

數理資優大腦白質網路結構分析之研究*

郭靜姿

國立臺灣師範大學
特殊教育學系

陳學志

國立臺灣師範大學
教育心理與輔導學系
國立臺灣師範大學
學習科學跨國頂尖研究中心

梁庚辰

國立臺灣師範大學
心理學系

高淑芬

國立臺灣師範大學醫學院附設醫院
精神醫學部

吳清麟

國立臺灣師範大學
學習科學學士學位學程
國立臺灣師範大學
學習科學跨國頂尖研究中心

近期研究已普遍指出數理資優個體的大腦結構與常人不同。然而，多數研究較著重於認知功能與單一大腦區域的運作之關係。本研究首從圖形理論取向探討數理資優、智力與大腦白質網路結構之關係。參與者為 42 位神經功能正常的成年男性，數理資優與一般成人各 21 人，其年齡分別為年齡為 21.00 ± 1.67 歲及年齡為 21.48 ± 2.29 歲。研究者採用魏氏成人智力測驗第三版評估個體智商，並進行擴散張量影像掃描，再依此建構大腦白質網路，使用圖形理論計算大腦網路屬性及各節點之連結效率。結果發現，數理資優組在大腦局部區域內節點之間的傳遞效率較佳，並以左側額上回尤甚。進一步控制數理資優與一般組的智力均等，數理資優組在大腦局部區域內的節點訊息傳輸效率仍占有優勢，並以涉及空間處理能力的左側枕上回群聚程度最佳。其後，分別分析數理資優與一般組在智力與大腦網路拓撲屬性之相關結果指出，僅一般成人作業智力與大腦網路全局效率為正相關，數理資優成人的智力與大腦網路連結則無直接關聯。上述結果不僅提供數理資優與常人在大腦白質結構差異情形的實徵證據，更從大腦拓撲網路之取向區辨數理資優、數理能力以及智力之異同，將可做為往後評估資賦優異的參考。

關鍵詞：智力、圖形理論、數理資優、擴散張量影像

- * 1. 本篇論文通訊作者：吳清麟，通訊方式：chilin570@ntnu.edu.tw。
2. 本研究承蒙科技部（MOST 100-2511-S-003-055-MY3）贊助經費，感謝台灣心智科學腦造影中心和國立政治大學提供技術諮詢和儀器操作；同時感謝由教育部高教深耕計畫經費補助成立之國立臺灣師範大學學習科學跨國頂尖研究中心的支持。

數理資優為臺灣目前各資賦優異類型之大宗（郭靜姿等人，2012a），其心理特質與生理結構長期受到關注（郭靜姿等人，2012b；Kuo, Liang, Tseng, & Gau, 2014），藉以探究數理資優在認知功能或大腦運作與一般人不同之處。數理資優意指兼具資賦優異及高數理能力的個體（Leikin, Waisman & Leikin, 2013）。資賦優異為其智力潛能優於同齡的常人，即智商高於母群體平均數兩個標準差。數學能力則涉及廣泛的認知技能，包括空間知覺、視覺處理、注意力、工作記憶以及問題解決等能力（Berg, 2008; Davidson & Sternberg, 2003; Hoard, Geary, Byrd-Craven, & Nugent, 2008; Leikin, Koichu, & Berman, 2009; Meyer, Salimpoor, Wu, Geary, & Menon, 2010; Taub, Floyd, Keith, & McGrew, 2008）。兼備上述兩種才能，數理能力優異個體普遍具備廣泛知識且能夠靈活應用，並擁有良好的後設認知及自我調節能力（Jung, Grazioplene, Caprihan, Chavez & Haier, 2010; Shore & Kanevsky, 1993）。同時，他們具有極佳流體智力、執行功能及心像能力（Desco et al., 2011; Lee et al., 2006; Singh & O'Boyle, 2004），願意投入較多時間分析問題本質，並在清楚陳述及歸類問題後，採取創新且有效方式解決問題（Geake & Hansen, 2005; O'Boyle et al., 2005）。

數理資優的大腦結構與運作有別於常人（郭靜姿等人，2012a；Kuo, Lin, & Wang, 2015）。功能性腦影像研究結果發現，數理能力優異個體從事三維心像旋轉作業或推理作業時，在雙側頂葉（parietal lobe）、額葉（frontal lobe）及前扣帶回（anterior cingulate cortices）等區域具有較大活化（Desco et al., 2011; O'Boyle et al., 2005; Prescott, Gavrilescu, Cunnington, O'Boyle & Egan, 2010; Zhang, Gan, & Wang, 2015）。另一方面，結構性腦影像研究亦獲得一致性發現，數理資優個體在額葉與基底節（basal ganglia）之間及胼胝體（corpus callosum）大腦白質皆具有較佳連結效率，顯示他們的大腦左右半球之間有較多交互作用，上述區域與流體智力、視覺空間記憶皆有關（Navas-Sanchez et al., 2014）。除此之外，數理資優個體在楔前葉（precuneus）、梭狀回（fusiform gyrus）、中央前回（precentral gyrus）、顳上與顳下回（superior and inferior temporal gyri）的灰質密度亦皆高於平均智力一般組（郭靜姿等人，2012a）。由此可知，特定領域資賦優異個體除了在智力及領域特定能力具有顯著優勢，其與常人的差異亦反映在大腦結構，如：白質結構（Navas-Sanchez et al., 2014）、灰質密度（郭靜姿等人，2012a）。

數理資優同時具有資賦優異與高數學能力兩種特質（Leikin et al., 2013），過去以數理資優為對象的腦影像研究卻多將這兩種變項一併視之（Desco et al., 2011; Navas-Sanchez et al., 2014; O'Boyle et al., 2005; Prescott et al., 2010; Zhang et al., 2015），致使相關研究結果未能明確指稱大腦功能與這兩種屬性分別對應關係。是此，研究者先分別回顧數學能力及智力的腦神經文獻。

首先，以數學能力為主題的大腦研究已有豐富成果，並指出不同向度的數學技能與不同區域的大腦運作有關。舉例而言，個體從事四則運算時，額下回（inferior frontal gyrus）、尾狀核（caudate nucleus）、額-頂葉、顳-頂葉、角回（angular gyrus）（Ischebeck, Zamarian, Egger, Schocke, & Delazer, 2007）、及中央前回、左前與左後顳上回（superior temporal gyrus）、枕上與枕中回（superior and middle occipital gyri）等區域皆有顯著活化（Zhou et al., 2007）。除此之外，個體心算能力亦與頂葉（Hanakawa, Honda, Okada, Fukuyama, & Shibasaki, 2003）、左角回（Grabner et al., 2007）、顳葉與枕葉（Schmithorst & Brown, 2004）功能有關；代數問題的計算涉及前額葉以及頂葉的協同運作（Danker & Anderson, 2007）。

再則，智力與問題解決能力息息相關。頂額整合理論（Parieto-Frontal Integration Theory, P-FIT）歸納出大腦在推理及問題解決歷程中，額葉、頂葉、部份顳葉與扣帶回等區域之運作會有一系列的交互作用（Jung & Haier, 2007）。實徵研究分析個體智力測驗分數與其大腦結構之關聯性，發現大腦灰質區域同質性（Regional Homogeneity）與常人智力呈現正相關，尤其在雙側頂下葉（inferior parietal lobes）、海馬旁回（parahippocampal gyrus）、顳上回、右側視丘（thalamus）、額上回（superior frontal gyrus, SFG）、梭狀回以及左側頂上葉（superior parietal lobe）（Wang, Song, Jiang, Zhang, & Yu, 2011）。其他結構性腦影像研究發現智力與大腦的灰質密度、體積及皮質厚度皆為正相關（Li et al., 2009; Narr et al., 2007; Wilke, Sohn, Byars, & Holland, 2003）。其中，左前小腦、左小腦、兩側眼眶額葉皮質（orbitofrontal cortex）、視丘、扣帶回（cingulate gyrus）及楔前葉的灰質密度與智力呈現正相關（Frangou, Chitins, & Williams, 2004），前額葉的灰質體積亦與智力顯著正相關（Reiss, Abrams, Singer, Ross, & Denckla, 1996）。然而，目前探討大腦結構與智力之關聯的研究對象大多僅限於一

