者 (simultaneous bilingual) 或先後習得的序列雙語使用者 (sequential bilingual) 等，他們試圖探索這些不同語言經驗如何改變腦白質結構 (FA 值) 及是否有認知優勢等問題，但到目前為止，這類的研究結果為數不算多，結論也並不一致。

Luk 等學者 (2011) 使用 DTI 技術對 14 位終生/老年雙語使用者與 14 位相同年齡的單語使用者的腦白質結構變化及內部整合性進行了對比分析。結果發現，雙語使用者在幾個與語言加工相關區域的 FA 值均高於單語使用者，例如，胼胝體區 (CC)

的 FA 值，同時這一效應還延伸到雙側的上縱筋膜（superior longitudinal fasciculi），到腦枕葉的一個叫額枕下束（Inferior Fronto-Occipital fascicle, IFOF）。這兩區都是多功能腦白質的集中地，其功能之一是連接四個腦葉（額葉、顳葉、頂葉、枕葉）。這些區域都跟不同的語言加工相關。結果還顯示，凡是 FA 值提升的區域，腦白質區域間的整合性也完好。因此，Luk 等學者認為雙語使用不但能夠改變腦白質結構進而促進語言加工，同時也可促進白質在不同區域的內部協調整合，進而建立雙語使用者的認知優勢。但 Gold 等學者（2013）的研究採用同樣技術測試了 20 個 63 歲的終生雙語使用者和 20 個同齡單語使用者，其結果與 Luk 等人的結果不完全一致，例如，他們的雙語被試的 FA 值在某些區域（胼胝區、IFOF 等）較 Luk 等的結果低，而且這幾區的內部整合性也有所降低，但總體上，終生雙語者的腦白質 FA 值與整合性要麼與單語者一樣，要麼好於單語者。該研究強調，雙語經驗，雖有不同，可以協助使其語言、認知控制能力在一定程度上保持完好。

Mohades 等學者（2012）發現，以上兩個研究除了結果不同外，仍有其他不足之處，其中之一是他們的雙語被試事實上並不一致，很可能導致結果的不同，例如，這些被試的雙語學習起始時間不一，有的是語言關鍵期前開始，屬於早期雙語使用者，有的是關鍵期後開始，屬於後期雙語使用者。因此，後來的研究開始重視對雙語被試的控制。例如，Mohades 等學者（2012）採用兩個實驗組和一個對照組：即 15 個平行雙語使用者，15 個先後習得雙語使用者及 10 個單語者作為對照。實驗對被試的 DTI 的 FA 值進行了比較，特別是在四個與語言加工相關的不同腦區的腦白質神經束結構變化。結果發現，平行雙語組有兩個腦區（IFOF 與 CC）的 FA 值比其他兩組有顯著性差異，尤其是在掌管語義加工的 IFOF 區，平行雙語者的 FA 值最高，顯示了平行雙語者的語義加工優勢。此外，平行雙語組在 CC 區後部（掌管大腦左右半球分工的腦區）的 FA 值低於單語組，研究者指出，這一結果與 Abutalebi 等（2007）的實驗結果相同，即單語者傾向使用大腦單側化功能，而雙語者使用大腦左右雙側來加工語言。

García-Pentón 及其同仁（2014）在平行雙語研究的基礎上，又針對早期平行雙語兒童（語言關鍵期前開始的雙語學習者）的腦白質與腦灰質之間的關係進行了考察。實驗分兩組：一組為 13 名雙語兒童，一組為 13 名同齡單語西班牙語兒童。結果顯示，雙語兒童比單語兒童在腦白質的 FA 值在兩個網路子系統中更高，反映在運作上更為有效。這兩個網路子系統分別在大腦語義、語法及語音加工的腦白質區

域，從腦前葉、頂葉、顳葉，到枕葉，遍布全腦，而且也都與腦灰質聯結。該研究認為，早期雙語者的兩語並用使得腦神經網路能在不同腦白質與灰質區域自如穿梭而且有效傳遞資訊，由此形成了雙語者的認知優勢。

