

雙語處理的腦神經理論：舊題新探*

李如蕙^{1,2} · 曾志朗^{1,3}中央研究院¹
國立臺灣師範大學²
國立交通大學³Language and Linguistics
17(2) 147–193
© The Author(s) 2016
Reprints and permissions:
sagepub.co.uk/journalsPermissions.nav
DOI: 10.1177/1606822X15614523
lin.sagepub.com

全球化及數位化的時代為人類的生活帶來急劇的變遷與多語言的環境，日常生活中使用雙語已經是一種常態現象。語言是人類演化下的產物，具有演化歷程中的複雜性與多樣性，而人類的歷史反映在不斷演化的大腦中，大腦本身就是一個因應演化需求發展而成的適應系統，透過統計學習的基本能力，人們能夠習得語言，包括母語及第二語言。同時，在大腦可塑性的基礎上，透過長期經驗或訓練學習產生神經迴路的有效性連結，強化了語言處理及一般執行監控的認知處理的神經迴路，所以雙語發展是大腦神經迴路的重組。透過非侵入性的腦造影設施，研究證據揭露了即使是過了所謂語言學習關鍵期的成年人也可以成功習得第二語言，可見得第二語言習得年齡並非唯一關鍵因素。語言的精熟程度，個體差異，訓練的方式等也都會影響第二語言學習的成效。腦中的雙語，在使用中建構了雙語的心理詞彙，非意識控制的跨語言激發導致雙語競爭，帶來抑制非目標語的認知控制增強的後果，產生跨越年齡層的大腦的結構上和功能上的改變，這樣的效果持續到在老年人身上則具有認知保留的優勢。在現今的數位時代，從日新月異的新媒體載具中擷取資訊的方式對於人類大腦的感知、認知、記憶、搜尋、提取、執行監控等能力都將產生影響。透過數位科技的輔助，可能改變我們使用雙語的方式及學習的機制，在一腦多文的複雜適應系統的運作之下，我們提出「何時停止左腦側化？」的新問題取代「左腦側化何時開始？」的舊議題，有助於揭露大腦演化的本質，預期數位時代將改寫未來人類智慧的定義。

關鍵詞：雙語，第二語言習得，語言習得年齡，心理詞彙，有效性連結，適應系統

1. 前言

隨著全球化的趨動，現代人使用雙語已經是生活中的普遍現象，研究雙語對於語言的發展，語言處理及認知能力的影響的議題，近 20 年來也受到相關領域的研究者的關注 (Kroll et al. 2014; Kroll & Bialystok 2013)，包括語言學、心理學、認知神經科學、及基因學等研究領域的研究者都有許多跨領域合作的研究報告產出，從不同的研究觀點以宏觀和微觀的分析來描繪雙語的樣貌及其內在機制，漸漸讓整體的圖像趨於明朗。

* 感謝潤泰集團捐贈國立陽明大學神經科學研究所「以認知神經科學進行語言及人類複雜系統的跨領域科技整合之國際合作研究」計畫支持本研究工作。

人之異於與我們基因上最相近的黑猩猩，就在於我們人類發展出複雜的語言系統，因此，發展出人類的文明，而黑猩猩則沒有。從演化的觀點來說，歷經幾百萬年的演化歷程，現代人擁有複雜的語言系統，而這個系統也還如同我們的祖先一樣，一直因應環境的變遷而改變，我們的語言隨著時間上和地理上的觸接而衍生的詞彙分化與聚合，產生複雜多樣的語言，而人類大腦對於語言的處理也因應這般複雜多樣的語言而改變。換言之，現代人的大腦是正在演化的腦，與環境中的各項變異互動，時時刻刻都在發生，因此，探究人類雙語的發展樣貌，可以從大腦神經迴路的改變及與其隨之而來的效益來一窺堂奧。

雙語是指母語 (native language) 和第二語言 (second language)，不是兩個等同 (equivalent) 的單語所構成，在本質上和觀念上都不是相等的概念。母語是自然習得的，是無意識感知習得的，第二語言是在既有的語言基礎上學習而得的，是有意識的學習才能獲得的。而且無論是在語言或非語言的範疇中，母語與第二語言之間也會相互影響 (Kroll et al. 2014)，因此，人類爲了因應這樣雙語的複雜處理，發展出一個適應性的系統來處理語言特性的資訊和非語言特性的刺激。

這個複雜的適應系統究竟是什麼樣貌，拜現代先進的非侵入性腦神經造影的科技所賜，使得雙語研究的有關大腦神經如何運作可以被清楚地量測，超越單純的腦區部位的活動，更可以看到各部位之間的連結，因此，可對於人的認知執行功能有了更可靠的理論基礎。本文將回顧相關文獻，從大腦神經迴路因應雙語學習的改變，及改變後的效益等的實證性資料來論述，並預期數位時代雙語學習的新樣貌。

2. 腦中的雙語

2.1 雙語競爭 (competition between L1 and L2)

無論是閱讀，或聽說話的語音，或準備要說的過程中，雙語者內在的兩個語言同時被激發，因此雙語使用者隨時都無意識或有意識地在處理語言選擇的作業 (Dijkstra 2005; Marian & Spivey 2003; Kroll et al. 2006; Kroll et al. 2008)，這種雙語的處理本質上是非選擇性的提取 (non-selective access)，就是所謂的跨語言激發 (cross-language activation)。相關研究者已經採用同源字 (cognates) (例如，‘Piano’ 西班牙文和英文都是鋼琴的意思，字形字意都相同) 和跨語言的同形字 (interlingual homographs) (例如，‘pie’ 英文的意義是派，而西班牙文是腳的意思) 的實驗中發現西班牙和英語的雙語者在閱讀辨識同源字較一般字爲快，而辨識跨語言同形字則較一般字慢 (Dijkstra et al. 1999; Yudes et al. 2010)。而單語者就沒有這個現象。這個研究結果顯示，受試者所接收到的詞彙的資訊 (lexical information)，同時激發了兩個語言，目標語 (target language) 及非目標語 (non-target language)，不只是上述的字形字意在形式 (form) 和觀念的 (conceptual) 的心理表徵上的連結之外，甚至是在非目標語並非外顯處理的情況下 (Thierry & Wu 2007; Wu & Thierry 2010)，語意相似性的促發 (Martin et al. 2009)，和語音 (phonological) 相似性的連結 (Marian & Spivey 2003) 中也看到這樣跨語言激發的效果，

可見跨語言激發的效果，在字形、字意，及字音這三個詞彙的基本構成成分間都可以看到。而這種目標語和非目標語之間的交互作用，不只看到第二語言 (L2) 影響母語 (L1) 的例子，也看到 L1 影響 L2 的例子 (Lagrou et al. 2011, 2013; Schwartz et al. 2007; Portin et al. 2008)。這種雙語同時激發造成認知處理作業時間較長是反映出雙語者進行提取內在心理詞彙 (mental lexicon) 記憶的時間成本及抑制非目標語 (inhibition non-target language) 的認知作業時間成本。

2.1.1 雙語心理詞彙 (bilingual mental lexicon) 模型

詞彙的心理表徵是由概念的心理表徵 (conceptual representations) 和形式的心理表徵 (form representation) 所構成。Annette M. B. de Groot (2013) 從雙語記憶的觀點來探討雙語的心理的詞彙，描述雙語心理詞彙的研究發展歷程的諸多模型的推展 (De Groot 2013)。在半個世紀以前，Weinreich (1968) 描述雙語者的心理詞彙模型係由三種類型階段所組成：同位連結 (coordinative)：概念心理表徵與形式心理表徵間一對一連結；複合連結 (compound)：一個概念心理表徵同時對應兩個形式心理表徵；次級同位連結 (subordinative)：概念心理表徵先轉換為形式心理表徵後再進行一對一的形式心理表徵的連結。Potter (1984) 等研究者則認為 Weinreich 的複合連結就等同於所謂的概念中介模型 (concept mediation model)，而次級同位連結就等同於所謂的字詞連結模型 (word association model) (Potter et al. 1984)。透過這樣的建構歷程，將 L1 和 L2 的心理詞彙整合為一。這當中 L1 和 L2 並不同，L1 的字彙量通常是大於 L2 的。

Potter 等研究者進一步提出一項學習發展的假說，認為隨著 L2 學習的精進，L2 形式心理表徵會直接連結到 L1 及 L2 共享的概念心理表徵，取代了字詞連結的模式，也就是從字詞連結發展到複合連結。不同於 Weinreich 認為是從字詞連結發展到同位連結的階段。Potter 等人找來兩組受試者，一組是 L1 為中文，L2 為英文，且 L2 英文相對是流利的（精熟程度較佳）。一組是 L1 是英文及 L2 是法語，其 L2 精熟程度相對較差。該實驗進行兩個作業，首先是要求受試者將 L1 翻譯成 L2 直接唸出，接著是 L2 的看圖唸名作業。實驗假設：如果受試者是採用字詞連結模式，則直接翻譯的作業反應時間應該比看圖唸名作業的反應時間來得短，而如果受試者是採用概念中介模式，則理論上，應該這兩種作業的反應時間會一樣長。實驗結果顯示，兩組受試者，他們的直接翻譯唸字和看圖唸名作業的反應時間都一樣。可見得，不論 L2 的精熟程度高低，雙語者都採用概念中介模式。也有一些研究者 (Chen & Leung 1989; Kroll & Curley 1988) 他們的受試者 L2 的精熟程度屬於相對更低的，實驗數據推論這些相對初階的 L2 學習者採用的是字詞連結的模式。綜合上述的實驗結果，似乎可以推論：隨著 L2 精熟程度的精進，建構雙語詞彙表徵的過程中，伴隨著在形式心理表徵和概念心理表徵之間連結模式的變遷。同時，這個變遷也與 L2 字詞使用頻率有關聯；愈常使用的字，就比較容易直接連結。這也意謂著，在雙語者的記憶中，存在著不同結構模式；即使在相同的精熟程度的前提下，對於使用頻率較低的 L2 字詞較常採用字詞連結模式，而對於使用頻率

較高的 L2 字詞則顯示採用概念中介的連結模式來處理。Kroll 和她的同事 Stewart (Kroll 1993; Kroll & Stewart 1994)，進一步發現，在唸字翻譯的作業中，通常從 L2 到 L1 較 L1 到 L2 的反應時間來得快 (Kroll 她們推測可能是因為受試者在 L2 學習時，經常採用直接記憶其對應的 L1 翻譯，因此形成較強的詞彙形式的連結)，因此推測，從 L2 到 L1 採用形式心理表徵的直接連結，其連結相對較強，而從 L1 到 L2 則透過共享概念的路徑來連結兩個形式心理表徵是兩個不同的路徑，第一個路徑連結性強，能夠較快速完成，而第二個路徑則須耗費較長的時間來完成連結。因此整合了上述 Weinreich 和 Potter 等人的雙語記憶表徵發展的概念，提出修正的階層模型 (revised hierarchical model, RHM)。後續也有一些研究結果支持這個模式 (Kroll & Stewart 1994; Sholl et al. 1995)，這組研究者進一步再探討相同類型或相異類型的語意是否會影響處理的模式，若是在實驗的刺激材料中操弄語意類別 (semantic categories) 隨機出現時，卻看到 L1 翻譯到 L2 的速度變慢了，但 L2 翻譯到 L1 並不影響。這樣的結果，可能是因為屬於同一語意類別的字詞之間會競爭共享的概念表徵，因此，也可以說明 L1 到 L2 的翻譯確實是循第二個路徑進行，也就是透過概念表徵的連結，來建構雙語的詞彙表徵。

但是，後續也有一些研究者發現不同的結果，有的反應時間相同，也有 L1 到 L2 翻譯的時間較短的情況，不完全符合這個模式所描述的，因此研究者間也提出修訂這個模式的討論 (Brybaert & Duyck 2010; Kroll et al. 2010)。

然而，一組 L1 和 L2 之間存在意義上完全一致對等的情況是幾乎不存在的，大多是共享意義的概念罷了，即使是具象的物件，在不同語言中也都有許多無法一對一的配對翻譯的情況，更何況是在抽象的概念性表達所使用的字詞，同時，同源和非同源的詞所共享的概念表徵也會有所不同。尤其是字意本身並不是單一不變的，也會隨著時間改變且因人而異 (Pavlenko 1999)。基於成對的 L1 與 L2 之間意義的對應不是完全一致且不同字詞類別之間的不等同的程度也會有所差異的前提之下，De Groot (1992, 1993) 和她的同事們 (Van Hell & De Groot 1998) 提出了分散式概念特徵模型 (distributed conceptual feature model, DFM)。這項分散式對應較小概念記憶單位的模型，更能描述語言特定 (language specific) 的本質。透過這個模型可以了解不同類別的字詞 (具象 vs. 抽象，同源 vs. 非同源) 在字詞翻譯 (word translation)、不同語言間的語意激發 (between-language semantic priming) 和雙語字詞連結 (bilingual word association) 的實驗中都看到系統性的差異 (De Groot 1992; Van Hell & De Groot 1998)。特別是研究者在雙語字詞連結的實驗中，分別操弄同一語言的條件 (within-language condition) 和不同語言條件 (between-language condition) 下讓受試者看一連串的字詞，之後要求受試者用同一語言或另一個語言說出一個字詞來囊括這些字串的意思，然後來比較同一個字詞在語言內和語言間的不同條件下的反應時間，研究結果顯示具象字詞和同源字的反應時間在語言內和語言間比較趨於相同，而抽象概念字詞和非同源詞語言內和語言間的反應時間差異較大 (Van Hell & De Groot 1998)。因此推論，具象字詞和同源字的字組較抽象和非同源字的字組在雙語者的記憶中所共同分享的概念記憶單位較多。

近年來，更多研究者對於不同語言間字與字之間的意義對應並非完全一致 (full meaning equivalence) 這個觀點具有共識，基於概念上的不對等 (conceptual non-equivalence) 的假說

也紛紛提出進一步整合的模型。Dong et al. (2005) 提出分享的分散式非對稱模型 (shared distributed asymmetrical model, SAM) 強調字意是分散對應到許多基本的概念記憶單位，一對翻譯字組間有最小的共同分享的個別語言特定 (language-specific) 的概念單位，而且假設形式表徵和概念表徵之間的連結強度，L1 要比 L2 的連結來得強。這個模型嘗試展示，透過 L2 的學習歷程，漸漸地強化 L1 的形式表徵和 L2 的特定概念記憶單位的連結以形成雙語心理詞彙的歷程。

研究者 Pavlenko (2009) 以 Kroll & Stewart (1994) 年的 RHM 模型為基礎，保留 L2 學習中字詞透過概念中介的發展歷程，也納入 DFM 和 SAM 模型的共享和部分共享概念的中心思想，更進一步提出修正的階層模型 (modified hierarchical model, MHM)，有別於先前的模型在於，新增概念儲存的組織 (organization of conceptual store)，概念轉換 (conceptual transfer) 的描述，以及將 L2 的學習視為概念的重新建構調整的歷程 (L2 learning as conceptual restructuring)。

首先，這個模型描述概念表徵是具有情境依存而改變的動態的 (dynamic)，分散式的 (distributed) 和湧現的 (emergent) 的特質，以確實符合同一雙語者在不同情境作業要求下，既有直接轉譯也有依循語言特定概念分享的方式處理的不同歷程 (Jarvis 2003; Stepanova Sachs & Coley 2006)。其次，這個模式所採用的「概念轉換」，不等同於「語意轉換」(semantic transfer) (只是概念的對應，並不涉及概念類別的結構)，是多元類型概念表徵的 (multimodal conceptual representation) 雙向轉換 (L1→L2 & L2→L1) 的概念，有將 L2 對應到 L1 的語言特定概念類別 (L1 linguistic categories) 的 L1 的概念轉換，及將 L1 對應到 L2 的語言特定概念類別的 L2 概念轉換。概念轉換的例子包括，英文的 cup，荷蘭語的 tas 和法文的 tasse 屬於同一概念類別 (Ameel et al. 2005)。而英文的 cup，和俄文的 Chashka (不包括塑膠和紙的容器)，和西班牙文的 taza，及西伯來文的 sefel 則只有部分重疊的概念類別 (Graham & Belnap 1986; Kronenfeld et al. 1985)。不同於單純的語意轉換，例如芬蘭語的 keili 的意思對應英文的 tongue，都是 tongue 和 language 的同義詞，所以，當 L2 為英文的芬蘭人把 'He bit himself in the tongue' 說成 'He bit himself in the language'，這就是語意轉換的錯誤，不涉及概念類別的結構所造成的結果 (Jarvis & Pavlenko 2008)。最後，這個模型最主要在於闡述概念重新建構調整的歷程，透過以下四個過程來完成：(1) 確認兩語言同時存在的概念表徵，(2) 增強 L1 和 L2 概念的轉換，確認部分重疊的概念表徵，(3) 整合出一個特有的概念表徵，(4) 轉移放置到 L2 的概念類別的記憶中。其實，這也就是跨語言連結 (interlingual connection) 的概念。

那麼在了解了雙語者心理內在語言處理的可能樣貌之後，我們需要進一步來探討因為雙語同時激發而產生雙語競爭時，如何處理衝突 (conflict) 的歷程，是抑制非目標語 (inhibit non-target language) 或是選擇目標語 (select target language) 的內在認知控制機制使然呢？

2.1.2 抑制非目標語 (inhibition of non-target language)

在說的作業中可以很明顯的看到雙語者抑制非目標語的情況，研究者採用混合語言唸名作業實驗 (mixed-language naming experiments) 及在語言切換的條件 (Meuter & Allport

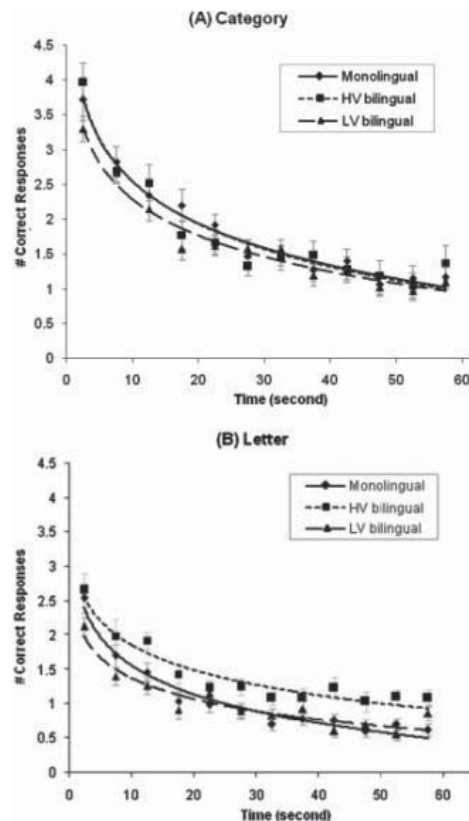
1999) 下來展示。Christoffels et al. (2007) 採用圖片唸名的實驗，有單獨只採用 L1 或 L2 來作業的區塊，也有出現圖片後隨機出現指示，指定採用 L1 或者 L2 來唸名的作業，結果顯示如果指定用 L2 唸名，那麼已經被激發的 L1 會被抑制，時間會較單純由 L2 唸名的作業時間來得慢些，這就抑制非目標語作業的時間成本。

其實，語言處理的機制中就包含了選擇，無論在單語或雙語的語言處理歷程中都會發生，例如單語者需要在語意相近中的字詞做選擇（例如 cup vs. mug），雙語者則需要在概念相近的字詞中選擇（例如 cup vs. tasse）。研究者 Kroll et al. (2006) 指出語言選擇是雙語者口說產出過程 (bilingual speech production) 的一個部分。而且在口說產出的過程中，雙語者比單語者更需要某種程度的注意力和控制的程序 (Green 1998)。Hernandez 等人 (2001) 在早期的 fMRI 的研究已經看到在大腦 Broca 腦區的跨語言激發的證據，而且看到進行語言切換作業時，大腦前額葉背後側 (dorsolateral prefrontal cortex) 有顯著的活化，顯示有較多中央執行監控功能的涉入。是哪種特定的控制程序呢？是抑制或者是選擇呢？有些研究者發現當口說產出目標語言時，非目標語言是被抑制的 (inhibited) (Levy et al. 2007; Philipp & Koch 2009)。也有研究者指出增加偏好反應的激發能夠完成正確的選擇 (Costa et al. 2006)。其實，這是一體兩面；選擇是視目標語言和非目標語言同時被激發的不同程度及其強弱而定，捨棄競爭者，聚焦在選擇的標的上。所以選擇，可以說是由偏好目標的增強，或抑制競爭者而產生，或者是抑制反應或干擾 (Luk et al. 2010)，也可能是同時增強目標與抑制競爭者而產生。Abutalebi (2008) 指出基於 L2 是建構在 L1 既有的神經迴路上，需要額外的非語言的認知控制作業參與，在雙語競爭時控制一個相對較弱的 L2 的運作；亦即有一個額外的神經迴路在中介 (mediate) 語言處理的神經迴路，而且是動態變化的。隨著 L2 達到如同母語的精熟程度，則趨於自動化作業，這項在神經迴路上的差異就消失了。因此，無論是抑制或選擇，重點都在於雙語者必須比單語者具有更強的內在認知控制機制 (mechanism) 來進行這項語言處理的歷程。要探討這個問題，透過一系列研究者針對比較雙語者和單語者的不同作業反應時間的比較，可以一窺堂奧。

