



# 腦電圖揪出的炫彩繽紛： 從歧義句看大腦處理自然語言的歷程

劉長萱、簡士承\*

「兩舟並行，櫓速不如帆快；八音齊奏，笛清怎比簫和。」

— 摘自《紀曉嵐全傳》

## 一、前言

文人雅士常藉著諧音、語義、或字義的相關，諷刺時事或抒發情感。一副語音雙關的對聯，上聯中「櫓速」指三國著名文臣魯肅，「帆快」指西漢著名武士樊噲，櫓不如帆，隱含的意思是說文不如武。下聯中「笛清」指北宋名將狄青，「簫和」指西漢宰相蕭何，也是一語雙關，一文一武，文勝於武。此副對聯利用諧音的特色，使詩句具有雙重的義涵。雙關語也時常出現在日常的溝通之中，有時是為了斯文或幽默而故意不說清楚；例如：「老先生戴了綠帽」，可暗指老先生的太太出軌了；「他投了個大麵包」，指他投了個籃外空心球。當同一個詞彙在句中有多種義涵，屬詞彙上的歧義 (lexical ambiguity)。但詞彙是否歧義，也和日常使用的習慣有密切的關係；上例中，多數人覺得「綠帽」隱含雙重意思，但並不覺得「投了個大麵包」有雙重的意思。中文的標點斷句有時也會造成理解的差異；例如「唯女子與小人為難養也」，若酌採標點符號，可解讀出完全相反的意思，如「唯女子與小人為難，養也」，此類句子屬句法上的歧義 (syntactic ambiguity)；嚴格地說，應是詞彙及句法同時歧義的句子。不論諧音、雙關詞、或句法分歧，造成解讀上歧義的情況，在中西方都普遍存在，此類語句統稱為「歧義句」。英文閱讀中，歧義的句子也十分常見；例如：“The Rabbi married my elder sister”，可指猶

\* 劉長萱，中央研究院統計科學研究所研究員；簡士承，中央研究院統計科學研究所研究助理。

太牧師替我姊姊證婚，或我姊姊和猶太牧師結婚，屬詞彙歧義；“The parking lot opens to members only on Thursdays”，可指停車場僅在週四開放，或僅開放給會員，屬句法歧義。當看到歧義句時，句子的解讀有極大的差異，我們一方面能立即注意到句子可能有多種涵義，另一方面還能適當的猜測文字想要表達的真正意思，甚至莞爾一笑。奇妙的是，以現今人工智慧技術也難達成的辨識效果，大腦卻是非常善於執行這種需要猜測及判斷的「模糊任務」呢！

理解一個完整句子的文法結構及語義，需整合幾個不同的認知系統，其中較重要的為記憶的提取、儲存，以及語音、語義、句法的整合。磁振造影研究文獻顯示，大腦額葉、顳葉、及前扣帶迴，甚至包括小腦，皆與長期記憶的提取有關；其中，左側額葉及顳葉特別負責詞彙的記憶提取，以及語義、句法的整合。但不同的研究也發現，這些掌管記憶提取及語義、句法整合的腦區，並非語言認知專屬；例如，左側額葉及顳葉的活化也出現在作業前受試者的「預備狀態」期。此外，語言相關的訊息如何在下皮質與上皮質之間傳輸？知覺相關的訊息如何與詞彙及句法整合？這些訊息傳遞的動態歷程無法單純由磁振造影研究完整地解答。相反地，腦電圖（electroencephalograms）時間解析度可達毫秒，從腦電圖上可擷取到不同認知歷程瞬時的特徵（temporal features）及對應的週頻律動（frequency oscillation）。腦電實驗研究文獻顯示，大腦平均辨識一個字的時間可迅速至 30 ~ 40 毫秒，且在具體或抽象字（例如：「衣」或「依」）呈現 40 ~ 100 毫秒之內，已能分辨該字的屬性。雖然處理中、英文的腦功能系統類似，但不同語系的瞬時特徵在振幅（amplitude）及存續期（duration）上有顯著的不同。中研院統計所腦電實驗室曾針對中、英文句法錯誤但語義仍清楚的語句進行腦電實驗，受試者只須判斷出現在螢幕上的語句是否「句法」正確。研究結果顯示，中、英文語句的辨識過程中，處理語音、語義和句法的週頻律動出現明顯的差異。英文語句在出現的早期（100 ~ 250 毫秒）引發明顯較強的低頻律動（low frequency oscillation），且分布在頂葉及枕葉的律動振幅較大。出現在早期的律動與刺激本身的物理特性較有關；例如字彙的形（orthography）及音（phonology）等。英文屬拼音文字，會引發較強的早期週頻律動，此現象與文獻中其他印歐語系（Indo-European languages）理解語句的歷程類似。而中文在晚期（350 ~ 650 毫秒）會引發明顯較強的低頻律動，且分布於左側顳葉部位的振



幅較大。出現在晚期的週頻律動與處理語義及句法理解的歷程有關；中文的句法結構不像英文有介詞、冠詞，讀者須根據上下文才能摸清楚詞彙及句子的真正意思，且不同讀者有不同的解讀方式，所以在處理中文語義及句法的理解時，會運用較多下皮質與上皮質之間訊息傳遞的資源。

大腦又是如何發現句子是否為歧義句呢？為了一探究竟，本研究延伸之前的研究內容，邀請了 40 位受試者（男、女各 20 人）參與中、英文歧義句辨識的腦電實驗，語句刺激包括詞彙及句法歧義的句子<sup>1</sup>。我們嘗試用三種不同的腦電圖分析方式找出一些大腦在處理歧義句辨識時所留下的蛛絲馬跡。在下節中，我們以簡單的方式介紹分析腦電圖不同面向的方法及如何詮釋分析結果，並說明不同面向在神經認知科學中的重要性。第三節說明歧義句辨識作業的實驗設計及腦電圖收集過程，並敘述不同方法的分析結果。最後，討論腦電實驗研究未來的展望。