3.2 對成人二語學習與腦神經生物遺傳關係的研究

在以上研究的基礎上，Schelgel 等（2012）對 11 個二語為漢語的學習者及 16 個同齡單語英語使用者進行了為時 9 個月，每月一次的 8 次長期 DTI 追蹤記錄觀察。DTI 的腦影像記錄是在二語學習者九個月的語言密集訓練專案中採集。結果顯示，當成人密集學習一種新的語言，其腦白質在大腦不同區域也開始發生持續變化，主要表現在 FA 值隨著語言訓練的強度及長度變化，其變化均分布在與語言加工相關的左腦區域及相對應的右腦區域（即雙語使用者語言加工傾向於雙側加工），最明顯的變化是在腦額葉掌管左右腦分工的 CC 區，這一區的變化在之前的研究均無得到過重視，並無將其列入語言加工範圍。最後，該研究強調，腦白質的動態可塑性在成人的語言密集學習中起重要的作用，使用 DTI 技術長期追蹤觀察研究不失為一種可取的方法論。Hosoda 等（2013）在以上方法論的基礎上，採用了長期追蹤＋跨組分析的研究模式。實驗使用日語為二語的成人學習者，一組參加長期追蹤；一組參加跨組分析。結果顯示，跨組被試在不同部位的腦白質 FA 值似乎與二語學習者的詞彙量顯示正相關。FA 值分別分布在右半腦皮層的多個與語言加工相關的區域。長期追蹤被試組的結果則更有意思。首先，對比雙語與單語被試在前測的初次 DTI 掃描，無呈現組間差別，其次，16 周後，特別是經過 16 周的詞彙密集訓練後，雙語被試的 FA 值增長幅度以及涉及區域與跨組被試完全一致，但與單語被試不同，說明長期追蹤的結果與跨組分析結果一致：密集訓練可以改變腦白質的結構。此外，雙語組在無二語訓練的一年後又進行了後測掃描，結果發現，以上區域的 FA 值與初次掃描無統計意義的不同，即語言密集訓練的 FA 值上升隨時間延長而消失。該研究對這一結果的解釋是人的腦神經系統是動態、彈性的，二語使用及訓練帶來的腦結構變化，如同任何記憶系統的資訊，也都是以使用為基礎的，如果不能持續使用，訓練所得也會隨時間而流逝。

Pliatsikas 等（2015）決定考察成人二語全方位的高強度密集班，特別是高級水準學習者的腦白質變化與語言訓練及使用的關係。研究希望探究兩個重要問題：即關鍵期後的二語學習者的語言訓練強度及每日使用頻率是否導致的腦白質結構變化？

這一變化是暫時性的還是永久性的。實驗仍採用 DTI 技術對兩組(實驗組與對照組)的影像進行對比分析。從複雜統計分析後的 FA 值結果看,二語學習者的 FA 值及其分布均與單語者不同,但與早期及後期雙語的腦白質結構變化及分布相似(Luk et al., 2011; Mohades et al., 2012; Schelgel et al., 2012)。該研究強調,高密度語言訓練的效果如同早期或後期雙語使用,成人語言訓練及使用,如果足夠密集、有效,在語言關鍵期後仍然可以改變腦白質的結構並協助推進學習者的腦白質區域之間的內在整合性。

Mamiya 等(2016)的研究特點是將 DTI 技術與 COMT 基因分析結合起來對成人二語習得進行考察。實驗觀察 79 名剛入美國大學的中國留學生的英語語言訓練過程與腦白質變化及個人基因類型的關係。79 名被試選自 193 個參加過基因測試的學生,以保證被試有足夠的三種基因類型代表(Mel/Mel; Mel/Val; Val/Val)。被試分為兩組:實驗組參加英語密集訓練班(16 天 56 小時密集班,每天 3-5 小時課程)(44 人);對照組參加普通英語班培訓(35 人)。第一次 DTI 掃描記錄(前測)在項目開始後 8 天進行,第二次在項目結束後 8 天之內完成(後測)。結果顯示:1、密集學習的天數與語言加工腦區腦白質的 FA 值(腦纖維束擴散遞增程度)有正相關性,與 RD 值(腦液體的徑向垂直擴散率)有顯著負相關,研究認為,這種高 FA 值及低 RD 值證實 Song et al. (2002, 2005) 的研究結果:即 FA 及 RD 可能反映大腦髓磷脂厚度可以隨密集學習而增加,促進資訊傳遞的效率。2、這一相關性同時還取決於學習者 COMT 的基因類型。屬於 Mel+Val 或 Val+Val 基因類型者在密集學習期間顯示較高的 FA 值及較低的 RD 值,學習結束後則呈現相反趨勢。但屬於 Met+Met 基因類型的學習者則無顯示上述相關性。研究者對於這一結果的解釋是:Met+Met 型學習者在密集學習期間多巴胺的排放也許較其他類型的學習者高,因此抑制了 FA 值的增高,同時影響了髓磷脂的增厚,這一結果也反映在學習者的學習變數,其中一部分為終考成績。3、FA 值+COMT 基因類型可以預測密集專案學習者 46.2% 的學習變數,其中一部分是終考成績。