2.1.3 認知控制增強 (increasing ability of cognitive control)

研究者透過許多不同的實驗典範來抽絲剝繭，以瞭解究竟雙語者在哪些方面的認知控制能力與其語言處理的能力有關聯。首先，透過看圖唸名的作業，雙語者的平均反應時間較單語者長，正確率較低。這反應出雙語者進行詞彙提取 (Lexicon retrieval) 時需要耗費心力，使用較多的認知控制資源投入作業的進行，反應出雙語競爭的衝突，需要執行監控系統參與作業。其次，透過語意類別流暢度 (category fluency) 和字母發聲流暢度 (letter fluency) 這兩種口語流暢度 (verbal fluency) 的作業，可以了解雙語者的字彙量 (vocabulary size) 較小，且較單語者需要額外廣泛的監控 (monitoring) 和工作記憶 (working memory) 來完成作業。研究者推論，雙語者在字彙量有限的情況下，對於雙語同時激發的競爭衝突，需要耗費更大的能量去處理，就反應在較慢的作業反應時間上 (Sandoval et al. 2010)。研究者進一步透過限時 60 秒

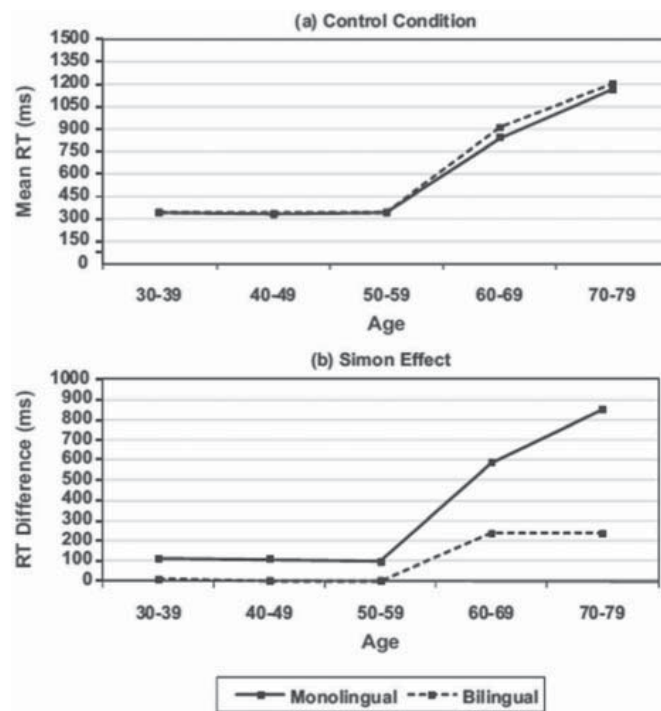
的語意類別流暢度的作業，確認雙語者無論流暢度高低能力者，字彙量都較單語者小。同時，進行限時 60 秒的字母發聲流暢度的作業，研究者發現高流暢度的雙語者的反應正確率雖然與單語者和低流暢度的雙語者一樣都是隨著時間經過正確率遞減，但是，高流暢度的雙語者的正確率一直都是高於其他二者，由於我們知道雙語者的字彙量相對較小，於是這個作業更需要較高的執行監控能力來完成，因此推論，高流暢度的雙語者具備了較高的執行監控能力（如〈圖 1〉所示）(Luo et al. 2010)。



〈圖 1〉比較單語者和高流暢度雙語者和低流暢度的雙語者在限時 60 秒的語意類型流暢度測驗的表現。(a) 表示隨著時間經過的類型正確率，(b) 表示隨著時間經過答對的字彙量 (Luo et al. 2010)。

研究者透過賽門效應 (Simon effect) 和史楚普效應 (Stroop effect) 這種內在自動化機制的操弄，來觀察認知控制機制的作用。Bialystok et al. (2004) 採用賽門作業，從實驗證據看到，30–79 歲的成年雙語者和單語者在一致 (congruent) 和不一致 (incongruent) 的情境下的平均反應時間是幾乎相等的，也具有相同的改變趨勢，其中 50–59 歲及其以上年齡的受試者群，則呈現較長的平均反應時間，年齡越大的群組，平均反應時間越長（如〈圖 2a〉所示）。可見得，認知控制能力會隨著老化而快速遞減。那麼在平均反應時間相近和隨著老化而認知控制能力遞減的前提之下，研究者檢視在一致和不一致條件下的作業反應時間的差異，當這個差異越小就是所謂的賽門效應越小，代表着認知控制機制中的抑制能力較佳。實驗結果顯示，所有不同年齡群組的受試者，雙語者的賽門效應都小於單語者，30–59 歲以前的雙語者和單語者的賽門效應相近（雙語者小於單語者）且保持穩定，自 50–59 及其以上年齡群的受

試者的賽門效應值隨著老化認知控制能力的快速遞減而擴大，但是，雙語者的賽門效應擴大的程度遠低於單語者，60–69 歲之後就維持在一定的水準，不像單語者在 60–69 歲之後還隨著認知控制能力的持續遞減的情況下持續擴大。因此，研究者推論，這個結果反應出，雙語者發展出較強的認知控制能力，因此，在一般成年人的階段較單語者有較佳的認知控制表現，而隨著老化，也表現出認知保留 (cognitive reserve) 的效果，可以看到雙語者比單語者擁有更佳的認知控制能力，隨著年齡衰減的速率較低且能夠維持在一個較同年齡單語者較高的水準，而且這個水準接近單語青壯年的水準（如〈圖 2b〉所示）。

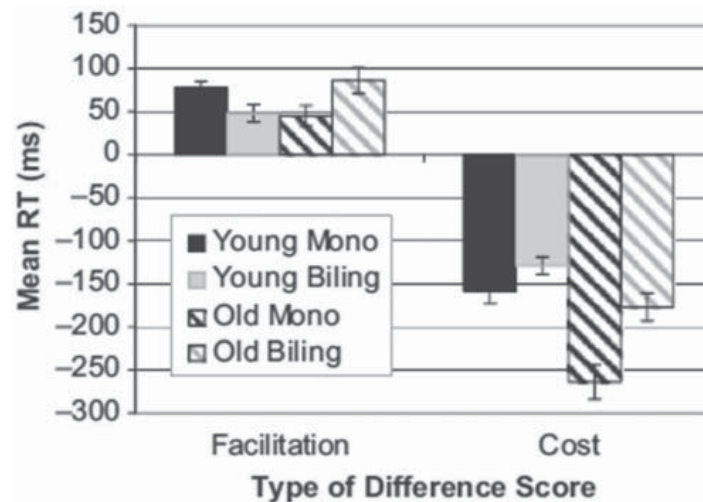


〈圖 2〉雙語者和單語者進行賽門作業的反應時間均值對應於年齡分組的數值變化圖（自 30 歲以上每 10 歲為一組的分組資料）(Bialystok et al. 2004)。

但是後續的實驗發現，當實驗刺激材料不是採用一致和不一致條件的混合出現的呈現的測試，亦即分段進行全部一致及全部不一致條件的測試，那麼這個雙語者的優勢就消失了 (Bialystok et al. 2006)。還有，延長練習之後，雙語者和單語者的反應則無太大差異，可見，任何人在一定的情境下，經過足夠的練習，都可以抑制干擾的訊息，只是雙語者能夠較快發展出這種抑制能力。

既然這種觀察到的雙語者在抑制控制的優勢會因為實驗的操弄而不穩定，那麼，研究者嘗試採用素有抑制控制測驗的黃金標準的名號的史楚普作業來檢視，當顏色一字的史楚普效應較小時，表示有較強的控制能力能夠抑制唸字的干擾訊息，而正確唸出顏色。Bialystok et al. (2008) 採用史楚普作業，在顏色與字一致的條件下（例如紅色的 red），其平均反應時間相對於基準值（單純圖形唸色作業的時間）為正，反應時間較快，具有促進的效果 (facilitation effect)。而在顏色與字不一致條件下（例如紅色的 blue）有干擾的資訊產

生，要唸出顏色時，需要抑制字意 blue 干擾紅色的唸色作業（標準的史楚普效應），其平均反應時間較慢，且相對於基準值為負，視為進行這項作業的時間成本 (cost)。實驗結果顯示，雙語者無論年輕或年長者的史楚普效應較小，而且年長的雙語者的促進效果最大（如〈圖 3〉所示），因此，可以據以推論雙語者有較佳的抑制控制能力。後續，Hernández et al. (2010) 的實驗也看到雙語的受試者具有較小的干擾成本及較大的促進效果，他們主張雙語的優勢是高階的認知控制能力，包括由上而下的工作記憶的處理，顯示於增進注意力保持和執行監控等能力 (Hernández et al. 2013)。Garbin 等人 (2010) 也同樣看到雙語者在進行語言處理時具有較小的切換成本 (switching cost) (Garbin et al. 2010)。



〈圖 3〉年輕單語者和雙語者及年老單語者和雙語者顏色-字的史楚普作業的促進效果和成本效果的平均反應時間和標準誤 (Bialystok et al. 2008)

也有研究者採用經常用來檢測記憶中的認知處理能力的兩項測驗；歷程分離程序 (process dissociation procedure, PDP) 測驗和正向干擾的免除 (release from proactive inhibition, PI) 測驗來檢測，這兩項作業中雙語者的反應都比單語者較佳 (Wodniecka et al. 2010; Bialystok & Feng 2009)。另外 Costa 等人 (2008) 採用 旁側抑制作業 (Flanker task) 進行注意力網絡測試 (Attention Network Task, ANT)，結果顯示雙語者在警覺性 (alerting)，導向性 (orienting) 和執行控制 (executive control) 的測試中都比單語者的反應來得快，在不一致的條件下產生比較小衝突抑制的成本及有較小的作業切換成本（在一致與不一致條件之下進行作業切換），表示有較佳的衝突解決能力，亦即較佳的選擇性注意力 (selective attention) 和執行控制能力。Luk 等人 (2010) 採用旁側抑制作業，看到在不一致的作業中，雙語者有較小的切換成本，而且是屬於干擾抑制的作業，而非衝動反應抑制的作業，亦即屬於注意力層次，而非衝動反應的動作控制層次。同時，也據以推論因為雙語的經驗改變了對於一般非語言認知控制反應的大腦神經迴路。

透過上述這些在視覺上的衝突解決作業（賽門作業、史楚普作業和注意力網絡作業）及其他一些認知作業展示了雙語者的特性，Bialystok 等人 (2009) 推論：雙語者在運用雙語中，

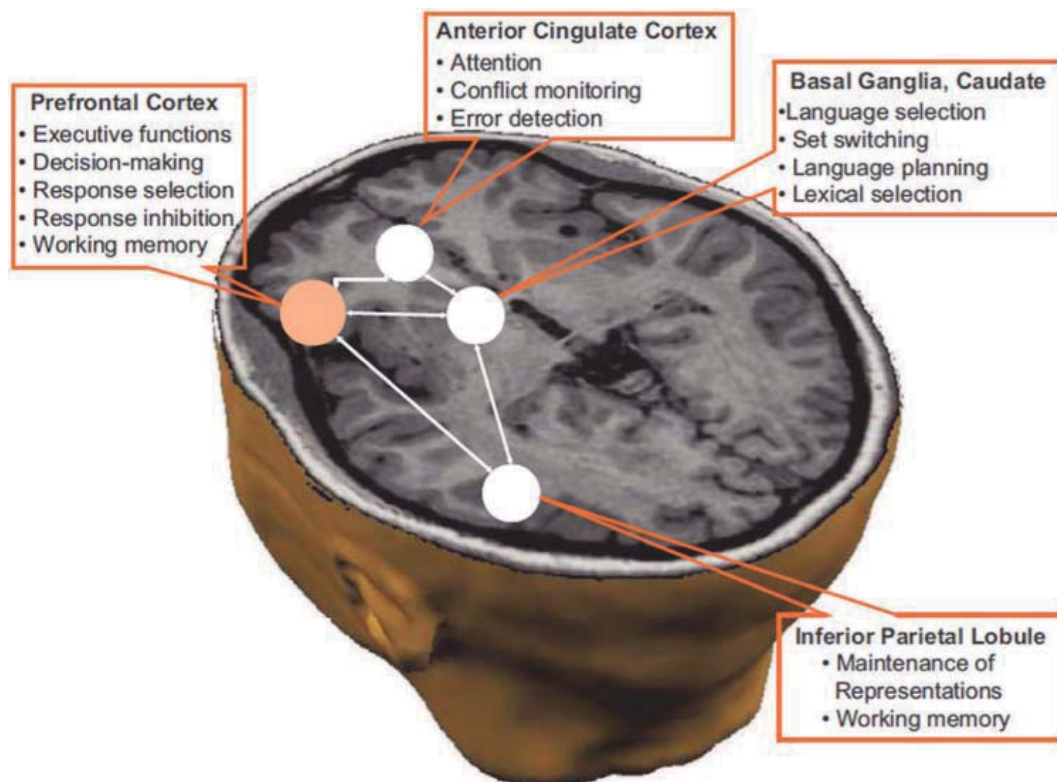
透過語言系統和認知系統之間的互動，發展出較強的認知監控能力，提出了雙語者的認知控制網絡和雙語的語言系統的互動關係模型；其中認知控制網絡中包含三項模組：執行處理，監控處理，及競爭作業基模。且這三項模組間互動共同形成認知控制網絡，再與雙語的語言系統互動 (Bialystok et al. 2009)。Moreno et al. (2010) 以事件相關電位 (event-related potentials, ERPs) 以反應句子語法衝突的 P600 來進行比較年輕成年人雙語者和單語者對於句子語法處理的反應，在簡單的作業中雙語者和單語者的反應曲線近似，而在較困難的句法衝突作業中，從 P600 的曲線類型上，發現雙語者比單語者更能有效處理語法衝突的情況，研究者推論，關鍵在於雙語者能夠將注意力控制在相關的資訊上，且能夠有效忽視干擾的資訊的這項認知控制能力上，而雙語者具有較佳的能力來處理。透過這個實驗讓我們看到語言系統和認知控制網絡互動的結果。

同時，從腦造影的資料中，也印證了這個推論，Hernandez & Meschyan (2006) 採用功能性腦造影技術 (fMRI) 研究自青少年開始學習英語的西班牙-英語的雙語者他們在執行看圖唸名作業時大腦的活動情況，實驗結果顯示，當採用較弱的 L2 唸名時，在大腦執行監控的神經迴路 (executive control network) 有較大的活化，且相較於單語者採用母語執行作業時所涵蓋的執行監控的神經迴路的形態，有所不同。另外，研究者 Grogan et al. (2009) 以核磁共振掃描在兩項口語作業都屬高流暢度的雙語者，左右腦的前輔助運動區 (presupplementary motor area) 和左腦的尾狀核 (caudate) 的灰質密度和字母發音流暢度的表現有關，而左腦的顛下迴 (inferior temporal cortex) 則和語意類型流暢度的表現相關。

Diamond (2006) 以及 Miyake 等人 (2000) 都指出雙語者的優勢主要有三項核心能力：(1) 是能夠抗拒習慣性的反應和不相關的刺激訊息的抑制控制 (inhibitory control)，(2) 能夠在腦中保存資訊而且能夠透過心智運作的工作記憶 (working memory) 的能力，或者稱為資訊更新 (updating) 能力，(3) 能夠適應需求或優先順序的改變及在目標之間的作業切換的這種認知的彈性 (cognitive flexibility)。而且這些能力的發展，與大腦前額葉的成熟發展是同時的，從兒童經過青少年至成年時期，大腦前額葉逐漸發展成熟，而上述認知控制能力的發展也受到大腦組織成熟程度的影響，逐漸穩定。Kroll & Bialystok (2013) 也指出，由於雙語者在進行語言理解作業和產出作業時，必須經常性地忽視不相關訊息，進行作業切換 (task switching) 和解決衝突的作業，因此，在這些認知監控能力的表現上較單語者較佳。雙語者在認知執行控制上具有一些優勢，包括注意力控制，抑制和作業轉換 (shifting) 等等，而且這些執行控制的優勢，也會延緩老化的認知衰退的發生年齡，也就是具有認知保留 (cognitive reserve) 的貢獻 (Bialystok et al. 2009; Bialystok & Poarch 2014)。

在認知控制網絡的架構下，大腦處理第二語言的歷程，是認知控制系統及其子系統和語言系統的迴圈循環互動 (control loop) 所進行的，在這個過程中，涉及了不同功能的腦區，以共同完成持續監督執行作業中的注意力，抑制控制及切換等作業的進行。Abutalebi & Green (2007) 提出大腦主要負責認知控制的網絡所涵蓋的腦區包括有前額葉 (prefrontal cortex)，前扣帶迴 (anterior cingulate cortex)，基底核 (basal ganglia) 和尾狀核 (caudate)，及頂下葉 (inferior parietal lobule)。其在大腦中的位置和推論的功能如〈圖 4〉所示。Garbin 等人 (2010) 也同樣

看到雙語者在進行語言處理時具有較小的切換成本所對應在腦神經迴路活化上的差異；雙語者比單語者在進行非語言作業時，左腦的額下迴 IFG 和左腦的基底核的殼核 (putamen) 有較大的活化，相較於單語者是右腦的額下迴。研究者據以推論認知執行監控的神經迴路因為長期雙語作業的需要，而產生與原有語言處理的神經迴路趨於重疊 (Garbin et al. 2010)。



〈圖 4〉大腦主要負責認知控制的網絡和這些腦區一般推定的功能 (Abutalebi & Green 2007)

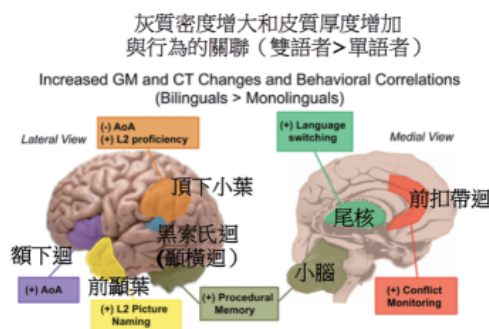
2.2 雙語發展是大腦神經迴路的重組 (bilingualism as reorganization of brain network)

近年來，許多研究指出：大腦具有非凡能力能夠因為環境刺激，認知需求或者行為的經驗而產生功能上或生理上的改變，或者重新設定大腦結構 (Li et al. 2014)。這就是所謂的神經可塑性 (neuroplasticity) 已經在許多研究領域中廣泛的被檢驗。尤其是個人學習第二語言的經驗如何反映神經可塑性的議題，最近 Li 和他的同事回顧與經驗依存 (experience-dependent) 而產生的神經解剖上的 (anatomical) 和功能性神經連結 (functional connectivity) 類型的改變的相關證據，看到在兒童，成年人和老年人的大腦中因為他們第二語言經驗引發的大腦神經結構的改變，包括灰質密度和白質的完整度增加。這項改變能夠很快的在短期的語言學習或訓練後看到，同時，與個別語言的特性，學習者的年齡，第二語言習得的年齡，語言流暢度和水準，及個體差異都有相關 (Li et al. 2014)。

2.2.1 跨越年齡層的結構上和功能上的改變 (structural and functional changes across life span)

瞭解大腦如何支持和表徵雙語或多語，這個一腦多文 (one brain for all languages) 內在機制的探索，會有助於我們了解其運作的歷程，而且透過這個機制的運作，研究者可以進一步預測相關語言和閱讀能力的發展 (Myers et al. 2014) 及變化。自 1990 年代中期開始，有許多神經認知的研究，使用神經造影的方法，例如功能性磁振造影 (fMRI)，正子造影 (PET) 和腦電波 (EEG)／事件相關電位 (ERP)，讓研究者有機會揭示學習第二語言時大腦的特定功能類型。而且，對於關鍵期假說的預測也進行相關的驗證，從行為和腦造影的相關證據顯示，第二語言學習即使是較晚發生在成年時期，也可能導致學習成效和大腦神經結構和功能性連結的改變，幾乎類似於母語或第一語言的改變類型。這些伴隨著行為發生神經連結類型的改變，包括灰質 (gray matter, GM) 密度的增加，大腦皮質厚度 (cortical thickness, CT) 增加，或增進白質 (white matter, WM) 完整性。Li 等人 (2014) 整理近十年來研究文獻，從認知神經機制的角度去檢視第二語言學習所導致大腦神經解剖上的變化，以確認因為雙語經驗產生大腦結構改變的內在機制，也比較語言和非語言訓練在神經結構上的效果，來釐清大腦語言神經迴路和認知控制迴路間的重疊和互動，同時，也關注到神經結構和行為上的個體差異問題，進一步呈現從結構到功能到行為 (structure-function-behavior) 這三個層次的連結所呈現的整體概念 (Li et al. 2014)。Li 等人從相關文獻的實驗證據中，比較了具有雙語經驗的雙語者與和無雙語經驗的單語者，他們的灰質密度和皮質厚度，在這個基本的神經結構上，看到雙語者較單語者在大腦的前扣帶迴 (anterior cingulate cortex)，前顳葉 (anterior temporal lobe)，尾核 (Caudate Nucleus)，小腦 (Cerebellum)，黑索氏迴 (Heschl's Gyrus)，額下迴 (inferior frontal gyrus) 和頂下小葉 (inferior parietal lobule) 這些腦區的灰質密度或皮質厚度較大，並將雙語經驗的變數與這些結構改變之間的關聯做了整理。例如，雙語經驗的眾多變數中的語言習得年齡 (age of acquisition) 和頂下小葉 (inferior parietal lobule, IPL) 的體積具有負向關聯，但是和額下迴 (inferior frontal Gyrus, FG) 的體積具有正相關聯，也就是說，研究者觀察到越早學習第二語言的雙語者他們的頂下小葉體積較單語者的大，而額下迴的體積則較小。同時，雙語者的第二語言的精熟程度與頂下小葉的體積的增大具有正向關聯，換句話說，雙語者不僅比單語者的大，且隨著雙語經驗的增加，L2 的精熟程度愈高者，頂下小葉的體積也愈大。從以往的研究文獻，我們知道左腦頂下小葉 (LIPL)，包括鄰近區域緣上迴 (SMG) 和角迴 (AG)，參與語音工作記憶，語音儲存，語意整合，以進行一般的字彙學習作業。雙語者的左腦頂下小葉 (inferior parietal lobule, IPL) 的灰質密度大於單語者，而且，其效果量早期雙語者大於晚期雙語者。頂下小葉已經在先前許多功能造影的研究中被認定為是處理語音的工作記憶，詞彙學習和語意整合的重要區域。這個區域大腦皮質的增生是特別與雙語習得和處理大量第二語言有關聯的。Lee 等人 (2007) 發現單語者的字彙量和大腦左右腦的 IPL 和後 SMG 的灰質體積呈現顯著正相關的關聯，Xiang 等人 (2012) 的研究發現快速學習字彙的成績和連結額下迴 (Brodmann's Area or BA47) 和頂葉 (parietal lobe) 有顯著的相關。Mechelli