## 二、腦電圖傳遞的權威訊息

公元 1924 年，德國精神科醫師 Hans Berger 成功地在人類頭皮上量測到腦電訊號，並命名為腦電圖或簡稱為 EEG；他發表於臨床精神醫學及生理學期刊的一系列文章中，已清楚地描述在專注及進行認知活動時健康人及前額受傷病人腦電圖的差異。當代腦電圖文獻中的  $\alpha$  及  $\beta$  週頻律動（每秒中振盪 8 ~ 12 次及 12 ~ 30 次），最早也是由 Berger 所刻劃及詮釋。腦電訊號直到 1934 年，才由兩位英國電生理學家 Edgar D. Adrian 及 Bryan H. C. Matthews 所驗證及確認。Berger 的學術貢獻直至 1937 年在巴黎舉行的心理學大會中才獲得國際肯定。在此之前，腦電圖的臨床應用已在美、英及法國等地醫院逐步展開。早期的應用主要藉由腦電圖追蹤及檢查癲癇及其他腦部疾病，但這些應用無法進一步了解神經訊息處理的機制。公元 1936 年，美國生理學家夫婦 Hallowell David 和 Pauline David 首度證實了藉由操弄外在事件，可記錄到腦電的事件相關電位（event related potentials, ERP）。1957 年二戰結束後，英國神經生理學家 William G. Walter 利用黏貼在頭皮上的電極，建立了第一臺腦電儀。Walter 團隊的研究開啟了當代事件相關電位的研究，除首度提出與大腦「預期機制」有關的伴隨性負變差（contingent negative variation），並發現

<sup>1</sup> 實驗用語句僅包括詞彙及句法歧義的語句，並不包括諧音的雙關詞彙。

與「光」刺激及睡眠有關的  $\delta$  及  $\theta$  律動，至此腦電圖的應用除了臨床睡眠、昏迷及腦死等診斷及作為腦瘤或中風的第一線判斷外，也成為神經認知及神經心理實驗研究中的重要數據。

腦電儀的設計係藉由黏貼在頭皮上的數個電極，把頭皮上小於萬分之一伏特的電壓變化傳送到放大器將訊號放大，並以每毫秒（即千分之一秒）一次的取樣頻率紀錄成腦電圖或時間序列資料。如同心電圖反應心臟跳動的狀況，腦電圖也反應著大腦內部神經元放電的狀態。相較於腦造影技術（例如磁振，正子、及單光子造影等），腦電圖的背景雜訊如眼動及身體移動對訊號偵測及分析易造成較顯著的負面影響。實驗研究為了降低背景雜訊的影響，以往多要求受試者重複數百次類似的試驗（trials），並將眾多受試者的腦電圖取平均值。受試者在執行數百次類似的作業中，早已失去對作業的新鮮感及專注性，反較容易增加眼動及身體移動的雜訊，更不利於事件相關電位的偵測。在背景雜訊的干擾下，對於神經認知及神經心理的實驗研究，腦電圖還能提供哪些權威訊息呢？近十年來腦電儀的設計已逐步改進，腦電圖分析的方法也大幅提升，例如異成分解析法（independent component analysis）已被證實，能有效的分離出與神經元活動無關的雜訊成分；此外，腦電圖在不同的週頻律動，也可藉先進的分析方法如小波（wavelets）轉換及自動化軟體如 EEGLab 等以圖形呈現，更方便應用的解讀。採新式的腦電儀硬體加上自動化分析軟體，腦電實驗的試驗數及人數可大幅降低；例如，統計所情緒辨識作業的腦電實驗中，僅要求每位受試者辨識 30 張人臉照片及 30 張人臉輪廓圖片，由於作業簡單且受試者專注性高，在「情緒表情照片」刺激呈現後初期 50 ~ 100 毫秒及晚期 300 ~ 400 毫秒，腦電圖可有效地鑑別亞斯伯格（Asperger's Syndrome）組及正常組（各 10 位），在事件相關電位及低頻律動呈現顯著的差異；但在「情緒表情輪廓圖片」刺激中，兩組受試者則無顯著的差異。此例子說明，雖然腦造影技術比腦電圖更能精準的掌握活化腦區的空間位置，但要在毫秒的精準度內了解大腦處理訊息的歷程，腦電圖的實驗研究法仍擁有無法取代的地位。

以下介紹三種常見的腦電圖面向、分析方法及如何詮釋分析結果：

### （一）事件相關電位

「事件（Event）」指的是單純的感官知覺刺激，例如一個影像或一個聲音的呈現，而「事件相關電位」或簡稱 ERP 是指刺激所引發的腦電反應；通常



這種反應是很固定的，也就是在同樣類型的刺激發生後的數十到數百毫秒內，從頭皮接收到的微弱電壓會出現起伏狀且趨勢一致。但由於腦電的雜訊也多，所以想要看到正確的相關電位，必須重複同樣的刺激，而後把每次刺激後的腦電訊號平均起來才能消滅雜訊的影響，且試驗次數越多，訊雜比（SNR）也越好。事件相關電位的計算方法是將平均的事件相關電位減去基準線（baseline）；基準線是在無感官知覺刺激的情況下平均的腦電圖，下節實驗設計中，將說明基準線選取的方式。事件相關電位的起伏狀說明腦神經網路處理訊息的不同階段或成分，常見的命名方法是用英文字母 P 或 N 搭配數字而成，P 代表相對於基準線振幅升高的正成分，N 代表相對於基準線振幅下降的負成分，數字則代表刺激呈現後的時間（以毫秒計），例如 P100 代表該成分在刺激呈現後，振幅升高的峰值點大約落在 100 毫秒，而 N170 則是落在 170 毫秒的下降負成分。實驗中我們會觀察相關電位的振幅、潛伏期（latency）、存續期、及頭皮上的分布區域（topography），是否隨著實驗操弄有所改變，進而歸納出該相關電位可能對應的神經認知功能。繼 Walter 團隊開啟了相關電位研究之後，科學家們陸續使用不同的刺激及實驗方式找出許多知覺及認知上重要的電位成分。例如 P100 出現在視覺皮質處的振幅最大，只和視覺刺激的基本屬性如對比、亮度或解析度等有關，算是早期的視覺歷程。N170 對於我們較常處理的視覺刺激有較強烈的反應；研究發現，相較於一般圖片的視覺刺激（例如身體、車子或動物的臉），人臉在兩側枕葉及顳葉會引發較強的 N170，在臨床病例中也發現這些腦區受傷的病患失去了辨視人臉的能力。