4. 餘論

從以上研究可知,腦影像技術與腦神經生物認知與基因學的結合為二語習得研究開創了一個新的研究領域。科技的應用、跨學科研究和高度複雜的統計分析讓我們進一步從研究內容、研究方法及研究結果中了解到腦白質與腦灰質中神經網路的

結構及個人基因類型如何反映並輔助雙語或二語的學習、使用的過程。

首先，就研究內容看，以上文獻綜述讓我們了解到，目前的二語習得研究的跨學科性很強，研究內容範圍很廣。從腦影像資料而來的腦白質的結構變化到不同腦區之間的內部整合性，從腦白質到腦灰質的聯結、變化，從測量單語兒童被試的 FA 值到不同類型的雙語使用者的 FA 值比較，從平行雙語到早期、晚期雙語學習者的腦神經可塑性對比，從不同年齡的兒童雙語學習者到成人二語密集項目的學習者等，讓我們從不同的角度、不同的被試、不同的學科了解二語學習的複雜性。

其次，就方法論而言，上述分析、討論告訴我們這一領域可以說是技術上領先，方法上創新的領域。有的研究使用複雜的 fMRI、DTI 等不同技術，有的將複雜的統計模型分析與新技術結合使用，有的將心理學腦神經認知調查方法與生物遺傳學的基因分析法結合起來進行分析，有的使用長期追蹤，有的使用跨組分析，還有的將兩種方法結合起來用在同一個研究中。這些研究方法都給我們領域現有的研究在方法論上有新的啟迪。

再次，就研究結果而言，這一領域雖然歷史不長，但發展很快，成果豐碩。第一，這一領域提出使用精確的科學測量及計算方法，儘管仍然有待於完善，來計算腦神經結構變化，如計算腦白質的 FA、RD 值來反映腦神經，特別是與語言相關腦區的腦神經結構變化，其中包括髓磷化、纖維密度、腦軸突直徑、水分子濃度等。由此推斷語言加工過程、語言使用經驗、語言密集訓練與語言習得的關係，並進一步證明二語學習過程及頻繁使用不但可以使學習者有語言優勢，而且亦有認知優勢。第二，這一領域從跨學科角度探究不同語言使用者的使用經驗與大腦白質、灰質變化的關係。這類研究資料涵蓋不同年齡段、不同語言使用經驗，不同密集度的語言訓練的學習者的腦成像掃描及資料分析，從兒童到成人，單語到雙語，一語到二語，語言關鍵期前到關鍵期後，平行性雙語到先後序列雙語等，系統回答不同年齡段的雙語、二語學習者的語言習得問題，如是否有關鍵期、過了關鍵期，人是否仍保持語言學習的可塑性及彈性，為什麼等。儘管現在的研究結果仍有不一，在解釋上各有千秋，但這些成果拓寬了二語習得領域的範圍，深化了研究內容。第三，這一領域的成果是直接切入成人的第二語言訓練密集度及語言習得、基因組合個人差異進行分析，以其新的技術，新的視角、新的方法論為我們開闢了一種新的研究方向，即從腦成像的大腦內部影像，如區域內的結構變化及區域間的聯繫來考察語言加工及習得的過程，語言的關鍵期等問題，其研究成果告訴我們，二語學習者的語言訓

練的密集度、時間長短似乎都能影響與語言加工區域相關的腦白質結構變化，此外，語言訓練的停止也意味著腦結構變化可能還原。第四，這一領域提供了創新性的研究範式，將科技、統計、腦神經生物學、基因學、二語習得、語言學等領域統整融匯進行二語習得過程、語言使用、語言培訓、學習者個體差異等方面的研究，為二語習得學科的發展提供了一個新的研究角度。