般組或夾雜常人與數理資優個體，尚未單獨針對數理能力優異群體進行分析。因此，對於高數學能力者而言，其大腦結構與智力之關係是否異與常人，值得進一步檢視。

有別於過去研究探討單一大腦部位的認知功能，大腦同時亦可被視為一個各區域交互連結的網路，擴散張量影像 (diffusion tensor imaging, DTI) 可檢視大腦組織中水分子的擴散情形，提供水分子平均擴散狀態、擴散非等向性程度及擴散的主要方向等訊息。同時，配合神經纖維追蹤法 (tractography) 得以建立由大腦組織結構與神經纖維交織的結構性腦影像 (Achard, Salvador, Whitcher, Suckling, & Bullmore, 2006; Gong et al., 2009; Hagmann et al., 2008; Sporns, Chialvo, Kaiser, & Hilgetag, 2004; van den Heuvel, Stam, Boersma, & Hulshoff Pol, 2008)。擴散張量影像研究發現個體智力與溝通左右半腦之胼胝體的神經訊息傳輸強度呈現正相關，顯示智力與大腦兩半球協同運作之效率為正相關 (Navas-Sanchez et al., 2014)。近年來，研究者採用圖形理論 (Graph theory) 分析，依據大腦各區域之間的擴散非等向性程度與纖維束數目，建構由大腦白質所組成的網路結構 (Bullmore & Sporns, 2009; He, Chen, Gong, & Evans, 2009)，並透過群聚係數 (clustering coefficient, Cp) 以及特徵路徑長度 (characteristic path length, Lp) 等拓撲屬性分別說明由大腦各節點建構的網路整體及局部的連結密集程度與資料傳遞效率，藉此表徵大腦各區域的神經連結情形。圖形理論是用以探討節點與連結各節點的邊所形成的圖形，藉此研究節點與節點、及一群節點構成的區域與另一群節點群聚的區域之間的關係。應用在大腦網路結構，可據此綜觀性瞭解大腦整體與局部區域的連結效率 (Wu, Zhong, Chan, Chen, He, 2018; Wu, Zhong, Chen, 2016)。後續研究以此探討個體智力與大腦網路結構之相關屬性的連結，發現智力與大腦網路的最短路徑長度呈現負相關，意即任兩個大腦區域之間行經路線愈少，其智力相對愈高，顯示大腦區域之間的連結效率與個體智力呈現正相關 (van den Heuvel, Stam, Kahn, & Hulshoff Pol, 2009)，進一步指出額葉與頂葉之間的連結尤為重要，間接支持頂額整合理論 (Jung & Haier, 2007) 所述。

綜合上述文獻，可知目前有關數理資優、數理能力及智力的腦神經研究已有相當豐碩的成果 (Danker & Anderson, 2007; Hanakawa et al., 2003; van den Heuvel et al., 2009; Zhou et al., 2007)。然而，多數研究分別探討認知功能與大腦區域的運作之關係，從大腦白質網路結構取向同時探討上述三項特質的實徵研究卻相對鮮少。職此，本研究旨在探討數理資優、智力與大腦白質網路結構之關聯性，首由圖形理論取向分析數理資優組與一般人在大腦網路連結效率之差異以瞭解數理資優組的大腦網路結構是否不同於常人。緊接著，比較智力配對的數理資優組與一般組在大腦網路各屬性之差異以探討數理能力與大腦白質網路之關係。最後，各別分析數理資優組與一般人在大腦網路連結效率與智力之相關，藉此瞭解大腦網路結構與智力的關係在不同樣本之異同。根據文獻回顧，本研究假設數理資優組的大腦白質網路結構之連結情形不同於一般組，而其智力與大腦白質網路連結效率之相關亦與一般組有所不同。

方法

一、研究參與者

42 位神經功能正常的成年男性自願參與本研究，其年齡介於 18 至 24 歲。其中，數理資優 21 位，年齡為 21.00 ± 1.67 歲，皆曾在國、高中時期通過各縣市政府舉辦的甄選，並於數理資優班就讀；一般組 21 人，年齡為 21.48 ± 2.29 歲，本研究控制兩組參與者年齡無顯著差異，並確保一般組學生過去並無就讀或報考數理資優班的相關經驗。本研究在台北醫學大學研究倫理委員會審查核准下執行。所有參與者在實驗進行前 24 小時內皆無飲用任何酒精飲品，並在瞭解研究內容及填寫知情同意書之後方才進行研究。

二、研究工具

(一) 魏氏成人智力測驗第三版 (WAIS-III)

魏氏成人智力測驗中文版係由陳榮華、陳心怡 (2002) 翻譯而成。適用於 16 至 84 歲的受測者。本測驗包括語文量表與作業量表，共 14 個分測驗。語文量表包含詞彙、類同、算術、記憶廣度、常識、理解、數一字序列；作業量表包括圖畫補充、數符替代、圖形設計、矩陣推理、連環圖系、符號尋找、物型配置。其中，數一字序列、符號尋找、物型配置為替代測驗。本測驗的折半信度介於 .89 至 .98，時距 2 至 11 週的重測信度為 .86 至 .97。以魏氏成人智力測驗修訂版 (WAIS-R) 為效標作業之同時效度介於 .86 至 .94。本測驗建置臺灣地區的全量表智商、語文智商及作業智商常模以供參照。施測時間約 90 至 120 分鐘。

(二) 磁振造影掃描

本研究的腦影像掃描在國立政治大學台灣心智科學腦造影中心進行。該中心儀器為西門子 3T 高磁場磁振造影儀器，搭配 32 通道頭部線圈。腦影像矢狀切面為前連合 (anterior commissure) 至後連合 (posterior commissure) 的平面定位。每張切面均擷取 64 個不共線擴散梯度方向之擴散權重影像與一個無擴散權重之參考影像 (null image, $b = 0$)，以及 192 張 T1 加權高解析度結構影像。擴散張量影像掃描的參數設定：TR = 8900 ms, TE = 94 ms, Number of Direction = 64, b -value = 1000 s/mm^2 , matrix size = 96×96 , FOV = 192 mm, slice number = 50, thickness = 2 mm, spatial resolution = $2 \times 2 \times 2 \text{ mm}^3$; T1 掃描參數設定為：TR = 2530 ms, TE = 3.30 ms, FA = 7° , matrix size = 256×256 , FOV = 256 mm, slice number = 192, thickness = 1 mm, spatial resolution = $1 \times 1 \times 1 \text{ mm}^3$ 。

三、研究程序

本研究採用紙筆型式實施智力測驗。實驗開始前，主試者說明實驗目的以及作業內容，並請參與者簽署知情同意書。先進行智力測驗，再掃描大腦影像。

首先，研究者實施魏氏智力測驗 14 個分測驗，作答時間約 90 至 120 分鐘。在行為作業結束後，讓參與者先休息 5 分鐘，再進行結構性影像與擴散張量影像掃描，掃描時間約 20 分鐘。