等人 (2004) 也指出灰質密度的擴增與第二語言學習者的流暢性有正向關聯（越流利，灰質密度越大），和第二語言習得的年齡 (AoA) 有負向關聯（越早學，灰質密度越大）。角迴可能特別參與在事件表徵 (event representation) 和情節記憶的 (episodic memory) 的提取 (retrieval) 作業中。左腦額下迴是大腦處理語言的核心區域，包括詞彙提取 (Lexical retrieval)，口說發聲準備 (articulatory planning)，和形態句法的交互處理 (morpho-syntactic processing) 等，所以一般認為在左腦額下迴內的部分區域可能在雙語產出時負責各種不同的處理作業。因此，當隨著年齡的成長，前額葉發育趨於成熟後，可以觀察到，越晚才習得第二語言的雙語者，他們在進行主要的語言處理的核心作業時，都需仰賴這個腦區的運作，在結構上也看到比較大的密度。研究文獻也有就 L1 和 L2 的看圖唸名作業作比較，雙語者的左腦的前顳葉 (anterior temporal lobe, ATL) 體積比單語者的大，且 L2 看圖唸名的作業的成績表現和體積大小成正向關聯。左腦前顳葉，和頂下迴 (ITG) 和頂中迴 (MTG) 一起，共同掌管許多關於詞義表徵和處理等方面的作業，因此與看圖唸名的作業表現相關。語言的處理同時也牽涉到記憶的作業上，雙語者受到雙語經驗的影響，對於程序性的記憶 (procedural memory) 有較強的能力，小腦 (cerebellum, CB) 的皮質厚度則和程序性的記憶成正向關聯。小腦雖然不是傳統的語言區域，最近已經被發現是程序性記憶系統的一部分，參與語義處理和文法處理的作業。另外，與執行監控相關的作業，則看到衝突監控 (conflict monitoring) 的作業表現與前扣帶迴 (anterior cingulate cortex) 的體積成正向關聯，而語言切換 (language switching) 的作業表現則與尾核 (caudate nucleus) 的體積呈正向關聯，同時，雙語者的前扣帶迴和尾核都較單語者的體積大，呼應了雙語者的執行監控能力因為受到雙語經驗的影響，較單語者強，驗證了雙語認知優勢假說 (cognitive advantage hypothesis)。尾核是基底核BG (Basal Ganglia) 的一部分，尾核在序列性學習 (sequence learning)，程序性記憶 (procedural memory)，語音學習和偵測語音異常的作業上扮演重要角色，我們從神經結構上雙語者和單語者的差異看到了證據。Li 等人描繪上述與雙語經驗有關聯的大腦的幾個關鍵的大腦皮質重點區 (region of interest, ROI) 的情況如〈圖 5〉所示。值得注意的是，這些差異不單單只是呈現單一或個別大腦皮質的體積的改變與功能性的連結而已，實際上是大腦神經迴路的整體運作，只是受限於 ROI 資料擷取比較的分析方法，呈現相對的差異（雙語者大於單語者），而非只有這些腦區在進行特定對應的認知作業。



〈圖 5〉比較雙語者和單語者之間大腦的皮質重點區 (region of interest, ROI) 的增大和改變的差異與雙語經驗的關聯，(+) 表示正相關，(-) 表示負相關（修訂自 Li et al. 2014）

2.2.1.1 語言習得年齡 (age of acquisition, AoA)

所謂習得年齡是泛指一個觀念或技能習得的年齡。我們知道大腦是自孩童期到成年期逐步發展成熟的，感知運動區 (sensorimotor) 是比較早發展成熟的，而前額葉 (prefrontal lobe) 是最晚發展成熟的。而這也可以從語言習得年齡的早晚，看到相對應在大腦結構上的差異。研究者 Hernandez & Li (2007) 同時在單語者在詞彙處理作業和雙語者開始習得第二語言的年齡大小上看到習得年齡的效果。在單語者的詞彙處理作業上，無論是唸字作業，聽覺和視覺的詞彙判定作業，看圖唸名等作業，較早學的字念出來的反應時間都比較快，對應作業的腦區也有所差異。例如 Fiebach et al. (2003)，以單語者為實驗對象，採用視覺和聽覺的字詞的詞彙判定作業，發現無論是聽覺或視覺的測驗，若是於兒童時期習得的字詞，則在黑索氏迴有較大的活化，而若是於較晚期習得的字詞，則對應連結額下葉下部擴展到側眼窩額葉皮質 (lateral orbito-frontal cortex)。據此推論，早期習得的字詞涉及聽覺處理神經迴路的活化，而晚期習得的字詞則較倚賴詞彙意義處理的神經迴路來處理，這樣的結果顯示，因應大腦感知運動神經區域較早成熟，所以，早期習得的字詞有較多語音處理的連結，隨著年齡的增長，前額葉日趨成熟，因此較晚習得的字詞，則較多倚賴額下迴關於語意表徵處理的機制。在雙語方面，雙語的習得年齡是指，學習者開始學習 L2 的年齡，所以，通常稱在兒童時期習得 L2 的雙語者為早期雙語者 (early bilingual)，而於成年期才習得 L2 者則稱為晚期雙語者 (late bilingual)。這和在單語者的研究中是視該字詞被習得的年齡來定義早 (early learned words) 和晚 (late learned words) 是不同的定義。所以，所謂的雙語的習得年齡的效應是比較早期雙語者和晚期雙語者在不同語言處理作業行為上及大腦結構及功能上的差異。除了 L2 習得年齡的因素之外，研究者同時發現 L2 的精熟程度對於語言處理也具關鍵性的角色 (Meschyan & Hernandez 2002)。基於雙語經驗依存或中介所造成的改變，Zhao & Li (2006) 採用雙語詞彙發展的自我組織的連結模式，來模擬呈現早期雙語者和晚期雙語者的不同詞彙組織的樣貌，研究者發現早期雙語者所建構的第二語言詞彙區域較晚期雙語者的要來得大且集中，晚期雙語者則較分散，具有不同的形態。

以第二語言習得的年齡來區分早期雙語者和晚期雙語者，而一出生就處於雙語的環境，同時接觸與學習雙語，雙語都具備高度精熟程度且相當者，則稱為同時雙語者 (simultaneous bilinguals) 或者平衡雙語者 (balance bilinguals)。那麼，究竟同時雙語者所習得的雙語哪個是第一語言哪個是第二語言呢？或者兩個都是母語？研究者嘗試從心理詞彙表徵上來分析，採用同源與不同源字的預見促發詞彙判定作業 (masked priming lexical decision task) 來看兩個語言之間的翻譯促發效應，研究數據顯示在同源字和不同源字的操弄下都有顯著的預見翻譯的促發效應，而同源字的翻譯效應大於非同源字的效應。同時雙向翻譯促發效應的反應量大小相近，可見得相當流利精熟的同時雙語者確實在雙語的心理詞彙表徵上發展出相當平衡的連結 (Duñabeitia et al. 2010a; Duñabeitia et al. 2010b)，雙語雙向的語言切換的成本也相近 (Duñabeitia et al. 2010b)。Chee 等人以同時接受過 12 年以上正規中文教育且學齡前 (5 歲以前) 兒童同時習得英語和華文雙語的平衡雙語者 (平均習得年齡為 3.13, SE = 2，兩個語言的

流利精熟程度相當) 和非平衡雙語者 (平均習得年齡為 4.07, SE = 1.71, 兩個語言的流利精熟程度不相當) 作為研究對象的研究中看到, 在進行聲韻工作記憶 (phonological working memory, PWM) 的作業時, 雖然在行為上, 平衡雙語者與非平衡雙語者的表現相當, 但是平衡雙語者的左腦的島腦 (insula) 有較大的反應, 而非平衡雙語者則在額中迴前部 (anterior medial frontal region) 看到較小的反應, 而前扣帶迴 (anterior cingulate) 有較大的反應, 可見兩個語言的精熟程度不相當, 即使在一般非詞彙智商測驗和工作記憶測驗程度及其第二語言習得年齡相當的前提下, 在聲韻工作記憶的作業中也表現相當, 但是大腦皮質的反應卻還是與平衡雙語者有不同的活化類型 (Chee et al. 2004)。這似乎又符合一些研究者所觀察到的雙語同步激發時, 在一開始的語音處理分享共同的腦區顳上迴 STG 及但是在後續的詞彙語意的處理則在左腦額上迴的腦區, 雙語的處理就分別有不同的集中點, 就反映出雙語處理時先共同後分離的結構系統 (Marian et al. 2003)。此外, Perani 等人 (2003) 的研究比較同樣都是在 3 歲以前習得第二語言的雙語者, 一群出生是 Catalonia 人, 生長環境中接觸使用西班牙文, 相較於另外一群出生是西班牙人, 生長環境中接觸主要使用 Catalan。由於 Catalonia 人接觸使用西班牙文較不充分, 所以即使西班牙文是早期習得且具高精熟程度, 在西班牙語口說作業中, 還是有較大的 Catalan 語的活化且反映的區域較分散, 可見即使第二語言習得的年齡相當及行為表現上看似程度相當, 第二語言的接觸使用的經驗還是會影響雙語者的大腦的反應 (Perani et al. 2003)。總而言之, 一出生就接觸學習雙語者, 還必須是在日常生活中充分接觸及使用這兩種語言, 雙語同時達到高度精熟程度, 轉換之間毫不費力, 這樣的同時雙語者畢竟是雙語理論中的特例而且很難精準界定, 除了一出生就接觸習得雙語, 和在日常中經常使用的經驗之外, 兩個語言特徵差異的大小是否影響同步平衡發展的建構, 仍有待相關研究進一步探討, 本文重點放在從母語習得至第二語言習得的心理詞彙表徵的建立的描述及大腦因應第二語言習得的改變歷程及類型的探討, 關於同時雙語者的議題本文就暫時不做深入的探究。

2.2.1.2 關鍵期 (critical period) 亦或敏感時期 (sensitivity phase)

基於感知運動的神經網絡較早發展成熟的假說, 早期經典的研究是由 Hubel 和 Wiesel (1963) 從神經科學的角度開始關注到早期剝奪或者間隔感官的刺激是否會造成各方面感知功能的損壞, 同時也從細胞對於視覺刺激的反應提供了視覺皮質發展的證據。他們發現了視覺發展的關鍵期 (critical period), 剝奪小貓兩眼的視覺刺激, 會導致其長期視覺缺失 (Hubel & Wiesel 1963; Wiesel & Hubel 1963a, 1963b), 但是如果只剝奪小貓一眼的視覺刺激, 則不會損壞成貓的視覺。因此, 他們提出生命早期的視覺刺激對於視覺皮質的發展有很大的影響, 顯示, 外在環境刺激對於正在發展的大腦皮質的關鍵期是必要的, 沒有相對應的環境刺激, 腦神經細胞無法適當地活化, 在用進廢退的前提下, 神經連結就逐漸減少而遲緩發展, 長期導致正常功能無法運作。貓頭鷹的實驗也揭露了聽覺對應視覺刺激的校正也有關鍵期效應 (Brainard & Knudsen 1998)。後續在鳥學習唱歌的實驗中也看到在接受知覺刺激階段, 感知運

動的練習鳥語階段，和具體化產出鳥語的三個階段都具有關鍵期效應 (Brainard & Doupe 2002)，研究結果顯示，在接受知覺刺激的階段，沒有暴露在它相同族群的成年鳥的鳥語刺激之下，幼鳥無法形成一個正確的模式來進行後續的練習，其次，在練習階段沒有足夠的聽覺的回饋刺激能夠幫助確認產出的鳥語是否精準，最後，若是到了具體化產出的階段才給予鳥語的刺激，則很難學會其他的鳥語。由於上述的動物實驗是觀察在相關腦神經發展的關鍵期人為地給予刺激剝奪的實驗以了解對應造成的缺損功能，讓研究者關注到關鍵期假說 (critical period hypothesis)。Lenneberg 於 1967 年從語言的生物基礎率先提出的語言學習的關鍵期假說，但是，多年來有許多研究發現因為大腦具有可塑性，並非過了特定生物發展的關鍵期就無法改變，因此，絕對的關鍵期並不成立，所以則以敏感時期 (sensitive phase) 的概念較普遍被接受 (Knudsen 2004)。而早期無法在人體上進行這類的實驗，部分只能夠透過因為腦傷或人為悲劇的個案來觀察。從語言發展的觀點來看，最有名的例子是 Genie 的例子，研究者觀察到即使早期在語言刺激的剝奪環境下生長，後來 Genie 還是能夠學習口說及認字，發展的模式也接近正常孩童發展的進程，只是在文法的學習上存在比較大的障礙，這個例子說明人類學習語言並不是過了關鍵期就無法學會，而是，在建構發展語言處理的歷程上，因應不同語言心理詞彙表徵的建構，語意概念的建構，語法邏輯的建構等歷程，有不同相對應的神經網絡連結的敏感時期（從感知運動皮質擴展到前額葉的發展曲線），較能夠有效的因應環境及語言的刺激，適時地發展建構，進行有效連結，以達最大效能。

Johnson 和 Newport 將 Lenneberg 的關鍵期概念應用第二語言學習上，於 1989 年提出在第二語言習得關鍵期假說，他們研究的受試者為韓文-英文雙語者，年齡層從 3 到 39 歲，進行句子文法錯誤判定的作業，實驗結果發現，判定正確率在 7 歲之後習得第二語言的群組和 7 歲以前習得的群組間有很顯著的落差，習得年齡在 7 歲以上的群組，在句子文法錯誤判定的正確率就顯著地變差 (Johnson & Newport 1989)。而且，第二語言習得年齡在 3 歲到 7 歲的群組的表現，則接近單語者的水準。研究者就將這個 7 歲以前習得第二語言能夠有接近單語者的水準，而 7 歲以後才習得就有顯著差異的現象歸納為，7 歲以前為第二語言學習的關鍵期，主張過了關鍵期才學習的晚期雙語者，錯過了相對應的生理發展的關鍵期，他們的學習成效就變差了，似乎，主張第二語言學習的年齡主宰一切學習的成效。但是，後續也有研究者採用相同方法研究西班牙文的雙語者，卻得到相反的效果，反而是晚期雙語者在句子文法錯誤判定作業上的表現比早期雙語者的表現佳 (Birdsong & Molis 2001)。或許第二語言習得年齡的效果，除了視作業類型而定之外，也受到母語及第二語言個別語言特性的影響（雙語間句法規則的差異性等）的影響，恐怕第二語言習得年齡的效果是會隨著這些變數而改變。另外，也有學者將群組以 20 歲作分組點，那麼這個 7 歲關鍵期的結果就消失了 (Bialystok & Hakuta 1994)。可見得，第二語言關鍵期假說並不普遍獲得驗證。

DeKeyser (2000)、DeKeyser et al. (2010) 認為從文法處理的內在機制上來看，所謂關鍵期假說，嚴格上係適用於抽象概念結構的內隱學習，過了所謂關鍵期的才開始學習第二語言的學習者，即使具備與單語者相當的精熟程度，因為某種程度來說，他們已經錯失了建構文法處理所需的內隱機制的時機（沒有在關鍵期內建構完成），所以必須依賴替代的外顯的

機制來學習。這樣的現象，在日常生活中隨處可見。我們可以看到母語者對於文法結構毫不費力似乎就自然而然地習慣性使用，而雙語者，尤其是晚期雙語者就必須透過學習及記憶文法規則，才能確保句法正確無誤。然而，仍然有許多文獻觀察到第二語言習得年齡和第二語言最終的精熟程度呈現負向的關聯 (Singleton & Ryan 2004)，至少在句法 (Syntax) 和聲韻處理 (Phonology) 上有這樣的關聯存在，雖然不足以完全驗證關鍵期假說，但足以支持敏感時期的概念。

關於句法的處理作業，從相關的行為研究和腦造影的文獻中，比較早期雙語者和晚期雙語者，不只在行為上，甚至在大腦活化的反應上，我們都可以觀察到第二語言習得和精熟程度的效應。Weber-Fox 和 Neville (1996) 指出句法的處理機制的發展 (1–3 歲) 較語意處理的發展 (11 歲以前) 更受到習得年齡的影響。他們採用 ERP 的實驗，發現在違背句法的作業中早期雙語者和單語者在反應時間和曲線類型上出現差異，而在違背語意的作業中，只有在相對晚期雙語者的反應上看到差異。可見得，第二語言習得的年齡反應在句法錯誤的判斷認知作業上連結的神經活動上扮演重要的角色，相對而言，L2 的精熟程度則與語意衝突反應連結的神經活動相關。這樣的結果符合大腦感知運動的神經網絡較早發展成熟的假說，所以句法 (特別是句法形態) 相較於語意的處理作業，語言習得年齡的敏感度較大。許多研究者認為，句法的習得通常是基於覺知內隱的 (程序性) 記憶所建構的知識系統，而詞彙語意的習得通常是透過外顯 (描述性) 記憶建構的知識系統 (Paradis 1994; Pinker 1994; Ullman 2001; Lebrun 2002)。

Wartenburger 等人於2003 年以上述觀點為前提來提出假設：這項內在處理機制受到語言習得的年齡 (AoA) 和精熟程度 (PL) 的影響，在句法和語意的處理的大腦反應是否會有差異。該研究結果顯示，第二語言習得年齡和精熟程度都對於句法和語意處理的大腦神經機制產生影響，而其中習得年齡對於文法處理有顯著的影響，而精熟程度對語意的處理有較大的影響。在同樣高精熟程度的晚期雙語者 (平均 AoA 為 18–20 歲) 較早期雙語者 (從出生就接觸雙語) 的左右腦的額下迴 (bilateral IFG) 有較大的活化反應 (AoA 效果)；而一樣是晚期雙語兒童，越是精熟程度差的雙語者，則會運用較多左腦額下迴 (LIFG) 和右腦的額中迴 (RMFG) 的神經迴路來進行句子的文法判斷作業，而一出生就接觸雙語的早期雙語兒童和單語者在處理母語和第二語言時的大腦反應並無顯著差異 (Wartenburger et al. 2003)。可見得從一出生就開始習得第二語言的早期雙語兒童，不論是第一語言或第二語言的處理，運用演化而來已經預設好了的 (predisposed) 左腦語言神經迴路已經足夠處理了，相對而言，隨著年齡漸長才習得第二語言的群體則需要擴展 (distribute) 到相關認知控制功能的腦區的輔助才能有效進行語言處理的作業，而不同 L2 精熟能力水準者所需要拓展應用的腦區也不盡相同，同時也存在著相當大的個體差異及語言特性的差異。

其他也有類似的關於句法處理的研究，Jasinska 和 Petitto (2013) 比較從出生就處於雙語環境的早期雙語者，4–6 歲時開始處於雙語環境的晚期雙語者，成年雙語者及單語者，這四群受試者在處理句子時的大腦神經迴路反應的差異。研究結果顯示：早期及晚期兒童雙語者和成年雙語者都較單語者，除了在左腦傳統的語言區 (左腦額下迴 LIFG，布洛卡區 (Broca's