## （二）事件相關頻譜振盪

「律動」為一群神經元同步興奮（firing）所產生的現象，例如當受試者睜開眼時，腦後側的  $\alpha$  律動強度會降低；Berger 最早記錄的腦電圖也屬  $\alpha$  律動，所以  $\alpha$  律動又被稱為 Berger's wave。公元 1977 年 Gert Pfurtscheller 和 Alberto Aranibar 首先採「伴隨性負變差」的實驗發現  $\alpha$  律動在刺激出現後振幅減弱，並使用了「事件相關反同步化（event-related desynchronization, ERD）」這個專有名詞來描述  $\alpha$  在刺激事件發生後強度減弱的現象（也就是從同步狀態轉變成非同步狀態）。Pfurtscheller 多年後又提出「事件相關同步化（event-related synchronization, ERS）」的概念，描述律動的振幅強度在事件發生後由弱轉強的現象。腦電圖的研究仿照 ERD 及 ERS 的分析方式，探討  $\delta$ （1 ~ 4Hz）、 $\theta$

(4 ~ 8Hz)、 $\alpha$  (8 ~ 12Hz)、 $\beta$  (12 ~ 30Hz)、及  $\gamma$  (> 30Hz) 律動的強度變化及對應的神經生理及認知意義。事件相關頻譜振盪 (event-related spectral perturbation, ERS) 是延伸 ERD 及 ERS 的一種時頻分析方式，在分析上先透過小波轉換將每次試驗的訊號從一維 (時間) 轉換成時間及週頻的二維資料。二維資料依照基準線時的全頻帶振幅強度做正規化 (normalize) 處理之後，將所有試驗的二維資料平均起來，就得到了頻譜振盪時頻分析圖；此圖橫軸為時間 (以刺激發生時間為 0 秒)，縱軸為週頻 (例如 1 ~ 50Hz)，以及橫軸、縱軸所對應的振幅強度 (強度經  $\log_{10}$  轉換)。應用時習慣用顏色來呈現全頻帶振幅強度相對於基準線的變化；刺激呈現後若某頻帶強度增加 (ERS) 則該區以黃色或紅色表示，若強度降低 (ERD) 則以藍色表示。由於刺激事件的發生往往伴隨著不同頻帶強度出現先後增強或減弱的現象，因此相對於傳統的同步或反同步狀態的描述，ERSP 的時頻分析方式提供了更豐富的資訊，方便我們同時觀察不同週頻腦電圖的強弱變化以及其變化發生的時間先後順序。

神經生理學家將低頻的律動 ( $\delta$ 、 $\theta$ ) 視為下皮質與皮質聯絡的訊號；例如  $\delta$  與酬償系統 (reward system) 有關，認知心理研究常藉此觀察受試者執行作業時的動機； $\theta$  與邊緣系統 (limbic system) 尤其是掌管記憶的海馬迴 (hippocampus) 有關，工作記憶 (working memory) 相關的實驗多觀察出現在顳葉的  $\theta$  律動。而高頻的律動 ( $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ ) 被視為是新皮質 (neocortex) 的訊號，例如  $\alpha$  多出現在枕葉的視覺區，與受試者由下而上的注意力及預備狀態有關，也有研究認為高頻帶的  $\alpha$  與長期記憶有關； $\beta$  多出現在運動皮質及前額葉，與情緒、認知歷程及動作反應 (motor response) 有關； $\gamma$  則多出現在枕葉、頂葉及前額葉，為快速的訊息處理歷程，與知覺、感知運動整合及工作記憶或注意力皆有關聯。神經生理學家依據不同頻帶的同步或反同步律動「存續期」長短及振幅在頭皮上的分布狀況，推估知覺或認知歷程中神經元屬活化 (excitation) 或抑制 (inhibition) 狀態。但神經生理及心理文獻中，對高、低頻律動的解讀多為假設性的推論，有待更多實驗數據驗證。實驗研究解讀事件相關頻譜振盪反應時，仍需搭配腦電圖相關電位、行為資料及文獻中功能性磁振影像實驗中大、小腦活化部位等。