四、資料處理與分析

(一) 心理特質分析

研究者整理參與者在魏氏智力測驗各項分數，包括：語文理解、知覺組織、工作記憶、處理速度、作業智商、語文智商、以及全量表智商之描述統計，並以獨立樣本 t 檢定分析組別之間的差異。

(二) 大腦白質網路連結分析

在腦影像資料分析部份，依序進行影像前置處理、白質網路建構、網路屬性分析、統計分析。首先，影像資訊前置處理作業包括：抽離頭骨及其他非腦物質的影像 (Leemans & Jones, 2009)；針對參與者頭部移動與掃描失真的偏差進行校正與重整，透過建立影像中各像素之擴散張量，計算出其特徵向量 (eigenvector) 以及特徵值 (eigenvalue)，並計算出部分非等向性指標 (fractional anisotropy, FA)。研究者使用 PANDA (pipeline tool for diffusion MRI) (Cui, Zhong, Xu, He, & Gong, 2013) 進行所有影像資訊的前置處理，此軟體運用 FMRIB (Functional Magnetic Resonance Imaging of the Brain)、Software Library (FSL) (Smith et al., 2004)、Pipeline System for Octave and Matlab (PSOM) (Bellec et al., 2012)、MRICron (<http://www.mccauslandcenter.sc.edu/micro/mricron/>) 及 Diffusion Toolkit (Wang, Benner, Sorensen, & Wedeen, 2007) 等相關工具。

緊接著，本研究使用 PANDA 建構 AAL (Automated Anatomical Labeling) 大腦網路，研究者參照 AAL 大腦網路圖 (Tzourio-Mazoyer et al., 2002)，將大腦分為 90 個區塊 (左右各半，且不包括小腦)，每個區塊皆被視為網路中的節點。網路建置方式係參考過去研究 (Gong et al., 2009; Wu et al., 2016)，先將 T1 加權影像透過非線性地方式標準化於 MNI (Montreal Neurological Institute) 空間，再將每位參與者的非等向性影像共置於各自 T1 加權影像，最後，將上述兩個步驟所得影像應用於由所有參與者的原始空間灰質區域建置圖像 (atlas) 之中。除此之外，網路節點之間的連線採用神經纖維追蹤演算法 (fiber assignment continuous tracking, FACT) 計算各個區域之間連接的纖維束束之情形，判斷兩區域是否具有連結的規準包括纖維旋轉角度需低於 45 度以及纖維部分非等向性指標大於 0.2，若兩個腦區間有三條符合上述規準的相互連接纖維束，則可視為網路節點之間存在連線 (Bai et al., 2012)，依此建立 90×90 的二元網路。

本研究採用圖形理論計算大腦網路全局與局部的連結效率以及整體網路的小世界屬性。評估網路效率的指標包括：群聚係數 (clustering coefficient)、最短路徑長度 (path length)、標準化群聚係數 (normalized Cp, λ)、標準化路徑長度 (normalized Lp, γ)、小世界屬性 (small-worldness, ζ)、局部效率 (local efficiency)、全局效率 (global efficiency)。本研究採用北京師範大學開發的大腦網路連結分析軟體 GREYNA (graph theoretical network analysis toolbox) (Wang et al., 2015) 分析圖形理論指標，各指標的意涵與計算方式詳述如下：

1. 群聚係數 (Clustering coefficient, Cp) 為評估網路局部區域內節點密集程度的參數，表示某一節點與其鄰點之間相互比鄰的可能性。群聚係數等於該節點所有鄰近節點之間實際連接數與其可能的最大連結邊數之比值。在本研究，群聚係數愈高，表示大腦局部區域 (如：額葉、顳葉)

內的各節點之間具有較高的連結效率。其公式為：
$$C_i = \frac{2e_i}{k_i(k_i - 1)} = \frac{\sum_{j,m} a_{ij} a_{im} a_{mj}}{k_i(k_i - 1)}$$

2. 特徵路徑長度 (Characteristic path length, Lp) 為網路中某節點的訊息傳遞到另一節點之最佳路線，經由最短路徑可迅速傳輸資訊以節省系統資源。兩個節點之間經過最少其它節點的路線即為兩點最短路徑。在本研究，任兩節點之間的路徑長度愈短，意指大腦跨區域 (如：額葉至頂葉) 的資訊傳輸效率愈佳。其計算公式為網路中任意兩個節點之間的最短路徑長度之平均值：

$$L_p = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i,j \in V, i \neq j} l_{ij}$$

3. 小世界屬性 (small-worldness, ζ)，小世界概念由 Watts 與 Strogatz (1998) 所提倡，認為若網路節點之間的傳輸具有最短路徑長度以及最佳群聚係數，則可將此網路稱之為小世界網路。其判斷規準為 $\zeta = \frac{\gamma}{\lambda} > 1$ ，其中， γ 為標準化群聚係數，即真實網路與隨機網路的群聚係數之比值

($\frac{C_{\text{Preal}}}{C_{\text{Prandom}}}$)， λ 為標準化路徑長度，意即真實網路與隨機網路的路徑長度之比值 ($\frac{L_{\text{Preal}}}{L_{\text{Prandom}}}$)，當 λ 大於 1，且 γ 近似於 1 的情況，則 ζ 將大於 1，即愈具有小世界屬性。且 ζ 愈大的網路其小世界屬性愈強。

4. 局部效率 (local efficiency, E_{loc}) 為群聚係數概念之延伸，學者改良了群聚係數只能考量與該節點直接連結鄰點的問題，將其擴充為計算該節點鄰近區域的連結情形，而網路的局部效率則為網路中所有節點局部效率的平均，其計算公式為 $E_{\text{loc}} = \frac{1}{N} \sum_{i \in G} E_{\text{glob}}(G_i)$ ， G_i 係節點 i 鄰點構成的次網路，數值愈高表示局部區域的連結效率愈佳。

5. 全局效率 (global efficiency, E_{glob}) 為以整個網路的觀點檢視節點之間傳輸效能，其為計算網路中所有節點的路徑長度之調和平均數所得 (Latora & Marchiori, 2001)，計算公式為

$$E_{\text{glob}} = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j \in G} \frac{1}{L_{ij}}$$

(三) 統計分析

本研究將進行四項統計分析探討數理資優、數理能力、智力與大腦白質網路拓撲屬性之關聯性。首先，採用獨立樣本 T 檢定分析數理資優組與一般組在年齡與各項智力測驗分數之差異；其

次，採用共變數分析，在排除年齡的影響後，比較數理資優組與一般組在大腦網路各指標之差異以區分數理資優與一般人的大腦各區域相互連結情形之異同。緊接著，從既有樣本隨機挑選智力配對的數理資優與一般組，由於兩組智力分數應具顯著差異，故先根據全量表智商挑選數理資優組較低者及一般組較高者進行配對，若遇上全量表智商相同，則根據作業智商、語文智商挑選，並以獨立樣本 T 檢定確認兩組樣本在智力分數上同質。再以年齡為控制變項，採用共變數分析比較兩組在大腦網路各指標之差異，藉此知悉數理能力與大腦網路連結之關係。最後，分別針對兩組參與者，以年齡為控制變項，分析全量表智商、作業智商、語文智商分別與大腦網路屬性之淨相關係數，藉以瞭解智力與腦網路連結效率之關聯性是否在不同群體中有所差異。