Area) 顳上迴 STG) 有較大的反應之外，在右腦顳上迴 (rSTG) 和右腦額下迴 (rIFG) 也有較大的反應。更重要的是，比較一出生就處理雙語環境的早期雙語兒童和從 4–6 歲起開始接觸雙語的晚期雙語兒童，看到兒童時期的雙語經驗不只改變基本的語言處理神經迴路，也會改變高階認知執行功能的腦區來因應語言處理作業更形複雜的需求。因此，接觸第二語言的年齡早晚確實有影響。該研究發現晚期兒童雙語者較早期兒童雙語者及單語者，在進行句子語意及句法判定處理時包含更多前額葉 (prefrontal cortex) 的腦區的活化反應 (腹背側前額葉 DLPFC)。可見得隨著大腦發展的軌跡，第二語言的接觸的年齡不同對於透過語言處理機制修正改變大腦迴路的結果也會有所不同。接觸得早就愈發能運用演化而來先天設定的語言處理的基本的神經機制，而越是晚接觸第二語言，母語的處理已經型塑了基本的神經迴路且達到穩定，使得後來才接觸的第二語言只能在這個基本的迴路之上，隨著正在發展的軌跡，逐步從顳葉發展成熟連結到額葉，能運用的神經迴路也逐漸隨著發展軌跡擴展開來 (不再囿於左側化的發展)，透過語言處理所需要的各個神經迴路的有效連結來型塑大腦的組織及有效連結。從另一方面來看，當語言處理所需要的能力，不再只限於嬰兒期的時間序列 (time-based) 的音素的分段 (segment) 和區段 (chunk) 的處理時，就不是只採用已經預設好擅長處理語言溝通最基本的元素的傳統語言處理神經迴路可以包辦的了，必須向外擴展連結擅長其他功能的腦區，通力合作，才能有效完成更具複雜的語言特徵的處理。例如，從語音到詞彙，到語意，到句法等複雜多重的語言特徵的連結及相互對應 (mapping) (形音義的對應) 及句子的理解等等，而雙語同時激發的競爭處理更遑論需要更多認知執行監控的機制來處理了。

因應隨著個年齡而改變的生物機制，當年齡的增長到青春期之後，到所謂完功能性語言左腦側化的時候 (Dehaene et al. 1997)，我們看到隨著習得年齡的增長，與早期句法處理相關的神經迴路也呈現逐漸減少左側化到特定腦區的現象，從 ERP 的反應上也看到遞延或消失的情況 (Weber-Fox & Neville 1996; Pakulak & Neville 2011; Caffarra et al. 2015)。從研究句子文法處理作業的腦造影文獻中，許多研究者指出左腦額下迴 LIFG 的島蓋部 (opercular) 和三角部位 (F3op/F3t) 和左前運動皮質側部是職司句法處理的特定功能腦區 (Suzuki & Sakai 2003; Stromswold et al. 1996; Dapretto & Bookheimer 1999; Embick et al. 2000; Friederici et al. 2000; Hashimoto & Sakai 2002)。Sakai 等人於 2002 年特別採用事件相關跨顳刺激 (Event-Related Transcranial Magnetic Stimulation) 的實驗方法來確認左腦 IFG 區域中的 F3op/F3t 在人類進行句子處理時扮演不可或缺的「文法中心」(grammar center) 的角色 (Sakai et al. 2002)。而這個「文法中心」的功能性反應是否因第二語言習得年齡不同而異呢？從過去的研究，我們了解左腦額下迴 LIFG 在進行文法處理時，除了具有第二語言習得年齡的效益 (Wartenburger et al. 2003)，還有接觸第二語言時間長短的效應 (Perani et al. 2003)，作業特性或受試者年齡的效應 (Schlaggar et al. 2002) 等等，眾多因素的影響，不一而足。於是，Sakai 試圖將受試者年齡，精熟程度，語言作業需求，和作業反應特性對於 LIFG 的作用分別釐清。研究結果顯示，因應第二語言習得的大腦可塑性，即使是 L1 (日文) 和 L2 (英文) 在學習者的知識系統及作業反應特性上有極大的差異，大腦的活化至少在 13 歲以前是受到第一語言左側化到 LIFG 特定腦區所導引。另外，即使母語的程度相當，第二語言習得年齡為 13 歲的學習者，

左腦 F3t/F3O 的活化程度顯著大於 19 歲開始的第二語言學習者，所以「文法中心」是熟練使用任何一種語言都必須具備的特定的語言功能區域。而精熟程度在第二語言習得的初期，隨著接觸第二語言的時間增加，大腦皮質活化增強，而精熟程度隨之提升，但是當第二語言達到高精熟程度之後，大腦皮質活化的程度也會慢慢減低，這個階段為語言知識系統的固化 (consolidation)，因此，第二語言的接觸時間與大腦皮質的活化反應呈現的是非直線線性的關係，而是先升，進而平緩，後則下降的曲線關係 (Sakai 2005)。

透過以上文獻的回顧，讓我們更清楚了解句法處理的特定腦區及相關腦區的功能反應與第二語言習得年齡及精熟程度的效應，以及功能性左側化隨著年齡增長的大腦發展的軌跡，趨於平緩及穩定的現象。

除了句法之外，在聲韻處理上也有看到敏感時期的效應；有鑑於人類的語言處理是相當複雜的作業，所對應的大腦是更具彈性的動態處理系統，當然相關的聲韻處理絕對與初始的感知發展有關，但是，也絕對不會僅止受限於感知的發展。現今運用腦造影設備，研究者可以了解神經連結發展過程對應的認知功能及語言處理的發展情況。接下來將討論，語言習得年齡和雙語學習發展的互動關係及相關腦造影的研究證據。早期，Kim 等人於 1997 年在 *Nature* 雜誌上率先發表採用 fMRI 來探討雙語者和晚期雙語者在執行回想過去特定時間發生的事件並用 L1 和 L2 說出的作業時，大腦神經迴路活化區域的比較 (Kim et al. 1997)。研究資料顯示，所有受試者的韋尼克氏區 (Wernike's area) 都有活化的反應，且反應的區域也趨於一致，而在布洛卡區 (Broca's area) 則看到些微的差異，早期雙語者對於母語及第二語言活化的區域有許多重疊，而晚期雙語者則在布洛卡區相鄰的兩個分別的區域有較大的活化，在回想的作業中，負責語言理解的腦區有比較大的活化，而在語言產出的作業時 L1 產出時和 L2 產出時活化的區域不同，而早期雙語者則沒有差異。但是，這樣初步的結果，並不足以釐清，究竟第二語言習得年齡在雙語神經機制的發展扮演什麼角色？從早期嬰兒的研究，我們知道一個月大的嬰兒就能夠分辨“ba”和“pa”的聲音 (Eimas et al. 1971)，而剛出生 4 天的法國嬰兒，就能分辨不同語言的語音，對於母語的感知較俄文強 (Mehler et al. 1988)。可見得，因應早期感知運動神經發展，也同時發展了聲韻感知的處理能力，而聲韻感知處理能力是後續發展語言及閱讀能力的重要基礎。Laura Ann Petitto 等人 (2012) 比較單語和雙語的嬰兒，分別 4-6 個月大和 10-12 個月大，在較小的群組中，單語嬰兒和雙語嬰兒對於母語和第二語言的語音反應的神經反應都在聽覺處理的顛上迴 (superior temporal gyrus, STG) 的區域，而在較大的嬰兒則看到在左腦額下迴 (left inferior frontal cortex) 有較大的活化反應，這是在較小嬰兒的神經反應上所沒有的現象，這符合語言發展左腦側化的假說。單語的嬰兒隨著年齡的增長對於母語的語音的反應相對減低，但是，雙語的嬰兒，則對於母語和非母語則維持同樣敏感度的反應，對於非母語的反應也看到左側化到額下迴的現象。Petitto 稱這個現象為 'perceptual wedge' (感知楔定)，能夠維持延續孩童對於語音的敏感時期。此外，Friederici 等人觀察 4 個月左右大的德國嬰兒和法國嬰兒已經能夠對於非母語的重音特性 (德文重音在第一音節，法文重音在第二音節) 具有差異感知的敏感度 (Friederici et al. 2007)，可見得環境的語音刺激的特性會行塑造出語音感知的特質。早期研究者 Asher 和 Garcia (1969) 評斷一群

從古巴移民到美國的人說英文的腔調和英文母語者的腔調的相似度，受試者移民到美國的年齡分布為 6–19 歲，研究者發現和母語者腔調的近似性與他們開始學習英文的年齡有高度的相關。後續學者也驗證了第二語言的腔調和第二語言的習得年齡呈現清楚的線性關係 (Flege 1995; Flege et al. 1999a; Flege et al. 1999b; Piske et al. 2001)。在母音 (vowel) 的感知和產出上也看到第二語言習得年齡的效果。Flege 和 MacKay (2004) 研究兩群從義大利移民到美國的人，分別是 2–13 歲的早期雙語者，和 15–26 歲的晚期雙語者，發現早期雙語者區辨英文母音的能力較晚期雙語者為佳。研究者據以推測，這是由於早期雙語者順應母語習得時建構語音系統的機制，會自動將感知到的語音刺激融合入建構中的單一語音系統（感知同化理論 perceptual assimilation model），因此忽略語音中的細微差異。而晚期雙語者，則是在母語的語音系統已經建構完成的情況下，採用比較語音刺激與原有的語音系統的差異來產生連結的方式處理，因此較容易區辨不同語音的差異。從相關研究證據，我們了解第二語言的語音感知和產出會受到第一語言所建構的語音系統的影響 (McAllister et al. 2002)，Guion (2003) 進一步發現雙語成年人母音的類型 (vowel categories) 的建構決定於他們何時習得第二語言，已習得的母語母音類型會導引第二語言的母音發聲，這個現象在兒童的早期雙語者身上只看到中度的效果，而在成年的晚期雙語者看到強度的效果。所以，愈晚開始學習第二語言者，受到第一語言聲音系統的影響就愈大。當然愈早學習總是在語音及聲調感知及產出的發展上愈具有效性 (effectiveness)，但是，因為大腦具有可塑性，隨著環境的改變，學習第二語言的時間長短等變數，也一直在改變，並非單純因為過了關鍵期所致 (Tsukada et al. 2005; Flege et al. 2006)。上述的研究關於發現語音感知和產出與第二語言習得的年齡的關係，都是呈現線性的關係，而且沒有突然的轉折點 (cutoff)，即不支持所謂關鍵期的論點。

在 fMRI 的腦造影資料中，研究者進一步確認，早期雙語者和晚期雙語者的大腦神經迴路活化的差異。研究者發現早期雙語者比晚期雙語者對於單一重覆語音刺激，在與負責語音感知的腦區相近的左腦的顛上迴 (left superior temporal gyrus) 有較大活化。而且當重覆語音刺激的最後一個語音不同時，這個效果更大，活化的區域包括左腦的腦島 (left insula) 和左腦顛上迴的區域，活化的區域有部分不同於單一重覆語音刺激反應的區域。此外，早期雙語者在右腦的區域也有較大的活化，包括額下迴 (inferior frontal gyrus)，中央前迴 (precentral gyrus)，羅蘭迪克島蓋 (rolandic operculum)，和顛上迴 (superior temporal gyrus) (Hernandez 2013)。相較之下，早期雙語者的神經活化的形態呈現由較早發展成熟的感知運動系統擴展形成，而晚期雙語者則呈現較倚賴較晚發展成熟的前額葉功能運作來處理語音資訊，完成相同的認知作業目標，由此，可以看到隨著第二語言習得年齡的變化，與大腦結構生物發展軌跡的對應關係及其所產生的差異。亦可見所謂第二語言習得年齡的效果 (AoA effect)，其內在意涵是展現了大腦生物結構發展與功能型塑的機制，和環境，語言及社會文化等刺激動態持續互動的結果，符合感知同化理論和語音學習理論 (Speech Learning Model) (Flege 1995) (Archila-Suerte et al. 2013)。

不論是句法的處理或是聲韻的處理，依循着大腦生物結構發展的軌跡及與環境的互動之下，整體而言，都看到左腦傳統語言區功能性側化的第二語言習得年齡效應，也就是當

L2 習得年齡愈大，則語言處理機制功能性左側化的反應趨於緩和穩定，並同時朝向擴散的神經迴路相互連結的形態發展。在成年期之後才接觸或學習第二語言，即便能夠達到與單語者相當的精熟程度的雙語者，進行語言處理作業時大腦活化的區域類型和單語者的反應類型確實存在許多的差異。相對於第二語言習得年齡而言，第二語言精熟程度對於第二語言處理機制處理的角色則較為次要 (Archila-Suerte et al. 2015)，或者扮演一個調節聽語理解的角色 (Sörqvist et al. 2014)，除了先前提到對語意判定具有影響外，也呈現影響雙語者發展不同的策略來處理字詞型態的複雜性的特定作業效果（高精熟程度者採用依循型態規則解構策略，而低精熟程度僅能依賴已經習得的詞彙來判斷）(Liang & Chen 2014)，此外，在單字閱讀的作業上，也看到低精熟程度者因為需要費力處理形音對應的作業，導致其閱讀速度較高精熟程度者來得慢，而且在大腦發聲運動區的神經活化反應較高精熟程度者來得大 (Meschyan & Hernandez 2006)。這些關於精熟程度不同所呈現的行為反應和大腦神經反應型態有所不同的研究證據，讓我們看到精熟程度對於雙語的發展，具有不同的影響角色，或直接，或間接，或為因，或為果，隨著年齡的增長，不同年齡階段，不同作業需求特性等有不同層次的交互作用，較難單獨抽離來討論所謂的精熟程度效果 (proficiency effect)。從以上的文獻回顧，反應出不同變數對於大腦可塑性與學習成效的關聯，這在後續段落會有更進一步的討論。

2.2.1.3 成年人的雙語學習 (adults for L2 learning)

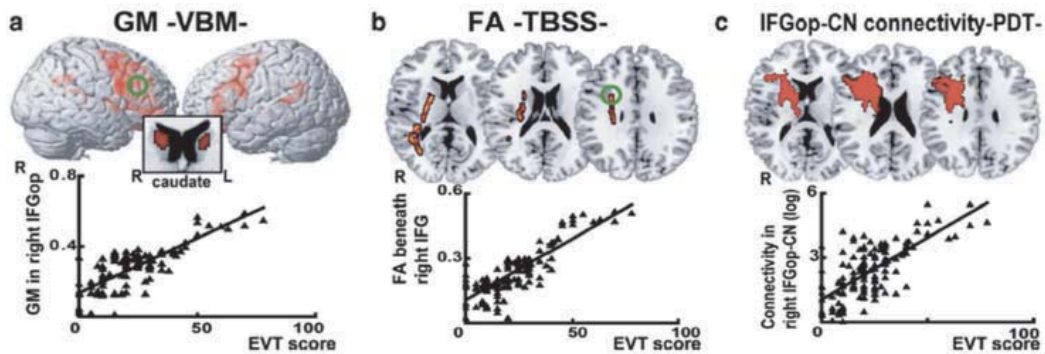
因為全球化的影響，無論是否移民，或因為工作或學業上的需要，或生活中的需求，成年人學習第二語言已經是一種常態的現象。從上述的文獻回顧可以了解，雖然晚期雙語者相對於早期雙語者，在第二語言腔調及發音等方面要達到類母語 (native-like) 人士的水準會比較困難，但是，第二語言的聽說讀寫的精熟程度不完全決定於習得的年齡，也和練習的程度及訓練的方式及時間長短有密切的關係。

由於大腦具有可塑性，即使過了所謂敏感時期的成年人，學習第二語言的經驗，也可以看到大腦神經功能性活化和結構上的改變的證據。例如，Schlegel 等人 (2012) 以擴散張量影像 (diffusion tensor imaging, DTI) 掃描追蹤研究比較 11 個美國大學生在 9 個月的期間內每週 7.5 小時學習密集的中文學習課程，控制組為 16 個美國大學生在同樣的時間內並沒有學習中文。腦造影的資料顯示學習中文的實驗組學生，他們平均的非等向分數 (fractional anisotropy, FA) 值較控制組高，表示他們的白質 (white matter) 神經束的連結較緊密完整。同時，中文學習者的 FA 值的斜率和他們的中文學習成效成正比，研究者據以推論中文學習的精熟程度直接與學習者大腦結構的改變產生連結，換句話說，神經連結愈緊密，學習行為表現愈好。研究者更進一步發現，實驗組中有 5 位學習者他們的白質的增強連結都連結到尾狀核 (Caudate Nucleus, CN)，確實反應出對應於語言處理中認知控制的功能運作，與上述比較雙語者和單語者的灰質的體積的腦造影資料中，看尾狀核體積大小與語言切換作業有正相關的證據 (Zou et al. 2012) 相吻合，可見得成年人學習雙語可以看到在語言切換的認知控制的功能上看到優勢。另外，Mårtensson 等人 (2012) 研究軍事學院招募的訓練的專業口譯學生，經過 3 個

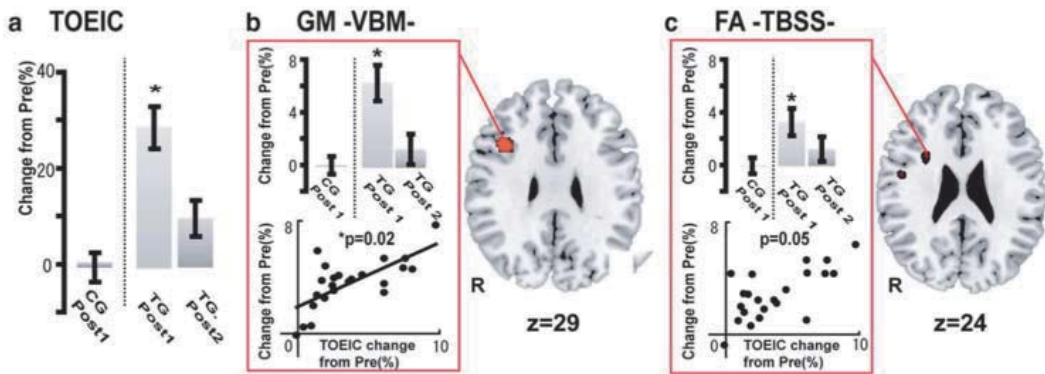
月的訓練字彙和成語的密集訓練（300–500 個字彙或成語），控制組為和實驗組年齡及認知控制能力相當的非專業口譯學生，研究結果發現實驗組的學生相較於控制組，他們的左腦的額下迴 (IFG)，左腦的額中迴 (middle frontal gyrus, MFG)，和左腦的顛上迴 (STG) 的皮質厚度增加，及右腦的海馬迴 (hippocampus, HP) 的體積增大。同時發現，第二語言的精熟程度和左腦顛上迴 (STG) 和右腦海馬迴 (HP) 的厚度呈現正向關聯，研究者指出神經結構上的差異反應出與形音對應 (sound-form mapping) 和字詞建構 (word forming) 的語言處理作業相關的功能，看到了作業特定的訓練效果 (training-specific effect)。

上述兩個研究都看到符合語言處理左側化的發展架構下，在左腦語言處理神經迴路的大腦皮質因應第二語言學習經驗的改變。但是，也有研究者看到不同於上述研究的發現，看到更多在右腦因學習經驗所引發的改變，Hosoda 等人 (2013) 採用跨模式 (multimodal) 的腦造影研究，採用 VBM 計算灰質體積，TBSS 計算白質完整和機率擴張向量 (PDT) 計算大腦皮質間的連結，同時比較灰質及白質的變化和神經迴路的有效連結，受試者為具有不同英文為第二語言的精熟程度的母語為日文的大學生，實驗組為進行為期 4 個月每週 60 個單字或片語的英文字彙（讀和聽）學習密集訓練課程的 24 名大學生，控制組為年齡相當的 20 名大學生。進行橫斷面 (cross-section) 研究和長期追蹤 (cohort) 研究，受試者群並無重疊。在開始前有量測實驗組和控制組的英文字彙能力 (EVT, NART) 和進行 MRI 掃描 (T1)，以建立實驗前的基準資料（「前測」），並以魏氏成人智力量表 (WAIS-3) 和人格量表 (NEO-FFI) 來確認受試者在智力和人格特質上是具同質性的。在結束訓練的時間點馬上進行兩組學生的英文能力測驗和 MRI 的掃描 (Post1) 建立「後測一」的資料，再於後測一的時間點之後的一年後進行同樣的英文能力測驗和 MRI 的掃描 (Post2) 建立「後測二」的資料。長期追蹤組則採用 TOEIC 測驗來建構前測，後測一和後測二的三個時間點的資料。研究結果發現，訓練的效果反應在右腦 IFGop 體積的增大，IFGop 到尾狀核 (IFGop-Caudate) 及 IFGop 到顛上迴及緣上迴 (supramarginal gyrus, SMG) (IFGop-STG/SMG) 神經束迴路的白質重新組合（詳細說明請參考〈圖 6〉、〈圖 7〉和〈圖 8〉）。研究者還觀察到，當受試者在訓練結束後一年內沒有再持續練習字彙的學生，他們的灰質的體積會回復到接近先前前測時的水準，而有持續練習的學生則呈現增加的狀態，可見灰質的體積的變化反應訓練的作業特定效果，經常練習體積增大，停止練習，則體積變小，可見得經常練習扮演關鍵的角色。

爲了要更緊密控制實驗前及實驗過程中，沒有額外的實驗目標語言的接觸的刺激或使用的經驗，研究者 Wong 等人 (2008) 利用假字與圖像的連結並賦予不同的音高 (pitch) 類似中文的四聲聲調，來設計學習的目標語言內容，進行為期數週的訓練，已確定都在評估作業中都達到高精熟程度的表現，將表現高於 95% 以上者歸類為成功者 (successful learner, SL)，其餘者歸類為較不成功者 (less successful learner, LSL)，進一步比較這兩群受試者的大腦結構改變，研究結果顯示，成功者組在屬於聽覺皮質區的左腦的黑索氏迴 (Heschl's Gyrus, HG) 的灰質體積較大，也較具白質的完整性。而且，在字和音高對應的作業 (word-pitch mapping task) 中的表現成績和左腦 HG 的灰質的體積呈現正相關的關聯。這樣的結果，和 Wong 等人 (2007) 與 fMRI 的結果吻合；SL 組的大腦活化的區域集中在職司語音處理的左腦顛上迴