### (三) 功能性連結

上述相關電位及頻譜振盪兩種分析方式，雖已非常詳盡地運用各種瞬時特徵來描述腦電圖的律動變化，研究者可依照實驗操弄及實驗結果來推測大腦



某個區域在某個時間點，可能進行的知覺或認知歷程，但這種基於功能專門化（functional specialization）概念的分析方法，其實無法完整地捕捉到不同腦區之間互動的過程。由於各腦區並非獨立運作，功能性整合（functional integration）的概念認為大腦複雜的認知或決策功能，其實和腦區之間如何傳送資訊有關，因此腦區之間的功能性連結（functional connectivity）分析為探討認知歷程的一個重要環節，若搭配大腦內部結構性連結（structural connectivity）的研究，可更精確地解讀腦區之間的協同作用，以及腦區之間的連結如何隨時間變動來完成一個特定任務。連結分析是近幾年開始備受關注的研究方向，本節以相位鎖定量（phase-locking statistic, PLS）為例，說明功能性連結分析如何參與解讀腦電圖背後隱含的神經認知歷程。相位鎖定量是用來評估兩組訊號之間是否有相位同步（phase synchronization）狀況的一種實用可靠的方法，目前已常被用來分析大腦的功能性連結。頭皮上記錄的腦電圖是以律動或振盪方式表現出一群神經元同步興奮的強度，因此不同腦區的律動是否有關聯，可以從不同部位訊號之間的相位是否同步來推測，腦電圖振盪的相位就像是時鐘上的指針不斷地旋轉且時快時慢；所謂的相位同步，可以想像成兩處的時鐘雖然都忽快忽慢，但彼此時間差（即相位差）仍能維持不變，想必這兩處的時鐘之間存在著某種關聯性。相位鎖定量的值介於 0 和 1 之間，當兩組訊號的相位差不隨著時間改變，則相位鎖定量會非常接近 1，反之若兩組相位差變化很大，則相位鎖定量會非常接近 0。

相位鎖定量越高代表同步化現象越強，也就是兩組訊號存在某種功能性連結。公元 1999 年 Jean-Philippe Lachaux 等人首次採用侵入式電極（intracranial EEG）在病人海馬迴和前額葉記錄到  $\gamma$  律動（45Hz）的長距離同步反應，雖然在邊緣系統也發現短距離同步反應（約數公分範圍內），但他們認為短距離同步可能是傳導效應（volume conduction）造成，而長距離同步現象較可能反映出真正的大腦認知活動。為了觀察受試者執行歧義句判斷時的功能性連結，我們將作業中某時段的 PLS 和基準線的 PLS 相減，如此較容易看出該時段哪些電極的連結增強了或哪些減弱了，並把結果顯示在頭皮上，紅色代表 PLS 相較於基準值「連結增強」，而藍色則代表減弱。當然，在詮釋功能性連結的增減時仍要十分謹慎，因為從兩個電極間算出的相位鎖定量，只代表了電極訊號的同步現象，並無法排除兩訊號的連結變強是由同一群神經元活化所造成的可能性，因此在解讀時仍需參考其他資訊。功能性連結的分析結果可從

「短距離」及「長距離」連結兩個角度來觀察；短距離連結指單一腦區內的活化程度或連結度，通常偏重功能性的處理，而長距離連結指腦區之間的連結，可解讀為訊息的傳遞及整合。文獻中將左右腦之間的長距離連結視為訊息整合的指標，例如在前述情緒臉孔辨識的作業中，右腦偏重處理臉孔圖片的結構 (configural) 及情感 (affective) 成分，而左腦偏重語義分析 (analytical)，因此左右腦之間的連結有助於詮釋「情緒臉孔」屬高興、中性、或生氣等不同語義的類別。由於左右腦的訊息交換主要是通過胼胝體，臨床針對胼胝體後端腦傷的研究發現患者在語言處理上缺乏句法和韻律的整合能力，也就是當文字或句子的音節、語調、輕重音等韻律有錯誤時無法準確判斷。

### 三、中、英文歧義句的辨識歷程

此科技部計畫邀請國內語言學家參與設計中、英文歧義句<sup>2</sup>；語句經前測及認知訪談後，篩選辨識率較高的語句作為腦電實驗用刺激。中文歧義句 52 句 (句法歧義：29；詞彙歧義：13；句法及詞彙皆歧義：10) 及非歧義句 54 句，句子的字數介於 8 ~ 12 字；英文歧義句 52 句 (句法歧義：31；詞彙歧義：16；句法及詞彙皆歧義：5) 及非歧義句 54 句，句子的字數介於 5 ~ 9 字<sup>3</sup>。實驗研究邀請 40 位正常受試者 (男女各 20 位；平均年齡  $26.05 \pm 4.56$ )，參與歧義句辨識作業，同時記錄腦電圖及受試者行為資料，並對腦電訊號進行事件相關電位、頻譜振盪反應、及功能性連結分析。結果顯示，中文詞彙及句法同時歧義的語句，受試者較難辨識語義是否歧義且答對率較低；相反的，英文詞彙歧義的語句答對率較低，可能是本土受試者作業時受限於英文詞彙的量不足。圖一為受試者參與實驗的流程圖，由於多數受試者對歧義句判斷較生疏，所以在正式腦電實驗之前，受試者可練習中、英文歧義句辨識作業，練習過程中，答錯句子皆獲得正確答案提示。正式實驗時，則無正確答案提示。圖二為本實驗歧義句辨識作業說明，作業中每次螢幕上出現完整的句

<sup>2</sup> 本計畫中文歧義句前測 125 句及英文歧義句前測 207 句，由臺大語言所蘇以文教授及中研院語言所余文生研究員協助完成設計，兩位語言學家也是此科技部計畫的協同主持人；此外參與本計畫尚包括西伯利亞醫學科學院沙亞諾教授、中研院統計所謝日富先生、及政大商學院博士班李俊德先生。本文作者感謝蘇以文教授對初稿的指正及修改建議。

<sup>3</sup> 歧義句又可細分為不同的亞型；例如詞彙歧義可細分為同形異義 (homograph；摸魚) 或一詞多義 (polysemy；手足)，研究發現兩者分屬不同的認知歷程。本研究不同類別歧義句 ERP 在前額出現些微差異，但未達統計顯著。