結果

一、數理資優組與一般組在智商與年齡之差異

兩組參與者的年齡及智力測驗各向度分數之差異分析結果如表 1 所示。結果指出，兩組參與者年齡並無顯著差異 [$t(40) = -0.77, p = .447, d = -0.24$]。再則，數理資優組在語文理解 ($t = 3.09, p = .004, d = 0.98$)、知覺組織 ($t = 3.40, p = .002, d = 1.08$)、工作記憶 ($t = 3.91, p < .001, d = 1.24$)、處理速度 ($t = 2.36, p = .023, d = 0.75$)、語文智商 ($t = 5.73, p < .001, d = 1.81$)、作業智商 ($t = 3.02, p = .004, d = 0.95$)、全量表智商 ($t = 5.50, p < .001, d = 1.74$) 等向度皆顯著優於一般組，其中以語文智商的差異最大，全量表智商次之。在分測驗方面，則以工作記憶的差異最大，知覺組織次之。上述結果顯示數理資優組具有較佳的智力潛能。

表 1 數理資優與控制組在年齡及智力測驗得分之差異分析摘要表

	數理資優 ($N = 21$)		普通組 ($N = 21$)		t	p	Cohen's d
	Mean	SD	Mean	SD			
年齡	21.00	1.67	21.48	2.29	-0.77	.447	-0.24
語文理解	126.71	6.17	119.90	8.00	3.09	.004	0.98
知覺組織	124.43	10.29	113.33	10.84	3.40	.002	1.08
工作記憶	122.62	10.32	110.76	9.28	3.91	< .001	1.24
處理速度	120.67	11.11	110.86	15.42	2.36	.023	0.75
語文智商	129.14	6.51	117.29	6.89	5.73	< .001	1.81
作業智商	123.90	9.55	114.24	11.15	3.02	.004	0.95
全量表智商	129.00	6.78	117.14	7.19	5.50	< .001	1.74

二、數理資優組與一般組在網路屬性與節點連結效率之差異

研究者分別比較數理資優組與一般組在整體網路屬性及各節點連結效率之差異情形。首先，在腦網路圖形理論指標方面，在排除年齡的影響後，數理資優組在平均群聚係數 [$F(1, 41) = 10.79, p < .001, \eta^2 = 0.22$]、平均局部效率 [$F(1, 41) = 6.29, p = .02, \eta^2 = 0.14$]、標準化群聚係數 [$F(1, 41) = 4.36, p = .04, \eta^2 = 0.10$]、標準化路徑長度 [$F(1, 41) = 5.51, p = .02, \eta^2 = 0.12$] 皆顯著高於一般組，顯示數理資優組大腦網路的連結，在局部區域內具有較佳的傳遞效率，但在跨區域之間訊息傳輸需要行經較長的路徑，其傳輸效率則不及一般組。結果如表 2 所示。

另一方面，我們進一步分析兩組參與者在 90 個節點 AAL 大腦網路各節點的群聚係數之差異。結果發現，僅在左側額上回，數理資優組的群聚係數顯著高於一般組 [$F(1, 41) = 8.89, p = .005, \eta^2 = 0.19$]，顯示數理資優組的左側前額葉與鄰近大腦區域之連結較為緊密，結果如圖 1 所示。

表 2 數理資優與一般組在大腦白質網路屬性之描述統計及共變數分析結果

	數理資優 (N = 21)			普通組 (N = 21)			F	p	η^2
	Mean	SD	adj. M	Mean	SD	adj. M			
平均群聚係數	0.41	0.02	0.42	0.40	0.01	0.40	10.79	.002	0.22
平均最短路徑長度	1.99	0.08	1.99	1.96	0.05	1.96	1.25	.270	0.03
平均局部效率	0.58	0.02	0.58	0.57	0.01	0.57	6.29	.016	0.14
全局效率	0.32	0.01	0.32	0.33	0.01	0.33	1.52	.225	0.04
標準化群聚係數	3.86	0.30	3.86	3.69	0.18	3.70	4.36	.043	0.10
標準化路徑長度	0.95	0.02	0.95	0.94	0.01	0.94	5.51	.024	0.12
小世界屬性	3.26	0.20	3.25	3.16	0.15	3.17	2.54	.119	0.06

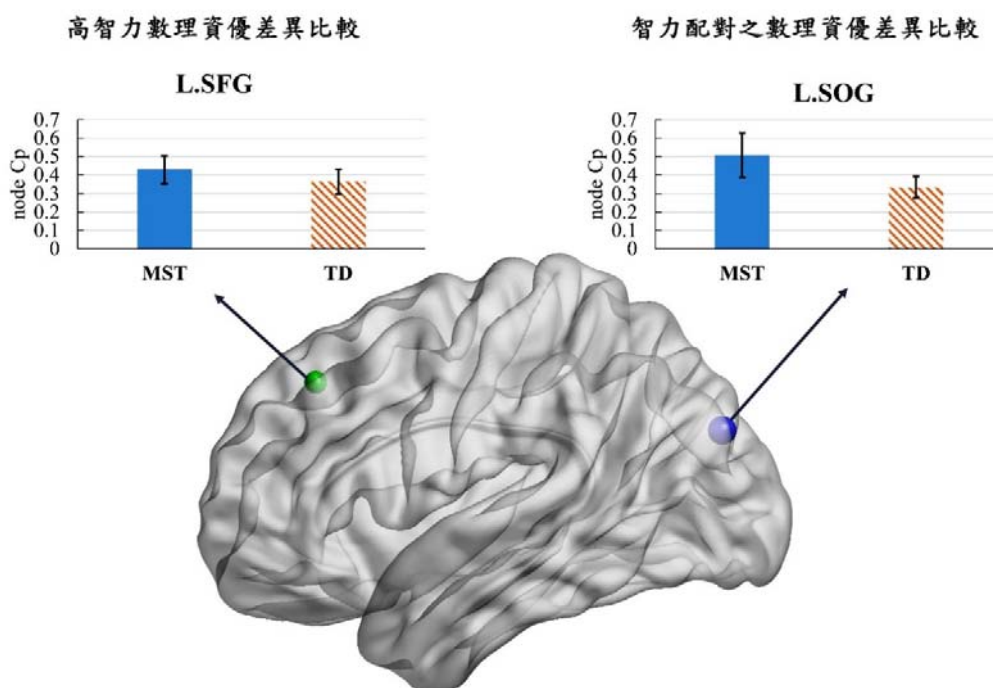


圖 1 數理資優與一般組在節點群聚係數之差異分析結果

三、智力配對的數理資優組與一般組在網路屬性與節點連結效率之差異

為了進一步瞭解數理能力與大腦網路連結之關係，我們從既有的研究參與者挑選智力相互配對的數理資優組 (FIQ = 122.70, VIQ = 124.10, PIQ = 117.00) 與一般組 (FIQ = 122.40, VIQ = 123.20, PIQ = 117.50) 各 10 人，並使用獨立樣本 *t* 檢定確保兩組在智力分數皆無顯著差異 ($ts < 0.38$, $ps > .705$, $ds < 0.18$)。

研究者同樣分別比較智力配對的數理資優組與一般組在整體網路屬性及各節點連結效率之差異情形。兩組在大腦網路屬性之描述統計資訊詳如表 3。結果指出，數理資優組在平均群聚係數 [$F(1, 19) = 10.29$, $p = .005$, $\eta^2 = 0.37$] 及平均局部效率 [$F(1, 19) = 4.92$, $p = .04$, $\eta^2 = 0.22$] 顯著高於一般組，顯示在智力相同情況，數理能力較佳的數理資優組在大腦局部區域連結效率顯著優於一般組。