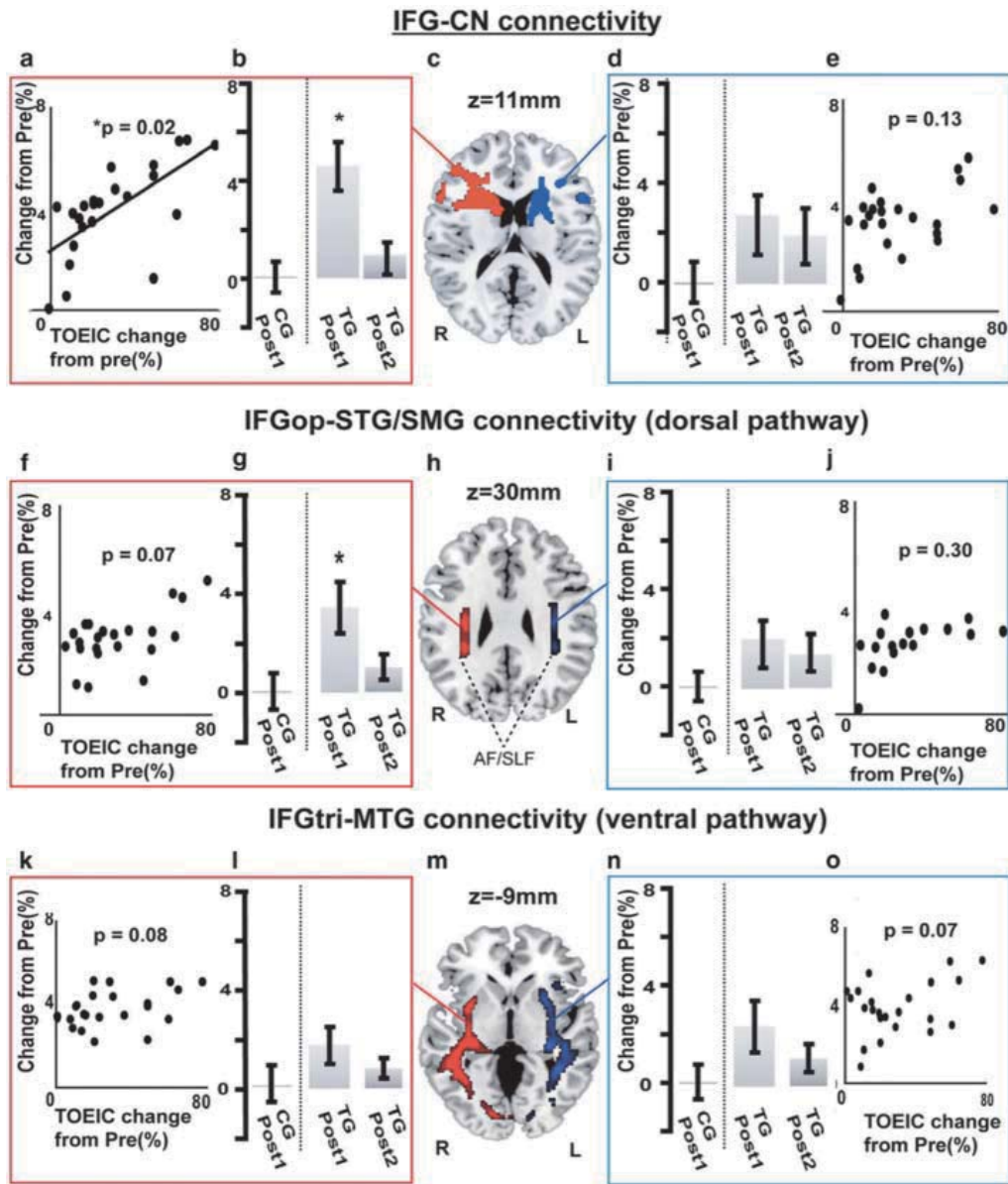


〈圖 6〉實驗組和控制組的比較。(a) 實驗組的左右半腦的 IFGop，顛上迴 STG／緣上迴 SMG 和尾核 CN 的灰質體積都比控制組的大，而且右腦 IFGop 的體積和第二語言英文的成績表現 EVT 值呈現正相關，達統計上顯著水準，同時以綠色圓圈標示出右腦 IFGop 的位置。(b) 右腦 IFGop 皮質下 (subcortical) (綠色圓圈標示的腦區位置) 白質完整性的測量值 FA 值和第二語言英文的成績表現 EVT 值呈現正向關聯，且達統計上顯著水準。(c) 所有受試者都呈現右腦 IFGop 到尾狀核 CN 的神經束連結，而且與第二語言英文的成績表現 EVT 值呈現正向關聯並達統計上顯著水準 (統計水準 $p < .05$) (Hosoda et al. 2013)。

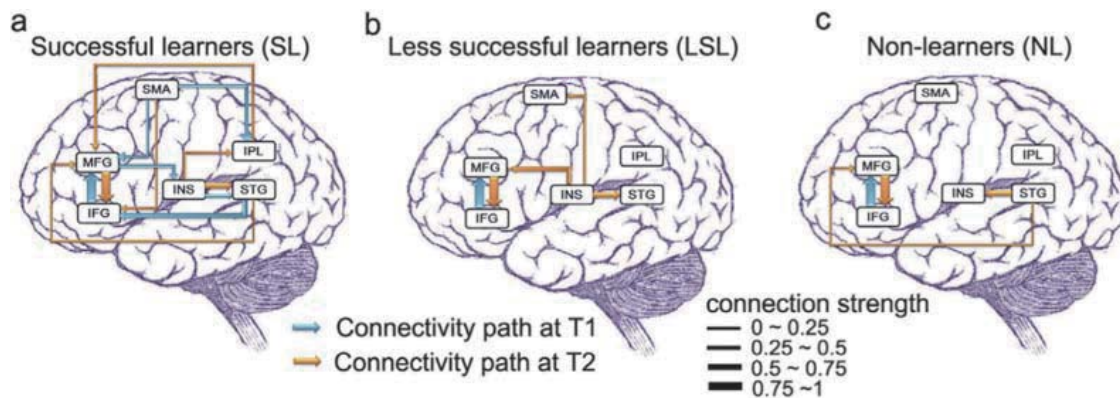


〈圖 7〉顯示長期追蹤組第二語言能力 TOEIC 成績，和灰質及白質變化的結果及其關聯。(a) 以前測值 T1 為基準，呈現各群組不同時間點 TOEIC 成績平均值的比較，由左至右分別是控制組 CG 後測一 post1 實驗組 TG 的後測一 post1 和後測二 post2，其中以實驗組的後測一成績平均值顯著高於前測成績平均值，顯示接受學習訓練組的第二語言成績表現有顯著的提升。(b) 腦圖紅色像素範圍 ($x, y, z = 36, 11, 28$; z 值為 7.84) 上標示出右腦 IFGop 的位置，實驗組後測一的右腦 IFGop 體積較前測體積大，且其增加量大於控制組，達統計上顯著水準，同時，所有受試者右腦 IFGop 體積的變化量與第二語言成績表現呈正相關。(c) 腦圖黑色的點標記右腦 IFGop 皮質下的腦區，實驗組該區域的 FA 值，後測一的值大於前測的值，且其增加量大於控制組，達統計上顯著水準，同時，這個腦區白質完整性的變化量與第二語言成績表現呈正相關 (Hosoda et al. 2013)。

STG 的區域，而 LSL 組則是比較分散到額葉和其他顛葉的區域。而這兩組成員在學習前就存在著個體差異，而這些個體差異可能與他們的認知控制能力有所關聯。後續，Yang 等人 (2015) 採用相同的實驗典範，進行學習前 (T1) 後 (T2) 的 fMRI 掃描，並以 6 個重點區 (ROI) (IFG, MFG, SMA, IPL, STG, INS) 及連結分析 (connectivity analysis)，來探究神經結構改變和行為表現之間的連結。研究結果發現，連續 6 週學習這項假字的目標語言，處理接受的聲調



〈圖 8〉長期追蹤組大腦神經連結強度的比較。以前測 T1 為基準，比較控制組的後測一 post1，實驗組後測一 post1 和後測二 post2，這三個時間點的連結情況，分別計算 IFG-CN 連結，IFGop-STG/SMG 背側通路的連結，和 IFGtri-MTG 腹側通路的連結的 PDT 值，從 c, h 的腦圖中可以看到 IFG-CN 的連結強度和 IFGop-STG/SMG 背側通路的連結強度在左右腦都看到有差異，但是只有在右腦差異，達到統計上顯著水準（右腦變化值如 b, g 所示達到統計顯著水準，左腦變化值如 d, i 所示未達統計顯著水準）。從 m 圖中看到 IFGtri-MTG 的腹側通路的連結強度的差異在左右腦都有，但是左右腦的差異量都沒有達到統計上顯著水準（如 l, n 所示）。其中只有右腦 IFG-CN 的連結強度的增強的變化值，與整體的第二語言成績表現呈現正相關，且達統計上顯著水準（如 a 所示），其餘右腦 IFGop-STG/SM 的背側通路和 IFGtri-MTG 腹側通路的連結強度增強的變化值，與整體第二語言成績表現的關係則未達統計上顯著水準（如 f, k 所示），及三個區域在左腦的變化值也和整體第二語言成績表現沒有關聯（如 e, j, o 所示）(Hosoda et al. 2013)。



〈圖 9〉成功學習者 SL，較不成功學習者 LSL，和沒有學習者 (NL) 三組受試者進行聲調區辨作業，所呈現的學習前 T1 和學習後 T2 兩個時間點的大腦 6 個重點區的有效連結圖，分別為 a, b, c 所示。箭頭表示從一個 ROI 的 BOLD 活動預測下一個 ROI 的 BOLD 活動的方向。線條的寬度表示連結的強度。藍色線條代表 T1 的連結，橘色代表 T2 的連結。IFG：額下迴，MFG：額中迴，SMA：運動輔助區，INS：島腦，STG：顳上迴，IPL：頂下迴 (Yang et al. 2015)。

和詞彙資訊等刺激的學習者，和沒有學習這目標語言的學習者 (non-learner, NL) 比較，大腦運作的神經迴路的類型不同。而在學習者群組中，SL 和 LSL 在語言處理相關的神經網絡上有顯著的差異，SL 具有比 LSL 較多不同腦區間的多重通路的大腦神經網絡形態，例如從頂下迴連結到額中迴，運動皮質區連結到額下迴，島腦連結到顳上迴和頂下迴，而顳上迴連結到額中迴等等，使得大腦資源的應用更加整合及協調，更具有效性 (effectiveness)。可見得短期的第二語言的經驗能夠型塑神經的改變，而從這些改變類型的分析可以進一步了解個體的差異如何反應在學習的成效上。詳細說明請參考〈圖 9〉。

另外，研究者也進行專家和非專家的比較研究 (Elmer et al. 2011; Elmer et al. 2014)，研究者在有多年專業口譯經驗的成年人和具相近認知能力的一般多語的成年人比較中也看到灰質體積和白質完整性的差異。在專家和非專家的比較下，在某些語言和認知控制的腦區，看到專家比非專家的灰質體積較小，白質完整性較低的情況，這些腦區包括右腦 IFG pars opercularis (IFGop)，左腦的 IFG pars triangularis (IFGpt) 和 middle ACC，及左右腦的尾狀核 CN，並推論可能與專家的長期口譯經驗相關。這樣的結果和前述的相關學習訓練所觀察到的效果有一些出入。但是，或許是實驗作業差異所致，或者是長期精熟的經驗，使得部分認知處理功能已經達到自動化的功能，已經不需要費力處理，所以，在大腦灰質體積和白質完整性的變化上，可能會因為是學習剛開始的階段，還是已經經驗純熟的階段，而有所不同。

2.2.1.4 老年人的雙語保持 (elder adults)

在近期一些老化的研究，Luk 等人 (2011) 檢測英語為母語的平均年齡為 70 歲的年長雙語者和單語者，所有雙語者都在 11 歲以前開始學他們的第二語言並且在日常生活中規律

地使用雙語。研究者檢測他們的白質完整性和靜息態功能性連結 (resting-state functional connectivity)，雙語者比單語者在連接左右兩半腦的胼胝體向後擴展到兩側的上縱束 (superior longitudinal fasciculi, SLF) 連結，向前擴展到右腦的額枕下束 (inferior frontal-occipital fasciculus, IFOF) 和右側鉤束 (uncinate fasciculus, UF) 都有較完整的連結 (FA 值都較高)。這項研究結果和 2012 年的 Mohades 等人在雙語兒童上的發現一致 (Mohades et al. 2012)。此外，白質的結構功能性連結和靜息態功能性連結是有相關的，特別是前額葉的區域，研究成果指出終身的雙語經驗導致結構和功能的同步改變。進一步強調這些現象，在所謂「認知保留」(cognitive reserve) 的神經基礎上，研究者推論在雙語者大腦白質的增生，對應於在阿茲海默 (Alzheimer) 症的病人大腦看到灰質的萎縮，可能是一種補償作用：終身雙語經驗可能保留並成為防阻開始老化所造成的認知衰減的主要因素。Gold et al. (2013) 提出和 Luk 等人不同的研究論點，他們認為雙語者的白質不一定增加，但是可能事實上是透過雙語者更有效率的執行功能網絡的使用來補償白質的萎縮。這項認為雙語對於老化的認知衰減提供一個保護性的機制的推論，在近期的由 Abutalebi 等學者 (2014) 的研究進行檢驗，受試者為香港的雙語年長者的 (中文和英文或廣東話或普通話) 和義大利文的單語者採用看圖唸名作業來看他們行為的表現和大腦的結構。實驗組和控制組在年齡，教育程度和認知能力上也都沒有統計上的差異，實驗結果顯示，整體而言，雙語者比單語者有較大的灰質體積，特別是在左腦的顳葉的前端區位 (temporal pole, TP)。進一步的以重點區為主 (ROI-based) 的分析，證據也顯示只有 L2 看圖唸名的表現和左腦 TP 區域的灰質體積成正向關聯，以單語 (母語) 唸圖的表現就沒有這樣的關聯。研究者據此推論，左顳葉前端可能在雙語者的詞彙觀念的處理上扮演重要的角色，而且，雙語的經驗作為一項保護的因子，經常使用雙語，能夠防止年長者隨著年齡增長時產生快速的灰質萎縮的情況。雖然，近期有研究者提出關於雙語優勢普遍性看法的質疑，認為是由於研究出版偏好正向的研究結果，所造成的偏誤 (De Bruin et al. 2015)。但是，雙語在老年人的認知保留優勢，目前學界還是普遍具有共識的。

綜合上述的研究結果，跨越各年齡階段的學習或使用雙語的經驗，基於大腦可塑性所呈現的變異，可能較類似學習曲線的形態，並非是直線的變化，而且是與語言的特性，學習的年齡，期間長短，學習內容，訓練的方式，衡量的作業特性，精熟程度及認知控制及語言背景個體差異等多個變數之間的動態互動。換句話說，大腦就是一個適應系統，因應不同年齡的發展，不同的環境，文化和語言刺激，隨著個體的差異，不同的接觸的方式和期間的長短，發展出不同的外在行為表現，及其對應內在心理表徵及大腦的結構變化，型塑大腦有效處理的神經網絡系統，以因應人類複雜的語言系統的運作。

2.2.2 適應系統 (adaptive system)

從大腦可塑性觀點來看，學習的結果反映在大腦的改變 (brain plasticity reflected by learning)，大腦透過一連串動態刺激反應的有效性 (effectiveness) 連結，在原有透過演化的選擇和變異的機制下的人類與生俱來的生物基礎上，型塑最有效的神經網絡連結，而且，這個

連結的形成和改變是隨著時間推衍不間斷的進行，是一個時間和空間的動態調適系統。這個系統是因應外在環境物理系統 (physical system)，人類本身的生物系統 (biology system)，和人際社會之間的文化系統 (cultural system) 三者間雙向互動所產生的結果。人類的語言，就是這個人類複雜適應系統的產物。

2.2.2.1 演化的產物 (as the result of evolution)

從人類考古的發現，人類從五百萬年前與黑猩猩分化後，原始人與類人猿的分水嶺大約在三百萬年前，人類能夠直立用兩足行走，而且因此能靈巧的使用雙手，以及因為喉部位置下降的雙管系統的構造，能夠發展出更豐富的共振頻率，相較於遠古人類因為喉部位置太高只能發出部分聲音配合手勢之外，能夠進一步進化到發展語言這項溝通的工具，來進行生存所需的社會行為（大約在十萬年前出現語言），再加上大腦容量日益增大，尤其是前額葉的發展；現代人與一百萬年前的直立人 (Homo Erectus) 有很大的差異，不只腦容量增加了約 400 立方釐米，也擴大了大腦皮質聯繫的區域 (Fisher & Marcus 2006; 王士元 2006)。上述這些演化的歷程，與語言的產生和使用的歷程，息息相關；我們看到人類使用語言這項工具的生物基礎，若是沒有因為直立而能使用雙手，能夠發出複雜語音的發聲系統，及一定規模的大腦容量，人類是無法隨著時空的遷移和社會文化的改變而發展出這麼複雜的語言系統。而人類能夠習得語言並掌握運用自如則需要心腦合一，也就是需要統合感知與認知系統，透過大腦總指揮前額葉的運作，協調語言與非語言的認知作業處理，及型塑腦區神經迴路間的有效連結。與生俱來的是演化而來的腦，大腦的生理機制，提供了語言相關的神經處理機制的基礎功能，類似本能的概念，是人類複雜系統中眾多的器官之一，具有相當程度的適應功能。

2.2.2.2 統計學習 (statistical learning)

在前面的章節中我們了解在學習第二語言的過程中，學習者自然而然的會將第二語言的語言特徵／規則／結構同化 (assimilating) 到原先已經建構的母語的架構上，也在大腦神經迴路上看到隨著第二語言精熟程度的提升，處理第二語言的神經迴路與第一語言的迴路趨於整合為一的相關證據 (Abutalebi et al. 2001; Abutalebi 2008)。同時，因為個體差異，例如學習的情境 (the context of language exposure)，聲韻處理能力，工作記憶能量，執行監控能力，學習動機及個人性格特質等變異，第二語言學習者的成效各有不同 (Bialystok et al. 2008; DeKeyser 2000; Dewaele 2009; Kroll & Linch 2007)。由於母語的習得，原則上，不需要經過外顯 (explicit) 的指導，就能夠耳濡目染地習得，這可見，我們人類經過幾百萬年演化的結果，具備了能夠從眾多環境刺激中理解其內隱的 (implicit) 的關係，具備感知及抽象化轉換為心理內在表徵的能力，透過編碼，儲存，提取等功能進行相關認知處理功能，在面對語言的刺激時，透過不同程度的認知控制能力，來進行語言的感知和語言產出處理。這種能夠在相鄰或不相鄰接觸