但是值得提醒的是，儘管以上研究為漢語為二語領域的發展提供了新的方向、方法論、工具、測量方法、跨學科角度分析及解釋等。從以上研究綜述可知，這類研究對人腦的觀察仍然是粗線條的，並不是完整的理論體系。即使 DTI 腦影像提供了具體有腦區分布、有來自不同時空的、較為精確的 FA 值，我們仍不能確定這一腦結構變化是跟中央系統的神經元資訊、軸突大小、髓鞘厚度、腦白質纖維束等的哪一個具體環節相關，腦資訊如何具體加工等，研究者仍在不斷的假設、證實過程。具體到漢語為二語領域，漢語的學習影響因素遠不止以上腦神經生物認知因素、遺傳基因等，還包括漢語的語言、文化特點。因此，這一領域仍處在待開發階段，需要更多的學者去了解，參與、實際操作去開發這一新的領域。

參考文獻

- Abutalebi, J., & Green, D. (2007). Bilingual language production: The neurocognition of language representation and control. *Journal of Neurolinguistics*, 20(3), 242-275.
- Beaulieu, C. (2002). The basis of anisotropic water diffusion in the nervous system—a technical review. *NMR in Biomedicine: An International Journal Devoted to the Development and Application of Magnetic Resonance In Vivo*, 15(7 - 8), 435-455.
- Bookheimer, S. (2002). Functional MRI of language: New approaches to understanding the cortical organization of semantic processing. *Annual Review of Neuroscience*, 25, 151-188.
- Egan, M. F., et al. (2001). Effect of COMT Val108/158 Met genotype on frontal lobe function and risk for schizophrenia. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 98(12), 6917-6922.
- Flöel, A., et al. (2009) White matter integrity in the vicinity of Broca's area predicts grammar learning success. *Neuroimage*, 40, 1974-1981.
- Forkstam, C., Hagoort, P., Fernandez, G., Ingvar, M., & Petersson, K. M. (2006). Neural correlates of artificial syntactic structure classification. *NeuroImage*, 32(2), 956-967.
- Friederici, A. D., Steinhauer, K., & Pfeifer, E. (2002). Brain signatures of artificial language processing: Evidence challenging the critical period hypothesis. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99(1), 529-534.
- García-Pentón, L., Fernández, A. P., Iturria-Medina, Y., Gillon-Dowens, M., & Carreiras, M. (2014). Anatomical connectivity changes in the bilingual brain. *Neuroimage*, 84, 495-504.
- Gebauer, D., et al. (2012). Differences in integrity of white matter and changes with training in spelling impaired children: a diffusion tensor imaging study. *Brain Structure and Function*, 217(3), 747-760.
- Gold, B. T., Johnson, N. F., & Powell, D. K. (2013). Lifelong bilingualism contributes to cognitive reserve against white matter integrity declines in aging. *Neuropsychologia*, 51(13), 2841-2846.
- Gold, B. T., Powell, D. K., Xuan, L., Jiang, Y., & Hardy, P. A. (2007). Speed of lexical decision correlates with diffusion anisotropy in left parietal and frontal white matter: evidence from diffusion tensor imaging. *Neuropsychologia*, 45(11), 2439-2446.
- Hosoda, C., Tanaka, K., Nariai, T., Honda, M., Hanakawa, T. (2013). Dynamic neural network reorganization associated with second language vocabulary acquisition: a multimodal imaging study. *Journal of Neuroscience*, 33(34), 13663-13672.