在節點的群聚係數方面，僅在左側枕上回 (superior occipital gyrus, SOG)，數理資優組具有較佳表現 [$F(1, 19) = 16.11, p = .001, \eta^2 = 0.49$]，顯示配對智力的數理資優組較一般組在左側枕上回與鄰近大腦區域有較緊密之連結，詳如圖 1 所述。

表 3 智力配對的數理資優與一般組在大腦白質網路屬性之描述性統計摘要表

	數理資優 ($N = 10$)			普通組 ($N = 10$)			F	p	η^2
	Mean	SD	adj. M	Mean	SD	adj. M			
平均群聚係數	0.42	0.02	0.42	0.40	0.01	0.40	10.29	.005	0.38
平均最短路徑長度	1.97	0.07	1.97	1.96	0.06	1.96	0.31	.587	0.02
平均局部效率	0.58	0.02	0.58	0.57	0.01	0.57	4.92	.040	0.22
全局效率	0.32	0.01	0.32	0.33	0.01	0.33	0.65	.431	0.04
標準化群聚係數	3.82	0.30	3.82	3.69	0.23	3.69	1.02	.328	0.06
標準化路徑長度	0.94	0.02	0.94	0.94	0.01	0.94	1.24	.281	0.07
小世界屬性	3.23	0.22	3.23	3.15	0.19	3.15	0.70	.415	0.04

四、智力與網路屬性及節點連結效率之關聯

為了瞭解數理資優組與一般組在智力與大腦網路連結效率之相關是否有所不同，研究者分別計算兩組所有參與者智力分數與大腦網路屬性之關聯性。在此之前，研究者先以 Kolmogorov-Smirnov 檢定全量表智商、語文智商、作業智商是否為常態分配，結果顯示數理資優組與一般組的全量表智商、語文智商、作業智商皆為常態分配 (Kolmogorov-Smirnov's $Z_s = .89, .59, .50, .71, .55, .62, p_s = .40, .88, .96, .71, .55, .62$)。表 4 為兩組參與者的智力分數與大腦網路屬性之淨相關結果指出，年齡為控制變項，在數理資優組，大腦白質網路的整體屬性以及各節點連結效率與全量表智商、語文智商、作業智商皆無顯著相關；在一般組，平均最短路徑長度與作業智商 ($r = -.50, p = .01$) 及全量表智商 ($r = -.50, p = .01$) 為負相關，全局效率與作業智商 ($r = .45, p = .02$) 及全量表智商 ($r = .42, p = .03$) 為正相關。在節點連結效率部分，僅有一般組的智商與節點連結效率顯著相關。其中，全量表智商與右側額上回 ($r = .68, p = .001$)、前額中回 (middle frontal gyrus) ($r = .59, p = .007$)、中央後回 (Postcentral Gyrus) ($r = .60, p = .006$) 及左側頂上葉 ($r = .60, p = .005$) 的連結效率為正相關。語文智商與右側額上回 ($r = .57, p = .009$) 為正相關。作業智商與左側前額下回 (inferior prefrontal gyrus) ($r = .59, p = .006$) 以及右側顳上回 ($r = .69, p = .001$) 呈現正相關，其結果如表 5 所示。

表 4 數理資優與一般組在白質網路屬性與智力之相關分析摘要表 ($N = 42$)

	語文智商	作業智商	全量表智商
數理資優組 ($N = 21$)			
平均群聚係數	.16 (.25)	.01 (.48)	.23 (.17)
平均最短路徑長度	-.12 (.31)	.15 (.26)	.05 (.42)
平均局部效率	.17 (.23)	.1 (.34)	.26 (.14)
全局效率	.09 (.35)	.05 (.42)	.09 (.35)
一般組 ($N = 21$)			
平均群聚係數	-.22 (.17)	.05 (.42)	-.16 (.26)
平均最短路徑長度	-.23 (.16)	-.50 (.01)	-.50 (.01)
平均局部效率	.02 (.47)	.11 (.32)	.08 (.38)
全局效率	.18 (.22)	.45 (.02)	.42 (.03)

註：控制變項為年齡，括號內為 p 值。

表 5 一般組在白質網路節點連結效率與智力之相關分析 (N = 21)

變項	AAL Label	X	Y	Z	r	p
全量表智商						
右側額上回	ORBsup.R	18.49	48.1	-14.02	.68	.001
右側額中回	ORBmid.R	33.18	52.59	-10.73	.59	.007
右側中央後回	PoCG.R	41.43	-25.49	52.55	.60	.006
左側頂上葉	SPG.L	-23.45	-59.56	58.96	.60	.005
作業智商						
左側前額下回	IFGoperc.L	-48.43	12.73	19.02	.59	.005
右側顳上回	STG.R	58.15	-21.78	6.8	.69	.001
語文智商						
右側額上回	ORBsup.R	18.49	48.1	-14.02	.57	.009

討論

本研究首以圖形理論分析大腦白質網路結構與數理資優之關係，並透過比較數理資優與一般人在大腦網路拓樸屬性之差異，以及分析兩組樣本的智力與大腦網路拓樸屬性之相關，藉以釐清數理資優的大腦結構。結果發現，數理資優組在魏氏智力測驗各分測驗分數皆高於一般組，並以工作記憶與知覺處理差異最大。在大腦網路結構方面，高智力的數理資優組在平均群聚係數、平均局部效率以及標準化群聚係數與最短路徑長度皆高於一般組。惟在控制兩組智力相等後，數理資優組僅在平均群聚係數與平均局部效率有顯著優勢，顯示大腦局部區域的連結效率與數理能力有密切關係。另一方面，各別分析數理資優及一般組智力與大腦網路連結效率之相關結果發現，一般成人智力與大腦網路跨區域的連結效率顯著正相關，但數理資優則無，顯示數理資優大腦網路屬性與其智力無直接關係。

首先，為了確保本研究取樣的數理資優組與一般組在智力具有實質的差異，我們比較兩組在魏氏智力測驗各向度分數，發現數理資優組在智力測驗的全量表分數、作業智商、語文智商皆高於一般組，且各個分向度平均分數皆高於 120 分（陳榮華、陳心怡，2002），顯示數理資優組相對較具資賦優異特性。另一方面，雖然本研究未蒐集參與者的數學能力，但由其在魏氏智力測驗分測驗表現觀之，數理資優組在工作記憶與知覺處理的表現皆顯著優於一般組，符合文獻所述（Desco et al., 2011; Jung et al., 2010; Lee et al., 2006; Singh & O'Boyle, 2004; Shore & Kanevsky, 1993）。據此確保數理資優組在數學能力與智力優於一般組。

基於行為表現的差異，我們進一步分析兩組參與者在大腦白質網路屬性上的差異情形。由於大腦結構組織及神經纖維之組成錯綜複雜，各個大腦部位之間的相互連結可視為一個點線交織的網路（Sporns et al., 2004; Gong et al., 2009）。故本研究採用圖形理論分析白質網路各節點的連結效率（Bullmore & Sporns, 2009; He et al., 2009），結果發現數理資優組在平均群聚係數、局部效率及標準化群聚係數與最短路徑長度皆高於一般組。其中，群聚係數與局部效率皆為評估網路任一節點與其鄰近節點之間相互連結的密度，意即用以表徵網路局部區域各節點相互傳遞的效率。另外，最短路徑長度為估計網路某一節點至另一個節點行經最少節點的數目，通過的節點愈少表示跨區域之間資訊傳輸愈有效率（Sporns et al., 2004）。由此可知，數理資優組在大腦網路結構的優勢在於局部區域內具有較佳連結效率，透過特定區域內密集的連結網路以有效地傳遞神經訊息。據此，我們進一步分析大腦網路 90 個節點（Tzourio-Mazoyer et al., 2002）各別的群聚係數以瞭解哪一個大腦網路節點具有較佳的緊密連結。結果發現，數理資優組在左側額上回的群聚係數顯著高於一般組，顯示數理資優組的左側額上回與其鄰近節點的連結具有較高的密度。