子，且兩次試驗之間間歇時段取隨機4~7秒，以降低受試者的預期機制，事件相關電位及頻譜振盪使用的基準線係取「凝視點」呈現前間歇時段內平均的腦電圖。國內中、英文歧義句腦電實驗，多採單字（word-by-word）或單詞逐次呈現的方式（田義民，2003；楊惠筠，2009），每次螢幕上只出現一個字或詞。究竟該採單詞逐次或整句呈現，應視實驗研究的目的決定。中、英文詞彙或句法是否歧義需對照上、下文決定，此處仰賴詞彙轉句子的整合機制（word-to-text integration；Stafura & Perfetii, 2014），不同於詞彙之間的整合（word-to-word integration）；一般假設，詞彙轉句子的整合機制等同於句子轉文章的整合機制。

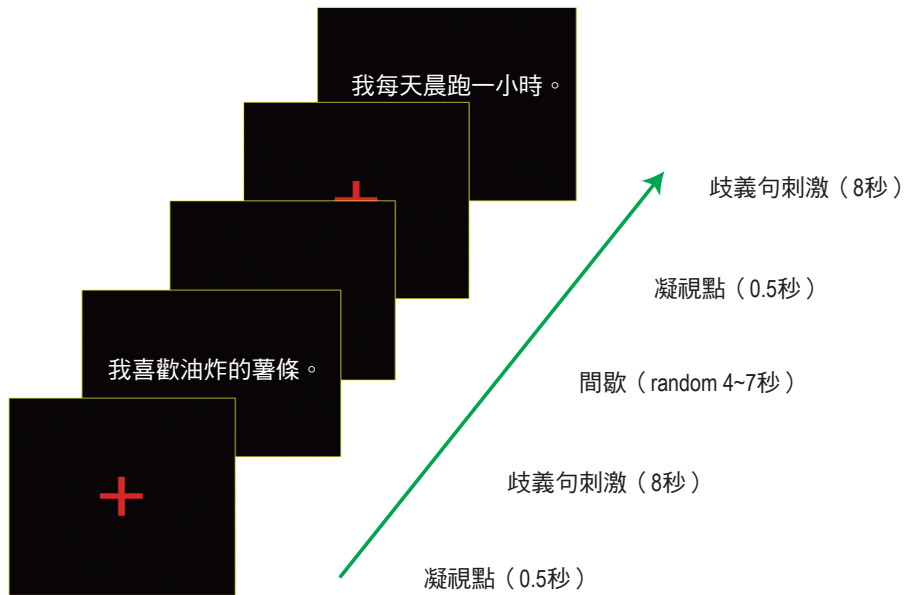
圖三為語句呈現後1,000毫秒內，歧義及非歧義句在左前額、左側邊及左後側電極區誘發的事件相關電位。中英文歧義和非歧義句在中區及後側的ERP十分相近，代表不同類語句的處理在視覺及運動系統中相似。圖中P100及N170和語句的物理特性有關，出現在後側接近頂葉、及枕葉部位的振幅較強，屬由下而上的機制。文獻中腦電研究顯示N170除了和臉部的情緒辨識有關之外，與早期的字彙處理也有關，例如字彙的形與音的辨識歷程會引發較強的N170，且文字所引發的N170比符號來的強，並常伴隨左側化（left laterization）的現象，不過這種側化現象在印歐語系的拼音文字語系較為明

### EKG實驗流程



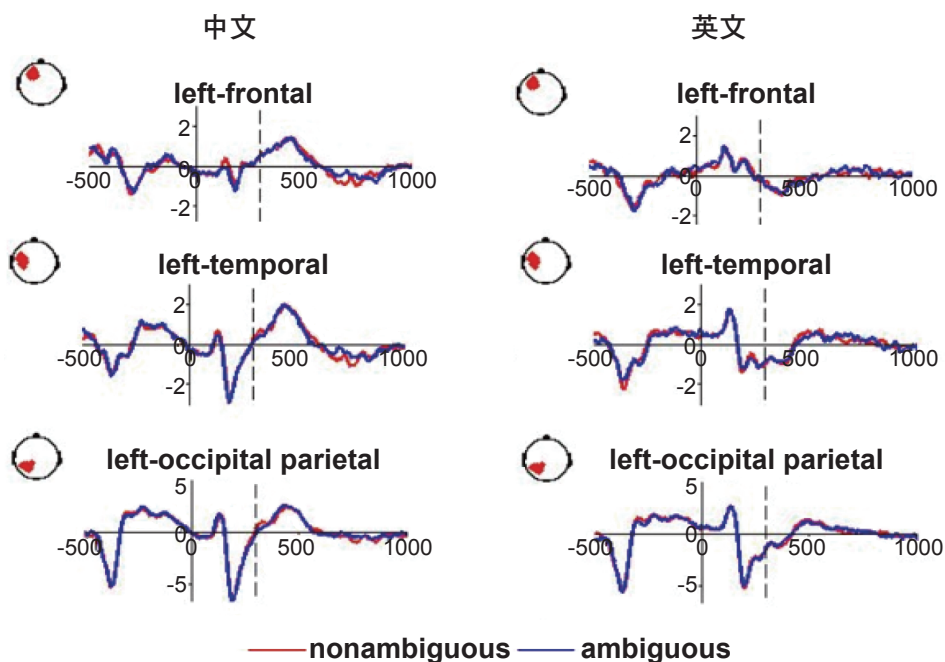
A → B → C

圖一 受試者參與實驗流程：(A) 施測者協助受試者填寫同意書並告知相關權利，以及填寫相關心理量表；(B) 施測者說明實驗流程；(C) 受試者進行實驗。實驗結束後，施測者會協助受試者清理頭部的導電膠，並領取受試者費及填寫收據