- Johansen-Berg, H., Della-Maggiore, V., Behrens, T. E., Smith, S. M., & Paus, T. (2007). Integrity of white matter in the corpus callosum correlates with bimanual co-ordination skills. *Neuroimage*, 36, T16-T21.
- Kaan, E., & Swaab, T. Y. (2002). The brain circuitry of syntactic comprehension. *Trends in Cognitive Sciences*, 6(8), 350-356.
- Keller, T. A., & Just, M. A. (2009). Altering cortical connectivity: remediation-induced changes in the white matter of poor readers. *Neuron*, 64(5), 624-631.
- Klingberg, T., Hedehus, M., Temple, E., Salz, T., Gabrieli, J. D., Moseley, M. E., & Poldrack, R. A. (2000). Microstructure of temporo-parietal white matter as a basis for reading ability: evidence from diffusion tensor magnetic resonance imaging. *Neuron*, 25(2), 493-500.
- Luk, G., Bialystok, E., Craik, F. I., & Grady, C. L. (2011). Lifelong bilingualism maintains white matter integrity in older adults. *Journal of Neuroscience*, 31(46), 16808-16813.
- Mamiya, P. C., Richards, T. L., Coe, B. P., Eichler, E. E., & Kuhl, P. K. (2016). Brain white matter structure and COMT gene are linked to second-language learning in adults. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(26), 7249-7254.
- Mattay, V. S., et al. (2003). Catechol O-methyltransferase val158-met genotype and individual variation in the brain response to amphetamine. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 100(10), 6186-6191.
- Mohades, S. G., et al. (2012). DTI reveals structural differences in white matter tracts between bilingual and monolingual children. *Brain Research*, 1435, 72-80.
- Petersson, K. M., Forkstam, C., & Ingvar, M. (2004). Artificial syntactic violations activate Broca's region. *Cognitive Science*, 28(3), 383-407.
- Pliatsikas, C., Moschopoulou, E., & Saddy, J. D. (2015). The effects of bilingualism on the white matter structure of the brain. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(5), 1334-1337.
- Qi, Z., Han, M., Garel, K., San Chen, E., & Gabrieli, J. D. (2015). White-matter structure in the right hemisphere predicts Mandarin Chinese learning success. *Journal of Neurolinguist*, 33, 14-28.
- Schlegel, A. A., Rudelson, J. J., Tse, P. U. (2012). White matter structure changes as adults learn a second language. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 24(8), 1664-1670.
- Sommer, M., Koch, M. A., Paulus, W., Weiller, C., & Büchel, C. (2002). Disconnection of speech-relevant brain areas in persistent developmental stuttering. *The Lancet*, 360(9330), 380-383.

- Song, S. K., et al. (2002). Dysmyelination revealed through MRI as increased radial (but unchanged axial) diffusion of water. *Neuroimage*, 17(3), 1429-1436.
- Song, S. K., et al. (2005). Demyelination increases radial diffusivity in corpus callosum of mouse brain. *Neuroimage*, 26(1), 132-140.
- Thomason, M. E., et al. (2010). COMT genotype affects prefrontal white matter pathways in children and adolescents. *Neuroimage*, 53(3), 926-934.
- Watkins, K. E., Smith, S. M., Davis, S., & Howell, P. (2008). Structural and functional abnormalities of the motor system in developmental stuttering. *Brain*, 131(1), 50-59.
- Wolbers, T., Schoell, E. D., Büchel, C. (2006). The predictive value of white matter organization in posterior parietal cortex for spatial visualization ability. *Neuroimage*, 32(3), 1450-1455.

Recent Neuro-cognitive and Biogenetic Studies and Applications in SLA

Hong Gang Jin

Hamilton College

Abstract

Along with the rapid development in neuro-science technology, there has been a surge in cross-disciplinary studies on second language acquisition (SLA). Especially recently, these studies attempt to explore neurocognitive processing and biogenetic basis of language acquisition by using different technological tools such as fMRI, EEG, eye trackers and MEG, which have helped examining the relationship between language acquisition and structural changes and inner integrity of white and grey matter in different brain regions. As a field, Chinese as second language (CSL) needs to be informed about the development of this new and cross-disciplinary field in terms of its new directions, approaches, and methodology & measures in order to engage in similar empirical studies with CSL data and interface with researchers in different fields. For reasons above, this article presents a comprehensive review on SLA-related neuro-cognitive and biogenetic studies, which can be divided into 3 areas: 1. The neuro-anatomic, neuro-cognitive, and biogenetic bases of information transmitting and processing; 2. Applications of different imaging technologies and bio-analysis tools in SLA research; and 3. research outcomes in the field of SLA neuro-cognition and biogenetics.

Keywords: neuro-cognition, biogenetics, white matter, grey matter, structural changes, second language acquisition