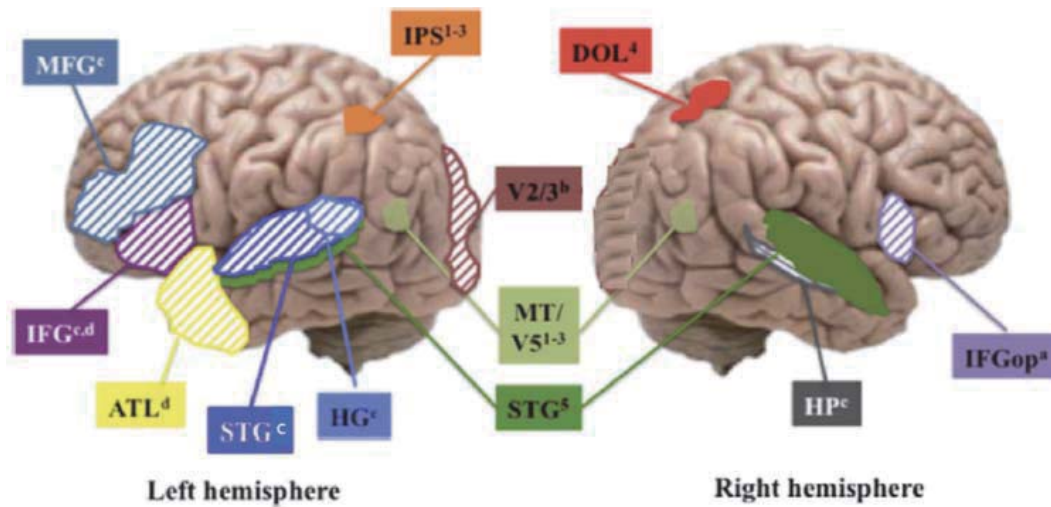
的情況下，在相同或不同的視覺或聽覺的資訊模式中擷取 (pick up) 語音或非語音 (verbal/non-verbal) 的資訊，並且因此改變行為的能力，就是所謂的統計學習 (statistical learning) 的能力。研究者認為這是一項人類語言學習的重要內在機制 (Saffran 2003)，例如嬰兒能夠很快的掌握語言結構的重要成份的統計特性，包括能夠在一連串的語言中作分斷的能力 (word segmentation) 產生字的邊界 (word boundaries) (Saffran et al. 1996)，區分語音的類別 (speech category) (Maye et al. 2002)，及語法結構的基礎 (Saffran & Wilson 2003)。近年來，有許多學者認為這項統計學習能力的高低能夠預測第二語言學習的表現。在母語的發展上，從許多的文獻中我們已經了解第一語言發展時所建構的幾項關鍵的語言處理特定的認知功能會影響第二語言的習得成效，包括聲韻覺知，句法處理能力，形音對應的組字規則 (orthographic knowledge)，和字彙能力等 (Ganschow et al. 1998)。而且第一語言的精熟程度也決定第二語言的成效 (Koda 2007)。從統計學習的角度來看，由於精熟的閱讀者在母語學習時基於對該語言及文字系統的語言特徵及規則的統計機率特性的了解，而發展出高度的敏感性，所以當他們在進行第二語言學習時，他們發展出一個整合的心理詞彙系統，主要是擷取和同化這個第二語言的特性的統計機率規則的結果。如果同化的障礙太大，則學習的成效就差，這如同其他任何認知能力，都存在著個體間對於所處環境資訊間的關聯性的敏感度的差異。所以，統計學習能力究竟是屬於一般認知能力的範疇，還是，屬於與語言相關特定的範疇，引起研究者的關注。然而，語言處理的機制，事實上包含了語言 (linguistic) 及非語言 (non-linguistic) 範疇的認知作業，所以無論是在語言特定作業中的統計學習能力，或者是一般認知作業範疇的統計學習能力，是否都會對第二語言的學習成效產生影響，是研究者關注的重點。Frost 等人 (2013) 以在以色列西伯來大學學習一年西伯來文的母語為英文的大學生為研究對象，採用 Turk-Browne et al. (2005) 的 24 個複雜視覺形態的實驗派典來進行視覺統計學習測試作業。透過西伯來文和英文這兩個語言特徵極端差異的語言文字系統（在字詞的形態複雜度，母音子音的聲韻結構規則，音素合理性機率，字首 (prefix) 及字尾 (suffix) 的規則機率分布等都截然不同），來看非語言範疇的視覺統計學習 (visual statistical learning) 能力，和幾項語言範疇的作業能力的關聯性，這些語言處理的作業包括指定非字編碼作業 (pointed nonword decoding task)，非指定唸名作業 (unpointed naming task)，字詞形態促發作業 (Morphological-priming task) 和語意促發作業 (semantic-priming task)。實驗結果顯示視覺統計學習能力和字詞編碼能力具有正向關聯，且有字詞形態的促發效果 (morphological priming effect)，語意促發上則無關聯，而且，視覺統計學習能力與一般認知處理能力的空間推理能力，工作記憶能力，辨識物件的速度的作業則沒有相關 (Frost et al. 2013)。因此推論，擷取圖像的視覺形態內隱的規則的機率特性的能力，與第二語言閱讀的發展 (learning to read) 有一定程度的聯結。類似的結果，也在 Wu 等人 (2012) 的學習中文為第二語言的研究中看到視覺統計學習的能力與字彙量及閱讀流暢性有正向的關聯 (Wu et al. 2012)。從上述不同語文的研究有相似的結果，研究者推測這意涵著擷取圖像形態的規則機率的能力與習得語言深層結構的能力這之間有共同的內在機制在運作。除了視覺統計學習能力之外，在聽覺統計學習能力方面的探討，Ahissar et al. (2006) 的研究指出聽覺的統計學習能力，可能與閱讀障礙有關。另外，

其他一般作業切換等認知監控能力，與第二語言處理的發展的關聯，及相互間作業普遍性效果或作業特定效果的關聯，也是未來統計學習探究的方向，以期更加了解人類的內隱的學習機制。

2.2.2.3 訓練效果 (training effect)——語言訓練 (linguistic training) 和非語言訓練 (non-linguistic training)

大腦既然是一個適應系統，那麼訓練的介入，可以從外顯行為和大腦結構及功能看到改變，而這項改變會因為訓練的作業類型，訓練時間的長短，訓練的方式及學習者個體的差異而有所不同。Li 等人 (2014) 彙整相關語言與非語言的訓練研究文獻，看到大腦灰質體積因為訓練介入的學習經驗而增大的情況，並且繪圖呈現這兩類訓練效果在腦區的位置；包括左腦的額中迴 (MFG)，額下迴 (IFG)，前顳葉 (ATL)，顳上迴 (STG)，黑索氏迴 (HG)，顳中視覺區 (MT/V5)，V2/3 視覺區，頂下溝 (IPS)，及右腦的背側枕葉 (DOL)，額下迴蓋部 (IFGop)，海馬迴 (HP)，顳上迴 (STG) 及顳中迴視覺區 (MT/V5)。尤其重要的是，圖中以斜線光影標示語言訓練改變的區域及以實心的圖像表示非語言訓練改變的區域，可以清楚看到語言的訓練所產生的改變大多是在左腦的語言神經迴路的區域，但是不侷限於左腦，在右腦記憶作業的海馬迴 HP 及執行監控的額下迴蓋部 IFGop 也都有看到改變，而且在左右腦的顳上迴 STG，同時看到非語言訓練所產生的改變 (May et al. 2007)，與在語言處理作業中關於發聲、語音及聲調處理扮演重要角色的左腦顳上迴 STG 因語言訓練產生的改變 (Mårtensson et al. 2012) 重疊。這其中，May 等人 (2007) 的研究是以重覆跨顳磁刺激 (repetitive Transcranial Magnetic Stimulation, rTMS) 直接刺激聽覺皮質區，在聽覺處理作業中觀察大腦灰質的體積大小的改變，在短短 5 天的刺激後，就看到大腦左右腦聽覺皮質區包括顳上迴 STG 的部分腦區的灰質體積增大。可見得在大腦可塑性的基礎上，顳上迴 STG 給予直接的電波刺激，也會產生結構上的改變，有廣義的訓練的效果（詳請參閱〈圖 10〉所示）。綜觀上述的研究文獻，關於訓練效果的討論，其實不應該一概等同視之。R. Lee 等人 (2013) 曾提出作業特定及作業普遍性效果的討論，許多研究所報告的結果，都具有實驗材料特性，實驗作業，及評估方式的限制與專屬特性，往往研究的結果，只能展現在特定刺激材料及作業之下，其可能的關聯和因果關係（因為可能還有未知的變數）(R. Lee et al. 2013)，而且外部效度的推論往往很難成立。因此，爲了要了解語言學習訓練與非語言學習訓練是否有共同的內在學習機制（例如，統計學習），或者，是否會有交互作用產生（例如，非語言訓練的刺激介入會有助於語言訓練的成效），是需要進一步採語言訓練與非語言訓練的混合實驗設計，才得以進一步釐清語言訓練和非語言訓練之間共同內在機制及其互動關係。

現今大腦這個適應系統在經過幾百萬年的演化之後，具備了適應未來發展的基礎，從上述的文獻探討，我們可以看到大腦的結構與功能是處在持續改變的狀態，長期的經驗累積和短期的訓練，都可以在大腦的結構和功能上看到改變，因此，我們的大腦是「正在演化」的腦。未來，因應數位時代中數位科技劃時代的迅速變遷，網際網路帶來的人際溝通交流時間



〈圖 10〉圖示語言訓練（斜線）與非語言訓練（實心）灰質體積增大的腦區。語言訓練的研究包括 a. Hosoda et al. 2013；b. Kwok et al. 2011；c. Mårtensson et al. 2012；d. Stein et al. 2012；和 e. Wong et al. 2008。非語言訓練的研究包括 1. Boyke et al. 2008；2. Draganski et al. 2004；3. Dreimeyer et al. 2008；4. Ilg et al. 2008；5. May et al. 2007。a-e 和 1-5 以上標標示在腦區說明（修訂自 Li et al. 2014）。

與空間的感知與傳統迥異，現代人面對與過去大不相同的數位刺激，同時擁有各類型可使用的數位工具，大腦這個適應系統的改變，會在雙語機制上產生什麼樣效能上的改變，是值得進一步探討的議題。

3. 數位時代的雙語發展 (bilingual development in digital age)

數位科技時代在我們的生活中充斥著各種多功能的數位通訊的軟硬體，對於人與人之間的溝通產生改變，也改變人們對生活週遭人事物的感知。例如，人際之間生活中的資訊交換或傳播，以前依賴人與人見面時口耳相傳的形態已經徹底被網路社群平台和通訊軟體的運作改變了，透過網路社群無遠弗屆的力量，跨越時空的限制，溝通無礙。除了改變人們日常生活，也改革了國家的民主政治運作（阿拉伯之春）。再者，對於現今 20 歲左右的所謂「數位原生代」(digital natives) 而言，他們一出生的環境中就已經有電腦，網際網路和行動電話，相對於我們這群成年後才有這些數位科技產物的「數位移民者」而言，對於在網路上搜尋資訊的能力和數位科技的操作上都較為熟練。例如，生活中的大小事都能夠 google 一下，用來查一下高鐵班次時刻表，或者對於某個新聞事件的報導或評論，或者了解一下醫師開的藥是什麼成分及功效（醫護人員往往不會有詳盡的說明）。而隨著智慧型手機的普及，各種生活小幫手的應用軟體 (APP) 也都應運而生，隨時能夠輕鬆掌握公車幾時抵達候車站，或者醫師看診的進度，讓時間可以作更有效的利用。更有一些翻譯的 APP，透過圖文辨識的技術，將智慧型手機攝影機讀取的圖像進行辨識，直接提供不同語言的翻譯，快速且便利，使得倚賴雙語的記憶不是唯一的管道了。拜數位資訊科技所賜，現代人不必耗費大腦的記憶能

量去記得大量的資訊內容，只要記得搜尋的方式或使用適當的工具，就能夠即時獲取充分及有用的資訊，滿足現代人類生活的需求。這種將大腦記憶外移的現象，是有助於提升人類有限的大腦資源作最有效能的使用，最近有研究者指出心理上認知已將需要記憶的內容安全地儲存於外在實體時，就能夠釋放出工作記憶能量，而使得接下來進行的記憶作業的品質更佳 (Storm & Stone 2015)。

數位科技不只影響人類對於記憶的儲存和提取的方式，也影響理解和產出作業的效能。例如，在課堂上作筆記的方式，採用電腦打字輸入的學生，學習成效比用手寫筆記的學生要差。Mueller 和 Oppenheimer (2014) 以普林斯頓和 UCLA 的上百位學生為對象，研究用電腦記筆記和手寫筆記在學習成效上的差異，研究結果顯示，手寫筆記的學生在觀念性理解的表現較佳，也比較能夠應用和整合在課堂上所學到的內容。研究者假設，用電腦打字作筆記和手寫筆記，所需要的認知處理的類型不同，因此影響學習的成效。手寫筆記較打字慢，不可能跟得上聽講的速度，所以，就得注意聽，消化後再摘要地寫成筆記，因此能夠簡潔有效地擷取必要的資訊。而且手寫筆記的過程中，強迫大腦運作進入高度專注的狀態，這些費力地運作大腦資源，有助於理解和記憶。相較而言，直接用電腦打字做筆記雖然比較快，但是卻可以不經過處理內容的意義，直接將聽講的內容記錄下來，因為，為了趕上聽講的速度的打字逐字記錄，就容易專注於逐字記錄而分心，或無法花費心思在內容的理解和分析上，就更別說是綜整內容和應用了。不論是課堂後的隨堂記憶測驗，或一周內的測驗，手寫筆記組的同學表現都較佳。可能是因為，手寫筆記是經過消化後的產出，而且手寫的筆跡，也隱含了當時記錄這項內容的情境脈絡的線索（當時的想法，情緒和意識狀態等等），有助於記憶的提取。這意涵著隨著書寫的動作，大腦運用的認知處理的歷程對於資訊的理解及記憶是有幫助的，因此有助於學習成效 (Mueller & Oppenheimer 2014)。而在課堂上使用電腦，還伴隨著一項對於學生學習產生負面作用的現象，那就是電腦上隨時出現在螢幕上的各類即時資訊提醒（電子郵件，社群網站，即時通訊軟體），容易造成分心，對於學習非常不利。雖然如前所述，拜數位科技之賜，得以即時同步進行多項作業，我們可以更有效的使用時間，但是，長期在多工之間進行作業切換，維持專注力的時間縮短，對於學習未必是好事。

數位科技運用在語言學習的設計上，也有不勝枚舉的例子。數位化的語言學習工具，在語言發展過程中會型塑大腦神經迴路的反應，李佳穎等人設計數位多媒體平台「收割平台」幫助小孩學習中文 (Huang et al. 2012a; Huang et al. 2012b)。該數位學習平台以互動遊戲不斷呈現字與讀音，透過動畫遊戲的操作，讓學習者自然而然習得中文形聲字的音旁與讀音的關聯，促進心理詞彙中形音對應連結的建構，提升兒童學習中文字詞的能力 (C. Lee et al. 2013)。同時，透過數位學習平台記錄個別學習者的學習歷程及錯誤類型，可以經由簡易的診斷，進行錯誤類型的補救矯正 (Chen et al. 2013)，也應用在發展型閱讀障礙者的介入補救中 (C. Lee 2013)。此外，該團隊也和芬蘭 Jyvaskyla 大學的 Agora 中心合作，開發 Grapho-Game 的注音符號教學版本，目前也進行以 GraphoGame 作為訓練學習的工具，以事件相關電位 ERP 記錄腦電波的數據，觀察兒童學習前後對於中文聲調變異感知敏感度的改變，以了解中文閱讀發展歷程中透過數位科技的輔助對於大腦聲調處理的神經機制的訓練效果。

在第二語言學習方面，善用數位多媒體科技呈現聲音與影像的特性，提供第二語言學習時必要且充分的字詞形音義特徵的刺激，語言使用的情境，及適時提供學習回饋給學習者，矯正學習錯誤，提高學習動機與興趣，讓學習者能夠依據自己的學習優弱勢進行個人化的適性學習。相較於傳統以教師及教材為中心第二語言學習（採用單一教材與進度的制式課堂教學）而言，以學生學習為中心的多元化的第二語言的數位學習模式，提升了學習的成效，也型塑了大腦的語言處理功能。R. Lee 等人 (2014) 看到經過中文數位學習的短期訓練之後，以中文為第二語言的學習者對於中文的聲調中三聲和一聲間差異的感知的敏感度提高了，而且對應作業處理的腦區，則有左側化的現象，推論係由於學習者經過學習後，強化了學習者對於中文聲調這項語言特徵 (linguistic feature) 變化的感知能力，並同化到既有的左腦語言處理神經迴路中 (R. Lee et al. 2014)。此外，也有研究者採用虛擬實境的 second life 架構學習平台，在虛擬世界中進行社群化的第二語言學習，也有利用 google 眼鏡結合線上家教系統，跨越學習的時空障礙進行沈浸式情境的語言學習。

總而言之，數位時代的環境，對於人類大腦的感知，認知，記憶，搜尋，提取，執行監控等能力，都產生影響，大腦這個適應系統也因應而改變。未來腦中的雙語，在建構和運作處理機制中，會有哪些受到影響？正面或負面？有多大的影響？都還有待我們進一步深入探究。

4. 結論

從人類演化發展的進程中，人獸之別在於語言；雖然猴子，猩猩與人類等物種大腦中都具有鏡像神經元，能夠透過模仿來學習，唯一的差別在於唯獨人類擁有複雜模仿 (complex imitation) 能力和能夠推論他人心智狀態的能力 (theory of mind)，才能夠從靈長類也具有的手勢開放性 (openness of manual gesture)，到手部技巧 (manual skills)，到示意動作 (pantomime)，到原手語 (protosign)，最後發展到原話語 (protospeech)，透過文化演化的促發，造就了語言的誕生，也奠定了人類大腦語言學習的神經基礎 (Arbib 2012)。我們也可以從 A. Liberman 所提出的語音知覺的肌動理論 (motor theory of speech perception)，了解語音知覺的神經機制中，鏡像神經元扮演了重要的角色。這個在演化中一直被保留下來並傳承到現代的人類的神經元，印證了生理系統的演化是伴隨著物理環境變遷和文化演化而調適生成的，歷史會反映在我們演化的腦中。人類在文字發明之後，人類文明得以突破性的發展與延續，透過功能性磁共振造影，Dehaene 等人 (2010) 的研究也讓我們看到文盲與識字者大腦功能上的差異，及隨著閱讀能力的發展，透過書寫強化了左腦梭狀迴 (fusiform) 的活化，與臉孔辨識的腦區產生競爭，並擴展到視覺反應的枕葉 v1 視覺區。同時，也強化顳平面 (planum temporale) 的語音處理功能，及由上而下的形音對應處理功能，而且即使是在成年期才學會識字閱讀，仍然看到神經迴路重新調整的現象 (Dehaene et al. 2010)。人類智慧的演化可以看到文化推衍的蹤跡，從甲骨文因應天人之際的溝通而生，而中國科舉取才制度下，造就精通文字的聲韻的深層結構及文字脈絡的運用，到了現今數位時代，平均智商分數 (IQ) 的成績較二十世紀初期，每十

年提升約 3 個百分點，即所謂的弗林效應 (Flynn Effect)。這些歷史的演變，讓大腦這個適應系統，不斷地隨著文化的演化，也持續演化中。尤其是在語言的使用上，腦中雙語或多語已是不可避免的趨勢，發展有效能的一腦多文 (one brain for all languages) 的複雜系統，是大腦演化的現在進行式，未來人類智慧的樣貌如何，值得我們拭目以待。

這篇文章回顧近三十年來的腦神經科學在雙語處理的研究進展，經由新的科研證據和模擬成效越來越好的心智模型，去檢視許多古老的研究議題 (Tzeng & Hung 1999)。包括雙語詞彙的建構，儲存，及提取時的競合關係；單語和雙語發展有無關鍵期之判定，和腦側化現象之間的關聯性，此外，第二語言之習得會重組神經迴路的明確證據，一方面讓我們對神經的可塑性，有了全新的認識，另一方面也點出跨越年齡的第二語言學習，對神經細胞的再生，維護，和延伸鏈結都有強化的作用；不但增進知識，更且延長生命。從生物演化的現象而言，無論是個人或群體，腦的演化不是過去式，而是現在進行式，更是未來式。雙語處理的腦神經研究確實是在尋求解答舊問題過程中展現人類文明演進的非線性型態，是複雜且不可預測。

回顧這三十幾年在雙語腦神經研究的成果，我們確實釐清了一些舊議題的涵義。例如，對語言在腦側化的理解，不應該追隨 Lenneberg (1967) 去問「左腦側化何時完成？」，而應該把問題倒過來，如 Tzeng & Hung (1999) 那樣的問「語言左腦側化何時停止？」，前者的問法，重點是由左右腦均能 (equipotential) 到由左腦主宰 (dominance)，而後者的問法，則著重在生理結構的腦側化在初生時就已如此，因此語言的習得從一開始就已側化，根本沒有「何時完成？」的問題。也就是說，從嬰兒到兒童，已側化的腦去從事精細的分析，是構成語言在左腦側化的主因。但隨著不同的認知功能越強化，以不同的方式去學習越來越抽象的詞彙，就不是單純的側化問題了，所以 Tzeng 和 Hung 主張要問「何時停止側化？」的問題了。這樣的看法，是符合當前腦神經影像的研究者用新的分析法所得結果的涵義的。目前研究者不再只看腦的部位活化量，重要的是要去計算出在從事某一認知作業時（包括語文），腦的各部位之間所形成的功能性聯結 (functional connectivity)。從這個觀點，腦側化的研究已經不是主要的議題，應該可以功成身退了！

這篇回顧文章，沒有討論到文字閱讀的議題，也沒有觸及雙語者腦傷後的復原情況，因為這些研究都已經有很好的回顧文獻。有興趣的讀者應該可以詳閱這幾方面的回顧文獻。總之，在現階段，對雙語處理的腦神經研究，確實是越來越被重視，因為雙語或多語學習，已經是全球化不可避免的趨勢了，加上數位學習方興未艾，研究者的未來方向，確實還有很多發展的空間。

引用文獻

- Abutalebi, Jubin. 2008. Neural aspects of second language representation and language control. *Acta Psychologica* 128.3:466–478.
- Abutalebi, Jubin, Stefano F. Cappa, & Daniela Parani. 2001. The bilingual brain as revealed by functional neuroimaging. *Bilingualism: Language and Cognition* 4.2:179–190.