圖二 中、英文歧義句辨識作業說明：實驗前受試者先練習中、英文歧義句辨識作業；練習過程中，受試者判斷螢幕出現的語句屬「歧義句」或「非歧義句」，且按鍵後電腦螢幕會提示正確的答案；正式作業時則無提示。正式實驗中包含中文 106 句與英文 106 句刺激，且中、英文辨識作業分開來執行，有一半受試者先進行中文作業，另一半則先進行英文作業。圖中每個語句刺激最多呈現 8 秒鐘，受試者按鍵作答後，語句刺激即刻在螢幕消失；為避免受試者對下一個刺激有所準備，刺激間距 (ISI) 設為 4 至 7 秒隨機出現，接著出現 0.5 秒的凝視點，提醒受試者集中注意力

顯，對表意 (logographic) 文字系統的語言如中文較不明顯。圖三顯示中文的 N170 明顯較英文強，且左側的 N170 較右側稍強；由於英文對本土受試者為外語，辨識時難度較高，並未出現預期的左側化 N170。英文歧義及非歧義句明顯的在前額誘發較強的 P200，且詞彙及句法同時歧義的語句 P200 也較強。P200 被認為和高階認知及注意力有關，通常出現在前額處的振幅強度最為明顯，雖然其神經生理機制尚不明確，但一般認為與受試者比對「感覺刺激」及「內在預期」的知覺歷程有關。研究發現，當受試者看著句子中的文字依序呈現在螢幕上，若結尾字是一個容易預期的單字，在左側會引發較強的 P200，推測受試者在預測即將出現的文字時，左腦可能運用了由上而下的機制。中



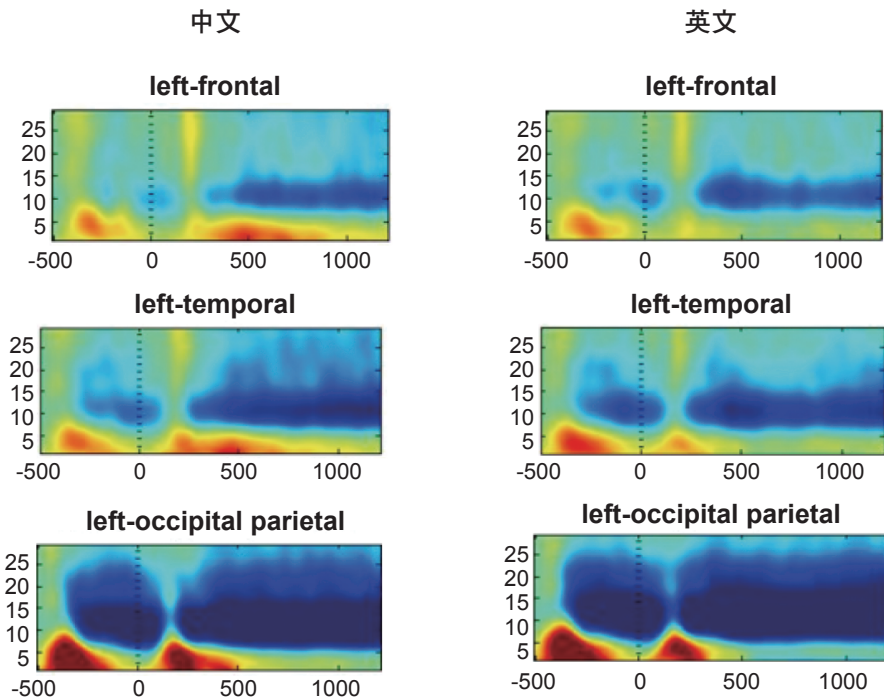
圖三 中、英文歧義、非歧義句在左前額、左側邊及左後側電極區誘發的事件相關電位（頭皮上的電極位置顯示在圖的左上方）。圖中縱軸為電位的強度（ $\mu V$ ），橫軸的時間單位為毫秒（凝視點出現為 -500 毫秒，語句出現的時間為 0 毫秒），垂直的虛線為刺激出現後 300 毫秒的位置。圖中的電位強度為減去基準值後的強度（基準值：-1200 至 -800 毫秒電位的平均）。中文語句刺激出現後約 170 毫秒，出現一個明顯的負向電位（N170），英文此負向電位不如中文明顯，但英文在前額有明顯的早期正向電位（P200）。英文在 300 毫秒後有個微弱的負向電位（N400），以及明顯的正向電位（P600）。中文 N400 較不明顯，但 P600 較英文強

文詞彙的相關實驗也發現，P200 與表音一致性（phonological consistency）有關，一致性越高振幅越小，且與聲旁結合度（orthographic combinability）產生交互作用（李佳穎，2009）。

本實驗的中文歧義句辨識作業中出現在中區及兩側電極區的 N400 較強，且右側的振幅較左側強（圖三中 N400 在左側不明顯）。中文詞彙及句法同時歧義的語句 N400 較明顯，但 P600 出現的時間較英文早，這合乎文獻中 P600 在母語中出現較早且振幅較強。英文作業中出現在左側的 N400 較中文明顯，但 P600 的振幅遠小於中文。腦電實驗研究若採前述單字或單詞逐次

呈現的方式，P600 的振幅會不如圖三中明顯。文獻中 N400 和詞彙、語義的處理相關，當受試者看到較不常見的字或假字 (pseudoword，例如 flom)，會出現較強的 N400，而同樣的文字出現次數越多則會降低 N400 的強度，所以 N400 可能對於「非預期」的文字特別有反應。研究也發現，當受試者看著英文字時，若此字有很多形音相近的鄰近字，也會引發出較強的 N400，例如 dime 的鄰近字有 time、mine、dine、dame、dome 等，較強的 N400 可能意味著在這個階段，和 dime 相關的記憶都會被使用到了。P600 和句子的結構及句法的辨認有關，研究顯示當受試者發現文法錯誤或結構較複雜的句字，或甚至聽到音樂中不諧調的旋律都會引發較強的 P600 成分。印歐語系包括英文在詞類、時態、詞格、單複數有豐富的變化，且在結構上有其相似性，語音及句法理解之間相互依賴；例如：“These kids are playing in the sun” 及 “These kid are playing in the sun”，兩句僅差一個 ‘s’，但第二個句子出現句法的錯誤。相反地，漢語等表意 (logographic) 語言系統中沒有如此複雜的形式區別，書寫的詞彙和語音之間各自獨立，但句法與語義卻無法完全分離。中文詞彙在句中扮演的角色並非全依賴外顯的句法，需視使用的情境，比對上、下文及其他非語言的因素。此外，中文字之間沒有間隔，受試者需將字整理成有意義的詞彙並理解句子的義涵。圖三顯示中文 N400 及 P600 幾乎結合在一起，且此實驗中女生在句法、語義兩個成分的結合度較男生更強。