左側額上回在個體從事問題解決時扮演關鍵的角色。根據頂額整合理論，前額上回主要執掌問題內容的評估（郭靜姿等人，2012a；Jung & Haier, 2007）以決定執行何種解題策略，負責高階認知運作。再則，額上回為大腦預設模式網絡（default mode network, DMN）的主要節點（Mazoyer et al., 2001; Raichle et al., 2001），該網路各節點之間的運作亦被認為與個體內在認知活動息息相

關。另一方面，結構性腦影像研究指出前額上回的灰質密度與其自然成就呈現正相關（郭靜姿等人，2012a），顯示該區域的組織與個體的自然科學能力有關。同時，前額上回的區域同質性亦被發現與智力正相關（Wang et al., 2011），意即該區域內的有效連結反映個體較佳的智力。由此可知，左側額上回涉及個體認知監控、智力或自然科學能力。對照本研究結果，數理資優組在此大腦節點與其鄰近節點具有較密集的神經訊息傳遞，反映數理資優具有較佳的認知監控、智力或科學能力，過去研究發現與本研究結果相互呼應。

由上述發現可知，直接以數理資優與一般組相互比較，所得結果仍夾雜數理能力與智力兩種特性。因此，若需要瞭解數理能力與大腦結構之關係，有必要將智力的影響加以控制。研究者從既有樣本中挑選智力均等的數理資優與一般組，比較兩組在大腦網路拓樸屬性，結果發現，在控制兩組智力與年齡後，數理資優組在平均群聚係數與局部效率仍具顯著優勢，但在平均最短路徑長度則與一般組無顯著差異，再再檢證數理能力與大腦局部區域內節點的密集程度有密切相關，反映數理能力可能需要大腦特定區域與其鄰近結構密切資訊相互傳遞。然而，該區域是否會與控制智力與年齡前的相同？是此，我們同樣分析大腦網路各個節點的群聚係數之差異，結果發現智力配對的數理資優組係在左側枕上回的群聚係數顯著高於一般組，此結果不同於上述高智力數理資優組差異分析的發現。

有別於額上回同時被頂額整合理論（Jung & Haier, 2007）與預設網路模式（Mazoyer et al., 2001; Raichle et al., 2001）宣稱為問題解決的重要節點，枕上回並未被發現涉及上述理論與模式之中。枕上回與數學表現之關係曾在 Zhou 等人（2007）的研究被討論過，該研究發現個體在進行個位數加法問題時，枕上回有較多的活化，並推論其原因在於加法需要較多的視覺空間處理。此結果反映數理資優組之所以在數學或科學有較佳的表現，更核心的因素在於執掌空間訊息處理的枕上回能與其周遭節點有效地相互傳遞神經訊息，因而使他們能比常人更敏捷處理數學問題所需的空間資訊。

另一方面，各別分析數理資優與一般組的智力與大腦網路拓樸屬性之相關。結果發現，一般組的作業智商、全量表智商皆與平均最短路徑長度呈現負相關，此與過去研究發現相同（van den Heuvel et al., 2009），皆顯示大腦整體網路的跨區域連結效率反映其優異的智力潛能。同時，一般組的額葉、頂葉等區域的節點效率亦與智商為正相關，符合頂額整合理論所述（Jung & Haier, 2007）。然而，本研究首以數理資優組為樣本，探討數理資優組智力與大腦網路結構之關聯性，卻發現兩者無顯著相關，表示數理資優個體的大腦網路連結屬性與其智力可能無直接的關係。推論其原因，在於數理資優兼具高數理能力與資賦優異兩種特質（Leikin et al., 2013），數理能力與網路局部區域的密集程度較有關，智力則與網路整體連結效率有關。由於兩者與網路連結效率之關聯情形不同，導致在未排除數學能力影響下，數理資優組智力與大腦網路拓樸屬性無顯著相關。相關檢證尚待往後研究進一步分析之。

本研究在執行上僅以男性為樣本，可能導致結果可推論性受到影響；然而，因不同性別數理資優生在大腦結構具有顯著差異（郭靜姿等人，2012b；Grabowska, 2017），若混合兩組的結果進行解釋，其區分性可能不足，因此本研究便先以男性為研究對象。另一方面，本研究雖然沒有實際測量參與者的數學能力，致使無法直接分析大腦網路結構與數學能力之相關，但本研究的數理資優樣本皆曾通過各地方政府鑑輔單位委託特教與測驗專家之評估與診斷，理應足以證明數理資優組具有高於常人的數理能力。後續研究可進一步比較不同性別的數理資優個體在大腦白質網路連結之差異，或是蒐集參與者在標準化數學成就測驗之表現，藉此更準確探討數學能力與大腦網路結構的關係。除此之外，除了數理資優，尚有語文資優、音樂資優、美術資優等不同類型的資賦優異群體，未來可分別探討不同資優類型在大腦白質網路與常人之差異。最後，本研究受限於數理資優樣本人數較少，進行各項分析的事後比較之顯著性皆未能校正，致使降低研究效度，惟此為以特殊族群為樣本的實徵研究普遍遭遇之限制。

綜合論之，本研究透過三階段的分析，發現數理資優、數學能力及智力分別與大腦白質網路拓樸屬性之關係。數理資優個體在大腦網路局部區域的連結具有顯著優勢，尤其是在負責問題評估的左側額上回；進一步排除智力影響後，我們發現數理能力同樣與網路局部區域節點的密集程度正相關，但主要是在涉及視覺空間訊息處理的左側枕上回與其鄰近節點有較緊密之連結。最後，不同於常人，數理資優群體的智力與大腦網路結構並無直接連結。基於上述，本研究不僅提供數