- Abutalebi, Jubin, & David W. Green. 2007. Bilingual language production: The neurocognition of language representation and control. *Journal of Neurolinguistics* 20.3:242–275.
- Abutalebi, Jubin, Matteo Canini, Pasquale A. Della Rosa, Lo Ping Sheung, David W. Green, & Brendan S. Weekes. 2014. Bilingualism protects anterior temporal lobe integrity in aging. *Neurobiology of Aging* 35.9:2126–2133.
- Ahissar, Merav, Yedida Lubin, Hanna Putter-Katz, & Karen Banai. 2006. Dyslexia and the failure to form a perceptual anchor. *Nature Neuroscience* 9.12:1558–1564.
- Ameel, Eef, Gert Storms, Barbara C. Malt, & Steven A. Sloman. 2005. How bilinguals solve the naming problem. *Journal of Memory and Language* 53.1:60–80.
- Arbib, Michael A. 2012. *How the Brain Got Language: The Mirror System Hypothesis*. Oxford & New York: Oxford University Press.
- Archila-Suerte, Pilar, Jason Zevin, Aurora Isabel Ramos, & Arturo E. Hernandez. 2013. The neural basis of non-native speech perception in bilingual children. *NeuroImage* 67:51–63.
- Archila-Suerte, Pilar, Jason Zevin, & Arturo E. Hernandez. 2015. The effect of age of acquisition, socioeducational status, and proficiency on the neural processing of second language speech sounds. *Brain and Language* 141:35–49.
- Asher, James J., & Ramiro Garcia. 1969. The optimal age to learn a foreign language. *Modern Language Journal* 53.5:334–341.
- Bialystok, Ellen, & Kenji Hakuta. 1994. *In Other Words: The Science and Psychology of Second-Language Acquisition*. New York: Basic Books.
- Bialystok, Ellen, Fergus I. M. Craik, Raymond Klein, & Mythili Viswanathan. 2004. Bilingualism, aging, and cognitive control: evidence from the Simon task. *Psychology and Aging* 19.2:290–303.
- Bialystok, Ellen, Fergus I. M. Craik, & Jennifer Ryan. 2006. Executive control in a modified anti-saccade task: effects of aging and bilingualism. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition* 32.6:1341–1354.
- Bialystok, Ellen, Fergus I. M. Craik, & Gigi Luk. 2008. Cognitive control and lexical access in younger and older bilinguals. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition* 34.4:859–873.
- Bialystok, Ellen, Fergus I. M. Craik, David W. Green, & Tamar H. Gollan. 2009. Bilingual minds. *Psychological Science in the Public Interest* 10.3:89–129.
- Bialystok, Ellen, & Xiaojia Feng. 2009. Language proficiency and executive control in proactive interference: evidence from monolingual and bilingual children and adults. *Brain and Language* 109.2–3:93–100.
- Bialystok, Ellen, & Gregory J. Poarch. 2014. Language experience changes language and cognitive ability. *Zeitschrift für Erziehungswissenschaft* 17.3:433–446.

- Birdsong, David, & Michelle Molis. 2001. On the evidence for maturational constraints in second-language acquisition. *Journal of Memory and Language* 44.2:235–249.
- Boyke, Janina, Joanna Driemeyer, Christian Gaser, Christian Büchel, & Arne May. 2008. Training-induced brain structure changes in the elderly. *Journal of Neuroscience* 28.28:7031–7035.
- Brainard, Michael S., & Eric I. Knudsen. 1998. Sensitive periods for visual calibration of the auditory space map in the barn owl optic tectum. *Journal of Neuroscience* 18.10:3929–3942.
- Brainard, Michael S., & Allison J. Doupe. 2002. What songbirds teach us about learning. *Nature* 417:351–358.
- Brysbaert, Marc, & Wouter Duyck. 2010. Is it time to leave behind the revised hierarchical model of bilingual language processing after fifteen years of service? *Bilingualism: Language and Cognition* 13.3:359–371.
- Caffarra, Sendy, Nicola Molinaro, Doug Davidson, & Manuel Carreiras. 2015. Second language syntactic processing revealed through event-related potentials: an empirical review. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews* 51:31–47.
- Chee, Michael W. L., Chun Siong Soon, Hwee Ling Lee, & Christophe Pallier. 2004. Left insula activation: a marker for language attainment in bilinguals. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)* 101.42:15265–15270.
- Chen, Chien-Liang, Chao-Lin Liu, Chia-Ying Lee, Yu-Lin Tzeng, & Chia-Ju Chou. 2013. Linking statistics of betting behavior to difficulties of test items: an exploration. Paper presented at the 2013 Conference on Technologies and Applications of Artificial Intelligence (TAAI 2013), December 6–8, 2013. Taipei, Taiwan.
- Chen, Hsuan-Chih, & Yuen-Sum Leung. 1989. Patterns of lexical processing in a nonnative language. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition* 15.2:316–325.
- Christoffels, Ingrid K., Christine Firk, & Niels O. Schiller. 2007. Bilingual language control: an event-related brain potential study. *Brain Research* 1147:192–208.
- Costa, Albert, Mikel Santesteban, & Iva Ivanova. 2006. How do highly proficient bilinguals control their lexicalization process? Inhibitory and language specific selection mechanisms are both functional. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition* 32.5:1057–1074.
- Costa, Albert, Mireia Hernández, & Núria Sebastián-Gallés. 2008. Bilingualism aids conflict resolution: evidence from the ANT task. *Cognition* 106.1:59–86.
- Dapretto, Mirella, & Susan Y. Bookheimer. 1999. Form and content: dissociating syntax and semantics in sentence comprehension. *Neuron* 24.2:427–432.
- De Bruin, Angela, Barbara Treccani, & Sergio Della Sala. 2015. Cognitive advantage in bilingualism: an example of publication bias? *Psychological Science* 26.1:99–107.
- De Groot, Annette M. B. 1992. Bilingual lexical representation: a closer look at conceptual representations. *Orthography, Phonology, Morphology, and Meaning*, ed. by Ram Frost & Leonard Katz, 389–412. Amsterdam: North-Holland.

- De Groot, Annette M. B. 1993. Word-type effects in bilingual processing tasks: support for a mixed-representational system. *The Bilingual Lexicon*, ed. by Robert Schreuder & Bert Weltens, 27–51. Amsterdam & Philadelphia: John Benjamins.
- De Groot, Annette M. B. 2013. Bilingual memory. *The Psycholinguistics of Bilingualism*, ed. by François Grosjean & Ping Li, 171–191. Chichester: Wiley-Blackwell.
- Dehaene, Stanislas, Emmanuel Dupoux, Jacques Mehler, Laurent Cohen, Eraldo Paulesu, Daniela Perani, Pierre-François van de Moortele, Stéphane Lehéricy, & Denis Le Bihan. 1997. Anatomical variability in the cortical representation of first and second language. *NeuroReport* 8.17:3809–3815.
- Dehaene, Stanislas, Felipe Pegado, Lucia W. Braga, Paulo Ventura, Gilberto Nunes Filho, Antoinette Jobert, Ghislaine Dehaene-Lambertz, Regine Kolinsky, José Morais, & Laurent Cohen. 2010. How learning to read changes the cortical networks for vision and language. *Science* 330:1359–1364.
- DeKeyser, Robert M. 2000. The robustness of critical period effects in second language acquisition. *Studies in Second Language Acquisition* 22.4:499–533.
- DeKeyser, Robert M., Iris Alfi-Shabtay, & Dorit Ravid. 2010. Cross-linguistic evidence for the nature of age effects in second language acquisition. *Applied Psycholinguistics* 31.3:413–438.
- Dewaele, Jean-Marc. 2009. Individual differences in second language acquisition. *The New Handbook of Second Language Acquisition*, ed. by William C. Ritchie & Tej K. Bhatia, 623–646. Bingley: Emerald.
- Diamond, Adele. 2006. The early development of executive functions. *Lifespan Cognition: Mechanisms of Change*, ed. by Ellen Bialystok & Fergus I. M. Craik, 70–95. Oxford & New York: Oxford University Press.
- Dijkstra, Ton. 2005. Bilingual visual word recognition and lexical access. *Handbook of Bilingualism: Psycholinguistic Approaches*, ed. by Judith F. Kroll & Annette M. B. de Groot, 179–201. Oxford & New York: Oxford University Press.
- Dijkstra, Ton, Jonathan Grainger, & Walter J. B. van Heuven. 1999. Recognition of cognates and interlingual homographs: the neglected role of phonology. *Journal of Memory and Language* 41.4:496–518.
- Dong, Yanping, Shichun Gui, & Brian MacWhinney. 2005. Shared and separate meanings in the bilingual mental lexicon. *Bilingualism: Language and Cognition* 8.3:221–238.
- Draganski, Bogdan, Christian Gaser, Volker Busch, Gerhard Schuierer, Ulrich Bogdahn, & Arne May. 2004. Neuroplasticity: changes in grey matter induced by training. *Nature* 427:311–312.
- Driemeyer, Joanna, Janina Boyke, Christian Gaser, Christian Büchel, & Arne May. 2008. Changes in gray matter induced by learning-Revisited. *PLoS One* 3.7:e2669.
- Duñabeitia, Jon Andoni, Manuel Perea, & Manuel Carreiras. 2010a. Masked translation priming effects with highly proficient simultaneous bilinguals. *Experimental Psychology* 57.2:98–107.

- Duñabeitia, Jon Andoni, Maria Dimitropoulou, Oxel Uribe-Etxebarria, Itziar Laka, & Manuel Carreiras. 2010b. Electrophysiological correlates of the masked translation priming effect with highly proficient simultaneous bilinguals. *Brain Research* 1359:142–154.
- Eimas, Peter D., Einar R. Siqueland, Peter Jusczyk, & James Vigorito. 1971. Speech perception in infants. *Science* 171:303–306.
- Elmer, Stefan, Jürgen Hänggi, Martin Meyer, & Lutz Jäncke. 2011. Differential language expertise related to white matter architecture in regions subserving sensory-motor coupling, articulation, and interhemispheric transfer. *Human Brain Mapping* 32.12:2064–2074.
- Elmer, Stefan, Jürgen Hänggi, & Lutz Jäncke. 2014. Processing demands upon cognitive, linguistic, and articulatory functions promote grey matter plasticity in the adult multilingual brain: insights from simultaneous interpreters. *Cortex* 54:179–189.
- Embick, David, Alec Marantz, Yasushi Miyashita, Wayne O’Neil, & Kuniyoshi L. Sakai. 2000. A syntactic specialization for Broca’s area. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)* 97.11:6150–6154.
- Fiebach, Christian J, Angela D. Friederici, Karsten Müller, D. Yves von Cramon, & Arturo E. Hernandez. 2003. Distinct brain representations for early and late learned words. *NeuroImage* 19.4:1627–1637.
- Fisher, Simon E., & Gary F. Marcus. 2006. The eloquent ape: genes, brains and the evolution of language. *Nature Reviews Genetics* 7.1:9–20.
- Flege, James E. 1995. Second language speech learning: theory, findings, and problems. *Speech Perception and Linguistic Experience: Issues in Cross-Language Research*, ed. by Winifred Strange, 233–277. Baltimore: York Press.
- Flege, James E., Ian R. A. MacKay, & Diane Meador. 1999a. Native Italian speakers’ perception and production of English vowels. *Journal of the Acoustical Society of America* 106.5:2973–2987.
- Flege, James E., Grace H. Yeni-Komshian, & Serena Liu. 1999b. Age constraints on second-language acquisition. *Journal of Memory and Language* 41.1:78–104.
- Flege, James E., & Ian R. A. MacKay. 2004. Perceiving vowels in a second language. *Studies in Second Language Acquisition* 26.1:1–34.
- Flege, James E., David Birdsong, Ellen Bialystok, Molly Mack, Hyekyung Sung, & Kimiko Tsukada. 2006. Degree of foreign accent in English sentences produced by Korean children and adults. *Journal of Phonetics* 34.2:153–175.
- Friederici, Angela D., Bertram Opitz, & D. Yves von Cramon. 2000. Segregating semantic and syntactic aspects of processing in the human brain: an fMRI investigation of different word types. *Cerebral Cortex* 10.7:698–705.
- Friederici, Angela D., Manuela Friedrich, & Anne Christophe. 2007. Brain responses in 4-month-old infants are already language specific. *Current Biology* 17.14:1208–1211.

- Frost, Ram, Noam Siegelman, Alona Narkiss, & Liron Afek. 2013. What predicts successful literacy acquisition in a second language? *Psychological Science* 24.7:1243–1252.
- Ganschow, Leonore, Richard L. Sparks, & James Javorsky. 1998. Foreign language learning difficulties: an historical perspective. *Journal of Learning Disabilities* 31.3:248–258.
- Garbin, Gabriele, Ana Sanjuán, Cristina Forn, Juan Carlos Bustamante, Aina Rodríguez-Pujadas, Vicente Belloch, Mireia Hernández, Albert Costa, & César Ávila. 2010. Bridging language and attention: brain basis of the impact of bilingualism on cognitive control. *NeuroImage* 53.4: 1272–1278.
- Gold, Brian T., Chobok Kim, Nathan F. Johnson, Richard J. Kryscio, & Charles D. Smith. 2013. Lifelong bilingualism maintains neural efficiency for cognitive control in aging. *Journal of Neuroscience* 33.2:387–396.
- Graham, C. Ray, & R. Kirk Belnap. 1986. The acquisition of lexical boundaries in English by native speakers of Spanish. *International Review of Applied Linguistics* 24.1–4:275–286.
- Green, David W. 1998. Mental control of the bilingual lexico-semantic system. *Bilingualism: Language and Cognition* 1.2:67–81.
- Grogan, Alice, David W. Green, Nilufa Ali, Jenny T. Crinion, & Cathy J. Price. 2009. Structural correlates of semantic and phonemic fluency ability in first and second languages. *Cerebral Cortex* 19.11:2690–2698.
- Guion, Susan G. 2003. The vowel systems of Quichua-Spanish bilinguals: age of acquisition effects on the mutual influence of the first and second languages. *Phonetica* 60.2:98–128.
- Hashimoto, Ryuichiro, & Kuniyoshi L. Sakai. 2002. Specialization in the left prefrontal cortex for sentence comprehension. *Neuron* 35.3:589–597.
- Hernandez, Arturo E. 2013. *The Bilingual Brain*. Oxford & New York: Oxford University Press.
- Hernandez, Arturo E., Mirella Dapretto, John Mazziotta, & Susan Bookheimer. 2001. Language switching and language representation in Spanish-English bilinguals: an fMRI study. *NeuroImage* 14.2:510–520.
- Hernandez, Arturo E., & Gayane Meschyan. 2006. Executive function is necessary to enhance lexical processing in a less proficient L2: evidence from fMRI during picture naming. *Bilingualism: Language and Cognition* 9.2:177–188.
- Hernandez, Arturo E., & Ping Li. 2007. Age of acquisition: its neural and computational mechanisms. *Psychological Bulletin* 133.4:638–650.
- Hernández, Mireia, Albert Costa, Luis J. Fuentes, Ana B. Vivas, & Núria Sebastián-Gallés. 2010. The impact of bilingualism on the executive control and orienting networks of attention. *Bilingualism: Language and Cognition* 13.3:315–325.
- Hernández, Mireia, Clara D. Martin, Francisco Barceló, & Albert Costa. 2013. Where is the bilingual advantage in task-switching? *Journal of Memory and Language* 69.3:257–276.

- Hosoda, Chihiro, Kanji Tanaka, Tadashi Nariai, Manabu Honda, & Takashi Hanakawa. 2013. Dynamic neural network reorganization associated with second language vocabulary acquisition: a multimodal imaging study. *Journal of Neuroscience* 33.34:13663–13672.
- Huang, Wei-Jie, Ming Lo, Yu-Lin Tzeng, Chia-Ju Chou, Meng-Chen Lee, Han-Zhen Chiang, Yu-Sheng Chen, Chia-Ying Lee, & Chao-Lin Liu. 2012a. Hudongshi Zhongwen cihui youxi 互動式中文詞彙遊戲 [Interactive digital video game for learning Chinese lexicon]. System demonstrated at the 2012 Conference on Technologies and Applications of Artificial Intelligence (TAAI 2012), November 16–18, 2012. Tainan, Taiwan.
- Huang, Wei-Jie, Ming Lo, Yu-Lin Tzeng, Chia-Ju Chou, Chia-Ying Lee, & Chao-Lin Liu. 2012b. Hanzi xingti yu duyin lianjie zhi youxi yu kaifa pingtai 漢字形體與讀音鏈結之遊戲與開發平台 [Video game and authoring system for learning Chinese orthography-phonology mapping]. System demonstrated at the 2012 Conference on Technologies and Applications of Artificial Intelligence (TAAI 2012), November 16–18, 2012. Tainan, Taiwan.
- Hubel, David H., & Torsten N. Wiesel. 1963. Receptive fields of cells in striate cortex of very young, visually inexperienced kittens. *Journal of Neurophysiology* 26.6:994–1002.
- Ilg, Rüdiger, Afra M. Wohlschläger, Christian Gaser, Yasmin Liebau, Ruth Dauner, Andreas Wöller, Claus Zimmer, Josef Zihl, & Mark Mühlau. 2008. Gray matter increase induced by practice correlates with task-specific activation: a combined functional and morphometric magnetic resonance imaging study. *Journal of Neuroscience* 28.16:4210–4215.
- Jasinska, Kaja K., & Laura Ann Petitto. 2013. How age of bilingual exposure can change the neural systems for language in the developing brain: a functional near infrared spectroscopy investigation of syntactic processing in monolingual and bilingual children. *Developmental Cognitive Neuroscience* 6:87–101.
- Jarvis, Scott. 2003. Probing the effects of the L2 on the L1: a case study. *Effects of the Second Language on the First*, ed. by Vivian Cook, 81–102. Clevedon: Multilingual Matters.
- Jarvis, Scott, & Aneta Pavlenko. 2008. *Crosslinguistic Influence in Language and Cognition*. New York: Routledge.
- Johnson, Jacqueline S., & Elissa L. Newport. 1989. Critical period effects in second language learning: the influence of maturational state on the acquisition of English as a second language. *Cognitive Psychology* 21.1:60–99.
- Kim, Karl H. S., Norman R. Relkin, Kyoung-Min Lee, & Joy Hirsch. 1997. Distinct cortical areas associated with native and second languages. *Nature* 388:171–174.
- Knudsen, Eric I. 2004. Sensitive periods in the development of the brain and behavior. *Journal of Cognitive Neuroscience* 16.8:1412–1425.
- Koda, Keiko. 2007. Reading and language learning: crosslinguistic constraints on second language reading development. *Language Learning* 57.S1:1–44.

- Kroll, Judith F. 1993. Accessing conceptual representations for words in a second language. *The Bilingual Lexicon*, ed. by Robert Schreuder & Bert Weltens, 53–81. Amsterdam & Philadelphia: John Benjamins.
- Kroll, Judith F., & Janet Curley. 1988. Lexical memory in novice bilinguals: the role of concepts in retrieving second language words. *Practical Aspects of Memory: Current Research and Issues*, Vol. 2: *Clinical and Educational Implications*, ed. by Michael M. Gruneberg, Peter E. Morris & Robert N. Sykes, 389–395. Chichester: John Wiley & Sons.
- Kroll, Judith F., & Erika Stewart. 1994. Category interference in translation and picture naming: evidence for asymmetric connections between bilingual memory representations. *Journal of Memory and Language* 33.2:149–174.
- Kroll, Judith F., Susan C. Bobb, & Zofia Wodniecka. 2006. Language selectivity is the exception, not the rule: arguments against a fixed locus of language selection in bilingual speech. *Bilingualism: Language and Cognition* 9.2:119–135.
- Kroll, Judith F., & Jared A. Linch. 2007. Representation and skill in second language learners and proficient bilinguals. *Cognitive Aspects of Bilingualism*, ed. by István Kecskés & Liliana Albertazzi, 237–269. Dordrecht: Springer.
- Kroll, Judith F., Susan C. Bobb, Maya Misra, & Taomei Guo. 2008. Language selection in bilingual speech: evidence for inhibitory processes. *Acta Psychologica* 128.3:416–430.
- Kroll, Judith F., Janet G. van Hell, Natasha Tokowicz, & David W. Green. 2010. The revised hierarchical model: a critical review and assessment. *Bilingualism: Language and Cognition* 13.3:373–381.
- Kroll, Judith F., & Ellen Bialystok. 2013. Understanding the consequences of bilingualism for language processing and cognition. *Journal of Cognitive Psychology* 25.5:497–514.
- Kroll, Judith F., Susan C. Bobb, & Noriko Hoshino. 2014. Two languages in mind: bilingualism as a tool to investigate language, cognition, and the brain. *Current Directions in Psychological Science* 23.3:159–163.
- Kronenfeld, David B., James D. Armstrong, & Stan Wilmoth. 1985. Exploring the internal structure of linguistic categories: an extensionist semantic view. *Directions in Cognitive Anthropology*, ed. by Janet W. D. Dougherty, 91–110. Urbana: University of Illinois Press.
- Kwok, Veronica, Zhendong Niu, Paul Key, Ke Zhou, Lei Mo, Zhen Jin, Kwok-Fai So, & Li-Hai Tan. 2011. Learning new color names produces rapid increase in gray matter in the intact adult human cortex. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)* 108.16:6686–6688.
- Lagrou, Evelyne, Robert J. Hartsuiker, & Wouter Duyck. 2011. Knowledge of a second language influences auditory word recognition in the native language. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition* 37.4:952–965.