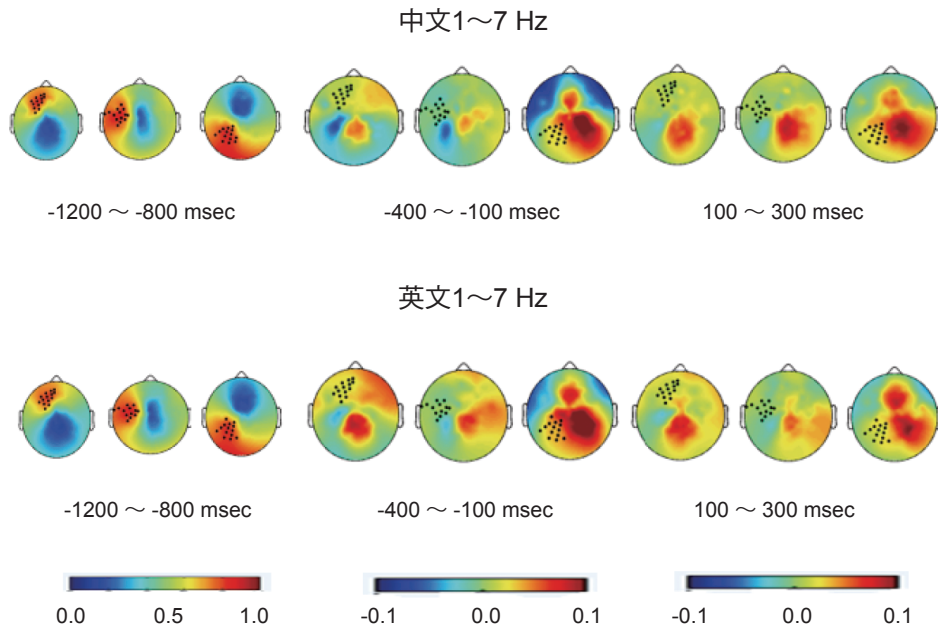
圖四為中、英文語句在左前額、左側邊及左後側電極區誘發的事件相關頻譜振盪反應。在刺激呈現後初期 100 ~ 300 毫秒，中、英文低頻 ( $\delta$ 、 $\theta$ ) 的同步化反應十分接近，但刺激呈現後的中期 400 ~ 600 毫秒及晚期 600 ~ 800 毫秒，中文的低頻反應明顯較英文強。中、英文語句高頻 ( $\alpha$ 、 $\beta$ ) 的反同步化反應較集中在中區及後側。中文出現在語義及句法有關的 400 ~ 600 毫秒振盪反應，主要來自於低頻，而英文在此時段的處理歷程主要來自於高頻 (尤其是  $\beta$  的反同步反應)。語言研究顯示，低頻律動和早期的文字或語音處理及字義的視、聽整合有關。早期瞬時的低頻同步化反應 (尤其是  $\theta$ ) 被視為工作記憶中海馬迴和皮質之間訊息的傳遞，和受試者編碼新資訊的能力成正相關。研究也建議低頻律動和非意識的 (non-conscious) 語言處理機制有關；早期瞬時較強的低頻同步化說明了對語句完整結構或對句中關鍵字快速反應。高頻的反同步化反應，代表皮質區快速的反應歷程，與受試者集中注意力執行辨識作業及語義及句法推理皆有關係。圖四的結果顯示，中文句的語



圖四 中、英文語句（歧義及非歧義句的平均）在左前額、左側邊及左後側電極區誘發的事件相關頻譜振盪。圖中縱軸為週頻（frequency），橫軸為時間，頻譜振盪在不同週頻的強度以顏色的深、淺表示；該強度為減去基準平均值後的強度，紅色為同步化反應，藍色為反同步化反應。中、英文在凝視點或刺激出現後，左後側出現低頻（1-7Hz）的同步化反應，此可能為下皮質處理知覺及工作記憶的歷程。約 200 毫秒後出現持續的高頻（8-25Hz）的反同步化反應，此可能為上皮質處理注意力及記憶提取的歷程。中文在左側邊及前額有較強的低頻同步化反應，英文雖較不明顯，但在高頻的反同步化反應較強

義及句法理解需要較多下皮質的資源，且低頻同步化反應出現在左前額及左側邊接近額葉及顳葉部位所延續的時間較久（包括語句呈現後早期、中期及晚期）。受試者在處理英文語義及句法時，除語句呈現的早期外，使用較多推理及長期記憶的資源，且在後側頂葉及枕葉部位的高頻反同步化（尤其是 $\beta$ ）反應較中文強。

圖五為採相位鎖定量估計「低頻」的功能性連結，圖中僅顯示左前額、左側邊及左後側分布的電極與其他區域的連結。在基準線時段，各電極區內部的連結較強，且中、英文作業的連結強度相似。圖四中凝視點出現後，英