理資優與常人在大腦白質結構差異情形的實徵證據，更從大腦拓樸網路之取向區辨數理資優、數理能力以及智力之異同，將可做為往後評估資賦優異的參考。

參考文獻

- 郭靜姿、張馨仁、張玉佩、周坤賢、林燁虹、陳雪君、林慶波 (2012a)。高中數理資優班學生心理特質與大腦結構之研究。《教育心理學報》，43(4)，805-832。[Kuo, C. C., Chang, H. J., Chang, Y. P., Chou, K. H., Lin, Y. H., Chen, H. C., & Lin, C. P. (2012a). Psychological traits and brain structures of mathematically and scientifically senior high school talented students. *Bulletin of Educational Psychology*, 43(4), 805-832.]
- 郭靜姿、林慶波、張馨仁、周坤賢、曾琦芬、張玉佩、林燁虹 (2012b)。高中數理能力優異班學生與普通班學生大腦結構及性別差異之研究。《教育科學研究期刊》，57(2)，25-64。[Kuo, C. C., Lin, C. P., Chang, H. J., Chou, K. H., Tseng, C. F. C. Chang, Y. P., & Lin, Y. H. (2012b). Sex differences in brain structure between students talented in math and science and developed peers. *Journal of Research in Education Sciences*, 57(2), 25-64.]
- 陳榮華、陳心怡 (2002)。《魏氏成人智力量表第三版 (WAIS-III) 中文版》。臺北：中國行為科學社。[Chen, Y. H. & Chen, H. Y. (2002). *Wechsler Adult Intelligence Scale (WAIS)-III Chinese version*. Taiwan, Taipei: Chinses Behavioral Science Corporation.]
- Achard, S., Salvador, R., Whitcher, B., Suckling, J., & Bullmore, E. (2006). A resilient, low frequency, small-world human brain functional network with highly connected association cortical hubs. *Journal of Neuroscience*, 26, 63-72.
- Bai, F., Shu, N., Yuan, Y., Shi, Y., Yu, H., Wu, D., ... Zhang, Z. (2012). Topologically convergent and divergent structural connectivity patterns between patients with remitted geriatric depression and amnesic mild cognitive impairment. *Journal of Neuroscience*, 32, 4307-4318.
- Bellec, P., Lavoie-Courchesne, S., Dickinson, P., Lerch, J. P., Zijdenbos, A. P., & Evans, A. C. (2012). The pipeline system for Octave and Matlab (PSOM): A lightweight scripting framework and execution engine for scientific workflows. *Frontiers in Neuroinformatics*, 6, 1-18.
- Berg, D. H. (2008). Working memory and arithmetic calculation in children: The contributory roles of processing speed, short-term memory, and reading. *Journal of Experimental Child Psychology*, 99, 288-308.
- Bullmore, E., & Sporns, O. (2009). Complex brain networks: Graph theoretical analysis of structural and functional systems. *Nature Reviews Neuroscience*, 10, 186-198.

- Cui, Z., Zhong, S., Xu, P., He, Y., & Gong, G. (2013). PANDA: A pipeline toolbox for analyzing brain diffusion images. *Frontiers in Human Neuroscience, 21*, 7-42.
- Danker, J. F., & Anderson, J. R. (2007). The roles of prefrontal and posterior parietal cortex in algebra problem solving: A case of using cognitive modeling to inform neuroimaging data. *NeuroImage, 35*, 1365-1377.
- Davidson, J. E. & Sternberg, R. J. (2003). *The psychology of problem solving*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Desco, M., Navas-Sanchez, F. J., Sanchez-Gonzalez, J., Reig, S., Robles, O., Franco, C., ... Arango, C. (2011). Mathematically gifted adolescents use more extensive and more bilateral areas of the fronto-parietal network than controls during executive functioning and fluid reasoning tasks. *NeuroImage, 57*, 281-292.
- Frangou, S., Chitins, X., & Williams, S. C. R. (2004). Mapping IQ and gray matter density in healthy young people. *NeuroImage, 23*, 800-805.
- Geake, J. G. & Hansen, P. C. (2005). Neural correlates of intelligence as revealed by fMRI of fluid analogies. *NeuroImage, 26*, 555-564.
- Gong, G., Rosa-Neto, P., Carbonell, F., Chen, Z. J., He, Y., & Evans, A. C. (2009). Age and gender-related differences in the cortical anatomical network. *Journal of Neuroscience, 29*, 15684-15693.
- Grabner, R. H., Ansari, D., Reishofer, G., Stern, E., Ebner, F., & Neuper, C. (2007). Individual differences in mathematical competence predict parietal brain activation during mental calculation. *NeuroImage, 38*, 346-356.
- Grabowska, A. (2017). Sex on the brain: Are gender-dependent structural and functional differences associated with behavior? *Journal of Neuroscience Research, 95*, 200-212.
- Hagmann, P., Cammoun, L., Gigandet, X., Meuli, R., Honey, C. J., Wedeen, V. J., & Sporns, O. (2008). Mapping the structural core of human cerebral cortex. *PLOS Biology, 6*, e159.
- Hanakawa, T., Honda, M., Okada, T., Fukuyama, H., & Shibasaki, H. (2003). Neural correlates underlying mental calculation in abacus experts: A functional magnetic resonance imaging study. *NeuroImage, 19*, 296-307.
- He, Y., Chen, Z. J., Gong, G., & Evans, A. C. (2009). Neuronal networks in Alzheimer's disease. *Neuroscientist, 15*, 333-350.
- Hoard, M. K., Geary, D. C., Byrd-Craven, J., & Nugent, L. (2008). Mathematical cognition in intellectually precocious first graders. *Developmental Neuropsychology, 33*, 251-276.
- Ischebeck, A., Zamarian, L., Egger, K., Schocke, M., & Delazer, M. (2007). Imaging early practice effects in arithmetic. *NeuroImage, 36*, 993-1003.

- Jung, R. E., Grazioplene, R., Caprihan, A., Chavez, R. S., & Haier, R. J. (2010). White matter integrity, creativity, and psychopathology: Disentangling constructs with diffusion tensor imaging. *PLoS One*, 5, e9818.
- Jung, R. E., & Haier, R. J. (2007). The parieto-frontal integration theory (PFIT) of intelligence: Converging neuroimaging evidence. *Behavioral & Brain Sciences*, 30, 135-154.
- Kuo, C. C., Liang, K. C., Tseng, Christine C. F., & Gau, Susan S. F. (2014). Comparison of the cognitive profiles and social adjustment between mathematically and scientifically talented students and students with Asperger's syndrome. *Research in Autism Spectrum Disorders*, 8, 838-850.
- Kuo, C. C., Lin, C. P., & Wang, H. L. Sharon. (2015). Neuroscience research on science-talented learners. In Keith S Taber & Manabu Sumida (Eds.), *International perspectives on science education for the gifted: Key issues and challenges* (pp. 194-208). U.K., London: Routledge.
- Latora, V., & Marchiori, M. (2001). Efficient behavior of small-world networks. *Physical Review Letters*, 87(19), 198701.
- Lee, K. H., Choi, Y. Y., Gray, J. R., Cho, S. H., Chae, J. H., Lee, S., & Kim, K. (2006). Neural correlates of superior intelligence: stronger recruitment of posterior parietal cortex. *NeuroImage*, 29, 578-586.
- Leemans, A., & Jones, D. K. (2009). The B-matrix must be rotated when correcting for subject motion in DTI data. *Magnetic Resonance in Medicine*, 61(6), 1336-1349.
- Leikin, M., Waisman, I., & Leikin, R. (2013). How brain research can contribute to the evaluation of mathematical giftedness. *Psychological Test and Assessment Modeling*, 55, 415-437.
- Leikin, R., Koichu, B. & Berman A. (2009). Mathematical giftedness as a quality of problem-solving acts. In R. Leikin, A. Berman & B. Koichu (Eds), *Creativity in mathematics and the education of gifted students* (Vol. 8, pp. 115-127). Rotterdam, the Netherlands: Sense Publisher.
- Li, Y. H., Liu, Y., Qin, W., Li, K. C., Yu, C. S., & Jiang, T. Z. (2009). Brain anatomical network and intelligence. *PLOS Computational Biology*, 5, e1000395.
- Mazoyer, B., Zago, L., Mellet, E., Bricogne, S., Etard, O., Houde, O., ... Tzourio-Mazoyer, N. (2001). Cortical networks for working memory and executive functions sustain the conscious resting state in man. *Brain Research Bulletin*, 54(3), 287-298.
- Meyer, M. L., Salimpoor, V. N., Wu, S. S., Geary, D. C., & Menon, V. (2010). Differential contribution of specific working memory components to mathematics achievement in 2nd and 3rd graders. *Learning and Individual Differences*, 20, 101-109.