- Lagrou, Evelyne, Robert J. Hartsuiker, & Wouter Duyck. 2013. Interlingual lexical competition in a spoken sentence context: evidence from the visual world paradigm. *Psychonomic Bulletin & Review* 20.5:963–972.
- Lebrun, Yvan. 2002. Implicit competence and explicit knowledge. *Advances in the Neurolinguistics of Bilingualism*, ed. by Franco Fabbro, 299–313. Udine: Forum.
- Lee, Chia-Ying. 2013. Neural responses to the computer game-based orthographic training in children with developmental dyslexia. Paper presented at 2013 Symposium on L1 Reading Across Different Languages and L2 Literacy Acquisition, May 10–12, 2013. Taoyuan, Taiwan.
- Lee, Chia-Ying, Yu-Chen Huang, Yu-Lin Tzeng, Ming Lo, & Chao-Lin Liu. 2013. An interactive computer game to assist children in learning Chinese characters. Paper presented at the Twentieth Annual Meeting of Society for the Scientific Study of Reading, July 10–13, 2013. Hong Kong.
- Lee, HweeLing, Joseph T. Devlin, Clare Shakeshaft, Lauren H. Stewart, Amanda Brennan, Jen Glensman, Katherine Pitcher, Jenny Crinion, Andrea Mechelli, Richard S. J. Frackowiak, David W. Green, & Cathy J. Price. 2007. Anatomical traces of vocabulary acquisition in the adolescent brain. *Journal of Neuroscience* 27.5:1184–1189.
- Lee, Rose R.-W., Yao-Ting Sung, Kuo-En Chang, Ovid J.-L. Tzeng. 2013. Examining the efficiency of learning technology on game's task-specific and task-general effects from the perspective of cognitive neuroscience. *Journal of Neuroscience and Neuroengineering* 2.3:287–295.
- Lee, Rose R.-W., Kevin C.-H. Hsu, C.-I. Erica Su, S.-K. Lin, Denise H. Wu, & Ovid J.-L. Tzeng. 2014. Effects of practice on tonal discrimination for Chinese as a second language learner: an example of magnetic mismatch field. Poster presented at 2014 Annual Meeting of Cognitive Neuroscience Society, April 5–8, 2014. Boston, USA.
- Lenneberg, Eric H. 1967. *Biological Foundations of Language*. New York: Wiley.
- Levy, Benjamin J., Nathan D. McVeigh, Alejandra Marful, & Michael C. Anderson. 2007. Inhibiting your native language: the role of retrieval-induced forgetting during second-language acquisition. *Psychological Science* 18:29–34.
- Li, Ping, Jennifer Legault, & Kaitlyn A. Litcofsky. 2014. Neuroplasticity as a function of second language learning: anatomical changes in the human brain. *Cortex* 58:301–324.
- Liang, Lijuan, & Baoguo Chen. 2014. Processing morphologically complex words in second-language learners: the effect of proficiency. *Acta Psychologica* 150:69–79.
- Luk, Gigi, John A. E. Anderson, Fergus I. M. Craik, Cheryl L. Grady, & Ellen Bialystok. 2010. Distinct neural correlates for two types of inhibition in bilinguals: response inhibition versus interference suppression. *Brain and Cognition* 74.3:347–357.
- Luk, Gigi, Ellen Bialystok, Fergus I. M. Craik, & Cheryl L. Grady. 2011. Lifelong bilingualism maintains white matter integrity in older adults. *Journal of Neuroscience* 31.46:16808–16813.

- Luo, Lin, Gigi Luk, & Ellen Bialystok. 2010. Effect of language proficiency and executive control on verbal fluency performance in bilinguals. *Cognition* 114.1:29–41.
- Marian, Viorica, & Michael J. Spivey. 2003. Competing activation in bilingual language processing: within- and between-language competition. *Bilingualism: Language and Cognition* 6.2:97–115.
- Marian, Viorica, Michael J. Spivey, & Joy Hirsch. 2003. Shared and separate systems in bilingual language processing: converging evidence from eyetracking and brain imaging. *Brain and Language* 86.1:70–82.
- Mårtensson, Johan, Johan Eriksson, Nils Christian Bodammer, Magnus Lindgren, Mikael Johansson, Lars Nyberg, & Martin Lövdén. 2012. Growth of language-related brain areas after foreign language learning. *NeuroImage* 63.1:240–244.
- Martin, Clara D., Benjamin Dering, Enlli M. Thomas, & Guillaume Thierry. 2009. Brain potentials reveal semantic priming in both the ‘active’ and the ‘non-attended’ language of early bilinguals. *NeuroImage* 47.1:326–333.
- May, Arne, G. Hajak, S. Gänßbauer, T. Steffens, B. Langguth, T. Kleinjung, & P. Eichhammer. 2007. Structural brain alterations following 5 days of intervention: dynamic aspects of neuroplasticity. *Cerebral Cortex* 17.1:205–210.
- Maye, Jessica, Janet F. Werker, & LouAnn Gerken. 2002. Infant sensitivity to distributional information can affect phonetic discrimination. *Cognition* 82.3:B101–B111.
- McAllister, Robert, James E. Flege, & Thorsten Piske. 2002. The influence of L1 on the acquisition of Swedish quantity by native speakers of Spanish, English and Estonian. *Journal of Phonetics* 30.2:229–258.
- Mechelli, Adrea, Jenny T. Crinion, Uta Noppeney, John O’Doherty, John Ashburner, Richard S. Frankowiak, & Cathy J. Price. 2004. Structural plasticity in the bilingual brain: proficiency in a second language and age at acquisition affect grey-matter density. *Nature* 431:757.
- Mehler, Jacques, Peter Jusczyk, Ghislaine Lambertz, Nilofar Halsted, Josiane Bertoncini, & Claudine Amiel-Tison. 1988. A precursor of language acquisition in young infants. *Cognition* 29.2:143–178.
- Meuter, Renata F. I., & Alan Allport. 1999. Bilingual language switching in naming: asymmetrical costs of language selection. *Journal of Memory and Language* 40.1:25–40.
- Meschyan, Gayane, & Arturo E. Hernandez. 2002. Age of acquisition and word frequency: determinants of object-naming speed and accuracy. *Memory & Cognition* 30.2:262–269.
- Meschyan, Gayane, & Arturo E. Hernandez. 2006. Impact of language proficiency and orthographic transparency on bilingual word reading: an fMRI investigation. *NeuroImage* 29.4:1135–1140.
- Miyake, Akira, Naomi P. Friedman, Michael J. Emerson, Alexander H. Witzki, Amy Howerter, & Tor D. Wager. 2000. The unity and diversity of executive functions and their contributions to complex “frontal lobe” tasks: a latent variable analysis. *Cognitive Psychology* 41.1:49–100.
- Mueller, Pam A., & Daniel M. Oppenheimer. 2014. The pen is mightier than the keyboard advantages of longhand over laptop note taking. *Psychological Science* 25.6:1159–1168.

- Mohades, Seyede Ghazal, Esli Struys, Peter Van Schuerbeek, Katrien Mondt, Piet Van De Craen, & Robert Luypaert. 2012. DTI reveals structural differences in white matter tracts between bilingual and monolingual children. *Brain Research* 1435:72–80.
- Moreno, Sylvain, Ellen Bialystok, Zofia Wodniecka, & Claude Alain. 2010. Conflict resolution in sentence processing by bilinguals. *Journal of Neurolinguistics* 23.6:564–579.
- Myers, Chelsea A., Maaïke Vandermosten, Emily A. Farris, Roeland Hancock, Paul Gimenez, Jessica M. Black, Brandi Casto, Miroslav Drahos, Mandeep Tumber, Robert L. Hendren, Charles Hulme, & Fumiko Hoeft. 2014. White matter morphometric changes uniquely predict children’s reading acquisition. *Psychological Science* 25.10:1870–1883.
- Pakulak, Eric, & Helen J. Neville. 2011. Maturational constraints on the recruitment of early processes for syntactic processing. *Journal of Cognitive Neuroscience* 23.10:2752–2765.
- Paradis, Michel. 1994. Neurolinguistic aspects of implicit and explicit memory: implications for bilingualism. *Implicit and Explicit Learning of Second Languages*, ed. by Nick C. Ellis, 393–419. London: Academic Press.
- Pavlenko, Aneta. 1999. New approaches to concepts in bilingual memory. *Bilingualism: Language and Cognition* 2.3:209–230.
- Pavlenko, Aneta. 2009. Conceptual representation in bilingual lexicon and second language vocabulary learning. *The Bilingual Mental Lexicon: Interdisciplinary Approaches*, ed. by Aneta Pavlenko, 125–160. Clevedon: Multilingual Matters.
- Perani, Daniela, Jubin Abutalebi, Eraldo Paulesu, Simona Brambati, Paola Scifo, Stefano F. Cappa, & Ferruccio Fazio. 2003. The role of age of acquisition and language usage in early, high-proficient bilinguals: an fMRI study during verbal fluency. *Human Brain Mapping* 19.3:170–182.
- Petitto, Laura Ann, Melody Sue Berens, Ioulia Kovelman, Matthew H. Dubins, Kaja K. Jasinska, & Mark H. Shalinsky. 2012. The “Perceptual Wedge Hypothesis” as the basis for bilingual babies’ phonetic processing advantage: new insights from fNIRS brain imaging. *Brain and Language* 121.2:130–141.
- Philipp, Andrea M., & Iring Koch. 2009. Inhibition in language switching: What is inhibited when switching between languages in naming tasks? *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition* 35.5:1187–1195.
- Pinker, Steven. 1994. *The Language Instinct: How the Mind Creates Language*. New York: William Morrow and Co.
- Piske, Thorsten, Ian R. A. MacKay, & James E. Flege. 2001. Factors affecting degree of foreign accent in an L2: a review. *Journal of Phonetics* 29.2:191–215.
- Portin, Marja, Minna Lehtonen, Gabor Harrer, Erling Wande, Jussi Niemi, & Matti Laine. 2008. L1 effects on the processing of inflected nouns in L2. *Acta Psychologica* 128.3:452–465.
- Potter, Mary C., Kwok-Fai So, Barbara Von Eckardt, & Laurie B. Feldman. 1984. Lexical and conceptual representation in beginning and proficient bilinguals. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior* 23.1:23–38.

- Saffran, Jenny R. 2003. Statistical language learning: mechanisms and constraints. *Current Directions in Psychological Science* 12.4:110–114.
- Saffran, Jenny R., Richard N. Aslin, & Elissa L. Newport. 1996. Statistical learning by 8-month-old infants. *Science* 274:1926–1928.
- Saffran, Jenny R., & Diana P. Wilson. 2003. From syllables to syntax: multilevel statistical learning by 12-month-old infants. *Infancy* 4.2:273–284.
- Sakai, Kuniyoshi L. 2005. Language acquisition and brain development. *Science* 310:815–819.
- Sakai, Kuniyoshi L., Yasuki Noguchi, Tatsuya Takeuchi, & Eiju Watanabe. 2002. Selective priming of syntactic processing by event-related transcranial magnetic stimulation of Broca's area. *Neuron* 35.6:1177–1182.
- Sandoval, Tiffany C., Tamar H. Gollan, Victor S. Ferreira, & David P. Salmon. 2010. What causes the bilingual disadvantage in verbal fluency? The dual-task analogy. *Bilingualism: Language and Cognition* 13.2:231–252.
- Schlaggar, Bradley L., Timothy T. Brown, Heather M. Lugar, Kristina M. Visscher, Francis M. Miezin, & Steven E. Petersen. 2002. Functional neuroanatomical difference between adults and school-age children in the processing of single words. *Science* 296:1476–1479.
- Schlegel, Alexander A., Justin J. Rudelson, & Peter U. Tse. 2012. White matter structure changes as adults learn a second language. *Journal of Cognitive Neuroscience* 24.8:1664–1670.
- Schwartz, Ana I., Judith F. Kroll, & Michele Diaz. 2007. Reading words in Spanish and English: mapping orthography to phonology in two languages. *Language and Cognitive Processes* 22.1: 106–129.
- Sholl, Alexandra, Aruna Sankaranarayanan, & Judith F. Kroll. 1995. Transfer between picture naming and translation: a test of asymmetries in bilingual memory. *Psychological Science* 6.1:45–49.
- Singleton, David M., & Lisa Ryan. 2004. *Language Acquisition: The Age Factor* (2nd edition). Clevedon: Multilingual Matters.
- Sörqvist, Patrik, Anders Hurtig, Robert Ljung, & Jerker Rönnberg. 2014. High second-language proficiency protects against the effects of reverberation on listening comprehension. *Scandinavian Journal of Psychology* 55.2:91–96.
- Stein, Maria, Andrea Federspiel, Thomas Koenig, Miranka Wirth, Werner Strik, Roland Wiest, Daniel Brandeis, & Thomas Dierks. 2012. Structural plasticity in the language system related to increased second language proficiency. *Cortex* 48.4:458–465.
- Stepanova Sachs, Olga, & John D. Coley. 2006. Envy and jealousy in Russian and English: labeling and conceptualization of emotions by monolinguals and bilinguals. *Bilingual Minds: Emotional Experience, Expression, and Representation*, ed. by Aneta Pavlenko, 209–231. Clevedon: Multilingual Matters.
- Storm, Benjamin C., & Sean M. Stone. 2015. Saving-enhanced memory: the benefits of saving on the learning and remembering of new information. *Psychological Science* 26.2:182–188.

- Stromswold, Karin, David Caplan, Nathaniel Alpert, & Scott Rauch. 1996. Localization of syntactic comprehension by positron emission tomography. *Brain and Language* 52.3:452–473.
- Suzuki, Kei, & Kuniyoshi L. Sakai. 2003. An event-related fMRI study of explicit syntactic processing of normal/anomalous sentences in contrast to implicit syntactic processing. *Cerebral Cortex* 13.5:517–526.
- Thierry, Guillaume, & Yan-Jing Wu. 2007. Brain potentials reveal unconscious translation during foreign-language comprehension. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)* 104.30:12530–12535.
- Turk-Browne, Nicholas B., Justin A. Jungé, & Brain J. Scholl. 2005. The automaticity of visual statistical learning. *Journal of Experimental Psychology: General* 134.4:552–564.
- Tsukada, Kimiko, David Birdsong, Ellen Bialystok, Molly Mack, Hyekyung Sung, & James E. Flege. 2005. A developmental study of English vowel production and perception by native Korean adults and children. *Journal of Phonetics* 33.3:263–290.
- Tzeng, Ovid J. L., & Daisy L. Hung. 1999. Origin of cerebral lateralization of language. *Mind and Language: Collected Papers from 1995 International Workshop on Mind & Language*, ed. by Jih-Ching Ho, 1–85. Taipei: Institute of European and American Studies, Academia Sinica.
- Ullman, Michael T. 2001. A neurocognitive perspective on language: the declarative/procedural model. *Nature Reviews Neuroscience* 2.10:717–726.
- Van Hell, Janet G., & Annette M. B. de Groot. 1998. Conceptual representation in bilingual memory: effects of concreteness and cognate status in word association. *Bilingualism: Language and Cognition* 1.3:193–211.
- Wang, William S-Y. (王士元). 2006. Yuyan yanhua de tansuo 語言演化的探索 [An exploration of language evolution]. *On and Off Work: Festschrift in Honor of Professor Chin-Chuan Cheng on His 70th Birthday*, ed. by Raung-fu Chung, Hsien-Chin Liou, Jia-ling Hsu & Dah-an Ho, 9–32. Taipei: Institute of Linguistics, Academia Sinica.
- Wartenburger, Isabell, Hauke R. Heekeren, Jubin Abutalebi, Stefano F. Cappa, Arno Villringer, & Daniela Perani. 2003. Early setting of grammatical processing in the bilingual brain. *Neuron* 37.1:159–170.
- Weber-Fox, Christine M., & Helen J. Neville. 1996. Maturational constraints on functional specializations for language processing: ERP and behavioral evidence in bilingual speakers. *Journal of Cognitive Neuroscience* 8.3:231–256.
- Weinreich, Uriel. 1968. *Languages in Contact: Findings and Problems*. The Hague: Mouton.
- Wiesel, Torsten N., & David H. Hubel. 1963a. Effects of visual deprivation on morphology and physiology of cells in the cat's lateral geniculate body. *Journal of Neurophysiology* 26.6:978–993.
- Wiesel, Torsten N., & David H. Hubel. 1963b. Single-cell responses in striate cortex of kittens deprived of vision in one eye. *Journal of Neurophysiology* 26.6:1003–1017.

- Wong, Patrick C. M., Tyler K. Perrachione, & Todd B. Parrish. 2007. Neural characteristics of successful and less successful speech and word learning in adults. *Human Brain Mapping* 28.10:995–1006.
- Wong, Patrick C. M., Catherine M. Warrier, Virginia B. Penhune, Anil K. Roy, Abdulmalek Sadehh, Todd B. Parrish, & Robert J. Zatorre. 2008. Volume of left Herschel's Gyrus and linguistic pitch learning. *Cerebral Cortex* 18.4:828–836.
- Wodniecka, Zofia, Fergus I. M. Craik, Lin Luo, & Ellen Bialystok. 2010. Does bilingualism help memory? Competing effects of verbal ability and executive control. *International Journal of Bilingual Education and Bilingualism* 13.5:575–595.
- Wu, Denise H., E. H.-Y. Shih, Ram Frost, Jun-Ren Lee, Chia-Ying Lee, Jei-Li Tsai, Daisy L. Hung, & Ovid J.-L. Tzeng. 2012. Statistical learning of implicit regularity predicts acquisition of Chinese Literacy as a second language. Poster presented at the 53rd Annual Meeting of the Psychonomic Society, November 15–18, 2012. Minneapolis, MN, USA.
- Wu, Yan Jing, & Guillaume Thierry. 2010. Chinese-English bilinguals reading English hear Chinese. *Journal of Neuroscience* 30.22:7646–7651.
- Xiang, Huadong, Dan Dediu, Leah Roberts, Erik van Oort, David G. Norris, & Peter Hagoort. 2012. The structural connectivity underpinning language aptitude, working memory, and IQ in the perisylvian language network. *Language Learning* 62.S2:110–130.
- Yang, Jing, Kathleen Marie Gates, Peter Molenaar, & Ping Li. 2015. Neural changes underlying successful second language word learning: an fMRI study. *Journal of Neurolinguistics* 33:29–49.
- Yudes, Carolina, Pedro Macizo, & Teresa Bajo. 2010. Cognate effects in bilingual language comprehension tasks. *NeuroReport* 21.7:507–512.
- Zhao, Xiaowei, & Ping Li. 2006. A self-organizing connectionist model of bilingual lexical development. *Proceedings of the 28th Annual Conference of the Cognitive Science Society*, 2639. Mahwah: Lawrence Erlbaum Associates.
- Zou, Lijuan, Guosheng Ding, Jubin Abutalebi, Hua Shu, & Danling Peng. 2012. Structural plasticity of the left caudate in bimodal bilinguals. *Cortex* 48.9:1197–1206.

[Received 8 January 2015; revised 2 May 2015; accepted 10 May 2015]

Rose Ru-Whui Lee (corresponding author)

Institute of Linguistics

Academia Sinica

130, Sec. 2, Academia Road

Nankang, Taipei 115, Taiwan

roselee@gate.sinica.edu.tw

Neural Bilingualism: A New Look at an Old Problem

Rose R.-W. Lee^{1,2} and Ovid J.-L. Tzeng^{1,3}

*Academia Sinica*¹

*National Taiwan Normal University*²

*National Chiao Tung University*³

Our brain is an inherited survival system, the result of a relentless struggle to live, evolving and adapting to countless primordial challenges. As such, brain evolution can be viewed as a mirror image of the history of the species: language has evolved in as many diverse and complex forms as there have been historical and sociocultural settings. And now, here we are, in this digital age, where multiple languages co-existing in the same brain is (more often than not) the norm. Digitalization and globalization, furthermore, are driving a paradigm shift that relentlessly challenges us to keep pace with an ever accelerating life.

Recent research has shown that language acquisition is based upon an innate ability of statistical learning formed by evolution, an idea supported also by second language acquisition studies. Moreover, there is abundant evidence indicating that both long-term bilingual experience and second language learning results in effective structural as well as functional connectivity in the brain, due to neural plasticity. Evidence suggests that effective connectivity due to second language learning enhances the capacity for language processing and general executive control by reorganizing neural circuitries. By using non-invasive brain imaging technology, effective reorganization of structural and functional connection in the brains of successful second language learners has been shown in lots of recent studies, even when dealing with adult learners whose age was way past the so called critical period of language acquisition. It must be noted that age of acquisition is not the only critical factor responsible for successful second language performance; language proficiency, individual differences, and training paradigm also have to be considered.

Research in the last several decades shows us that the bilingual learner integrates two separate language-specific lexica into an effective bilingual lexicon. In this regard, neural imaging evidence shows that cross-language code-switching enhances inhibition control of the non-target language and also the ability to carry out code-switch executive control. As a result, throughout a bilingual lifespan, brain circuitries are being constantly rewired, giving an enhanced cognitive control advantage to the bilingual elderly.

What other effects can modern life have on the brain? Human interaction with emerging multisensory media and communication technology nowadays in the digital environment must affect the operations of our brains: our perception, cognition, memory, navigation, access, and executive control. The impact of digital-technological tools may well be changing the underlying mechanisms of bilingualism and learning.

Based on what we now know about “one brain for all languages”, both spoken and written, the old question of “When does lateralization begin?” has to be replaced with “When does lateralization stop (if ever)?” This new perspective can help us understand linguistic aspects of brain evolution and may even redefine the meaning and measurement of human intelligence in the future.

Key words: bilingualism, second language acquisition, age of acquisition (AoA), mental lexicon, effective connectivity, adaptive system