圖五 中、英文語句（歧義及非歧義句的平均）在左前額、左側邊及左後側電極區與其他電極區的功能性連結。圖中 -1200 ~ -800 毫秒為左半邊電極區與其他電極區的連結強度（0 ~ 1），連結越強顏色越接近紅色，反之，越接近藍色；左前額及左後側的電極和自己鄰近的電極區有較強的連結，左側邊則和右側邊電極區有較強的連結（淡綠色），此連結反映受試者的預備狀態（readiness）。凝視點出現後的 100 毫秒（-400 ~ -100msec），英文作業中左前額、左側邊電極區與頂部（parietal）電極區出現較強的連結，中文作業則不明顯；中文在語句出現後 100 毫秒（100 ~ 300msec），左側邊與頂部的連結增強

文的低頻同步化反應在左前額及左側邊皆較中文強；圖五顯示凝視點出現後的時段，英文語句引發較強的左、右顳葉連結，以及左、右額葉與頂葉的連結，但語句出現後的初期時段，中文前額與頂葉的連結較英文強。額葉與頂葉（frontal-parietal）的連結與由上而下（top-down）的自主性注意力有關。傳統語言相關的兩個腦區為 Broca 和 Wernicke 區，分別位於左前額葉及左顳葉，這些左側化區域的連結和句法處理有關，而兩側的額葉及顳葉連結則和語義處理有關；一般認為在語言處理的過程中，左側連結負責文字、片語等的句法結構處理，右側負責發音等韻律處理。但是最近的臨床結構性連結研究發現，前額與顳葉及前額與頂葉的連結無法預測早產兒成長後是否會出現語言



障礙；相反的，與胼胝體後端及前聯合（anterior commissure）部位的神經纖維束有關的左、右顳葉連結，可以成功的預測早產兒未來是否出現語言障礙（Northam et al., 2012）。受試者在英文語句作業中，提早出現自主性注意力並啟動左、右顳葉的連結；但在語句出現後不同電極區之間的長距離連結反較中文語句作業弱。提早出現自主性注意力，是否與受試者焦慮有關尚待後續的實驗驗證。

#### 四、結語

語言學家透過對相關電位的研究，逐漸描繪出語言處理的神經認知歷程。例如 Angela D. Friederici (2011) 將句子的理解整理成三個階段：(1) 單純從文字分類的資訊建立初期片語結構，這個階段非常自動化，和語義及句法較無關，主要負責的腦區包括左側顳葉延伸到左前額葉。(2) 建立句子主詞、動詞、受詞之間的關係，並衍生詞類在句子中的意義，和這階段相關的 ERP 成分有 300 ~ 450 毫秒出現在左前側的負成分 (left anterior negativity, LAN) 或分布在左、右兩側的 N400；文獻中 LAN 及 N400 出現的時間重疊，但是否為相同的成分仍有爭議，有待後續的研究驗證。(3) 最後為解讀句子的階段，將語義與句法的資訊做整合或重整，並且和真實世界的知識做聯結 (mapping with world knowledge)，這兩部分若出現困難則會反映在 P600 的振幅。中、英文歧義句辨識作業的腦電實驗，初步驗證此自然語言處理的神經認知歷程。事件相關電位顯示英文作業的 P100、N170、P200、N400 及 P600 等成分，在振幅及存續期皆和中文作業不同；事件相關的頻譜振盪分析圖及相位鎖定量提供了 ERP 成分以外的資訊。頻譜振盪顯示，受試者在中文作業中運用較多自然語言的自動化系統，但在英文作業中依賴高階的推理及長期記憶，此結果有可能是英文為外語且歧義句辨識難度高。凝視點呈現後相位鎖定量顯示，受試者在英文作業中可能出現高焦慮，使得後續的 ERP 成分皆受到影響，所以在詮釋中、英文差異時，應同時考量焦慮的因素。另外，在較複雜的認知作業中，實驗過程常遇到一些突發狀況，例如亞斯伯格受試者在執行作業中常轉身與施測者討論實驗刺激的合理性，嚴重影響了腦電圖的紀錄。但圖三、四及五中，語句呈現後短短 1 秒內的腦電圖，已展現出大腦運作的多元面貌，也就是 1 秒的情緒臉孔辨識腦電圖，可清楚的鑑別亞斯伯格及正常受試者；因此，若僅需分析實驗刺激呈現後 1 秒的腦電圖，則實驗

結果並不受 1 秒後受試者可能出現的行為限制。此例子說明腦電圖在臨床及認知研究的豐厚潛力。此外，腦電實驗的空間要求條件低，中研院統計所大部分腦電實驗在普通辦公室內完成，腦電圖訊號經過前處理去除雜訊後，呈現穩定的事件相關成分。臨床及認知領域有豐富的實驗研究題材，腦電儀提供一個探討大腦運作輕便且有效的工具。

## 參考文獻

- 田意民 (2003)。《庭園幽徑中的風吹草動：以中文歧義句探討腦神經對句法處理的動態本質》，國立中正大學心理研究所博士論文。
- 李佳穎 (2009)。〈中文識字的認知與神經基礎〉，*Journal of Basic Education*, 18, 63-85。
- 楊惠筠 (2009)。《臺灣大學生閱讀英文歧義句所產生的認知效應》，淡江大學英文學系博士論文。
- Friederici, A. D. (2011). The brain basis of language processing: From structure to function. *Physiological Review*, 91, 1357-1392.
- Northam, G. B., Liegeois, F., Tournier, J. D., Croft, L. J., Johns, P. N., Chong, W. K., Wyatt, J. S. & Baldeweg, T. (2012). Interhemispheric temporal lobe connectivity predicts language impairment in adolescents born preterm. *Brain*, 135, 3781-3798.
- Stafura, J. Z. & Perfetti, C. A. (2014). Word-to-text integration: message level and lexical level influences in ERPs. *Neuropsychologia*, 64, 41-53.