- Narr, K. L., Woods, R. P., Thompson, P. M., Szeszko, P., Robinson, D., Dimtcheva, T., ... Bilder, R. M. (2007). Relationships between IQ and regional cortical gray matter thickness in healthy adults. *Cerebral Cortex, 17*, 2163-2171.
- Navas-Sanchez, F. J., Aleman-Gomez, Y., Sanchez-Gonzalez, J., Guzman-De-Villoria, J. A., Franco, C., Robles, O., Arango, C., & Desco, M. (2014). White matter microstructure correlates of mathematical giftedness and intelligence quotient. *Human Brain Mapping, 35*, 2619-2631.
- O'Boyle, M. W., Cunnington, R., Silk, T. J., Vaughan, D., Jackson, G., Syngeniotis, A., & Egan, G. F. (2005). Mathematically gifted male adolescents activate a unique brain network during mental rotation. *Cognitive Brain Research, 25*, 583-587.
- Prescott, J., Gavrilescu, M., Cunnington, R., O'Boyle, M. W., & Egan, G. F. (2010). Enhanced brain connectivity in math-gifted adolescents: an fMRI study using mental rotation. *Cognitive Neuroscience, 1*, 277-288.
- Raichle, M. E., MacLeod, A. M., Snyder, A. Z., Powers, W. J., Gusnard, D. A., & Shulman, G. L. (2001). A default mode of brain function. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 98*(2), 676-682.
- Reiss, A. L., Abrams, M. T., Singer, H. S., Ross, J. L., & Denckla, M. B. (1996). Brain development, gender and IQ in children. A volumetric imaging study. *Brain, 119*, 1763-1774.
- Schmithorst, V. J., & Brown, R. D. (2004). Empirical validation of the triple-code model of numerical processing for complex math operations using functional MRI and group Independent Component Analysis of the mental addition and subtraction of fractions. *NeuroImage, 22*, 1414-1420.
- Shore, B. M., & Kanevsky, L. (1993). Thinking processes: Being and becoming gifted. In K. A. Heller, F. J. Moenks, & A. H. Passow (Eds.), *International handbook of research and development of giftedness and talent* (pp. 133-147). New York, NY: Pergamon Press.
- Singh, H., & O'Boyle, M. W. (2004). Interhemispheric interaction during visual information processing in mathematically gifted youth, average ability adolescents and college students. *Neuropsychology, 18*, 371-377.
- Smith, S. M., Jenkinson, M., Woolrich, M. W., Beckmann, C. F., Behrens, T. E., Johansen-Berg, H., ... Matthews, P. M. (2004). Advances in functional and structural MR image analysis and implementation as FSL. *NeuroImage, 23*, 208-219.
- Sporns, O., Chialvo, D. R., Kaiser, M., & Hilgetag, C. C. (2004) Organization, development and function of complex brain networks. *Trends in Cognitive Sciences, 8*, 418-425.
- Taub, G. E., Floyd, R. G., Keith, T. Z., & McGrew, K. S. (2008). Effects of general and broad cognitive abilities on mathematics achievement. *School Psychology Quarterly, 23*, 187-198.

- Tzourio-Mazoyer, N., Landeau, B., Papathanassiou, D., Crivello, F., Etard, O., Delcroix, N., ... Joliot, M. (2002). Automated anatomical labeling of activations in SPM using a macroscopic anatomical parcellation of the MNI MRI single-subject brain. *NeuroImage*, *15*, 273-289.
- van den Heuvel, M. P., Stam, C. J., Boersma, M., & Hulshoff Pol, H. E. (2008). Small-world and scale-free organization of voxel-based resting-state functional connectivity in the human brain. *NeuroImage*, *43*, 528-539.
- van den Heuvel, M. P., Stam, C. J., Kahn, R. S., & Hulshoff Pol, H. E. (2009). Efficiency of functional brain networks and intellectual performance. *The Journal of Neuroscience*, *29*(23), 7619-7624.
- Wang, J., Wang, X., Xia, M., Liao, X., Evans, A., & He, Y. (2015). GREYNA: A graph theoretical network analysis toolbox for imaging connectomics. *Frontiers in Human Neuroscience*, *9*, 386.
- Wang, L. Q., Song, M., Jiang, T. Z., Zhang, Y. T., & Yu, C. S. (2011). Regional homogeneity of the resting-state brain activity correlates with individual intelligence. *Neuroscience Letters*, *488*, 275-278.
- Wang, R., Benner, T., Sorensen, A. G., & Wedeen, V. J. (2007). Diffusion toolkit: A software package for diffusion imaging data processing and tractography. *Proceedings of the International Society for Magnetic Resonance in Medicine*, *15*, 3720.
- Watts, D. J. & Strogatz, S. H. (1998). Collective dynamics of 'small-world' networks. *Nature*, *393*, 440-442.
- Wilke, M., Sohn, J. H., Byars, A. W., & Holland, S. K. (2003). Bright spots: Correlations of gray matter volume with IQ in a normal pediatric population. *NeuroImage*, *20*, 202-215.
- Wu, C. L., Zhong, S. Y., Chan, Y. C., Chen, H. C., Gong, G. L., He, Y., & Li, P. (2016). White-matter structural connectivity underlying human laughter-related traits processing. *Frontiers in Psychology*, *7*, 1637.
- Wu, C. L., Zhong, S., Chan, Y. C., Chen, H.C., & He, Y. (2018). White-matter structural connectivity in relation to humor styles: An exploratory study. *Frontiers in Psychology*, *9*, 1654.
- Wu, C. L., Zhong, S. Y., & Chen, H. C. (2016). Discriminating remote and close association with relation to white-matter structural connectivity. *PloS One*, *11*(10), e0165053.
- Zhang, L., Gan, J. Q., & Wang, H. (2015). Mathematically gifted adolescents mobilize enhanced workspace configuration of theta cortical network during deductive reasoning. *Neuroscience*, *289*, 334-348.
- Zhou, X., Chen, C., Zang, Y., Dong, Q., Chen, C., Qiao, S., & Gong, Q. (2007). Dissociated brain organization for single-digit addition and multiplication. *NeuroImage*, *35*, 871-880.

收稿日期：2016年12月19日
一稿修訂日期：2016年12月26日
二稿修訂日期：2017年12月28日
三稿修訂日期：2018年03月24日
四稿修訂日期：2018年05月03日
五稿修訂日期：2018年05月07日
接受刊登日期：2018年05月08日

Bulletin of Educational Psychology, 2019, 50(3), 389-406
National Taiwan Normal University, Taipei, Taiwan, R.O.C.

White Matter Network Connectome of Mathematical and Scientific Talents

Ching-Chih Kuo

Department of Special
Education

National Taiwan Normal
University

Hsueh-Chih Chen

Department of Educational
Psychology and Counseling

National Taiwan Normal
University

Keng-Chen Liang

Department of Psychology
National Taiwan University

Institute for Research Excellence in Learning Sciences
National Taiwan Normal University

Susan Shur-Fen Gau

Department of Psychiatry

National Taiwan University

Hospital and College of Medicine

Ching-Lin Wu

Institute for Research Excellence in Learning Sciences

National Taiwan Normal University

Program of Learning Sciences

National Taiwan Normal University

Recent studies have highlighted that people with mathematical and scientific talents develop a different brain structure from those with typical development. However, most of these studies have focused on the relationship between cognitive functions of the brain and the operation of a single area of the brain. This study explores the connections among the network structures with relation to mathematical and scientific talents, intelligence, and white matter. The study recruited 42 men with normal nerve functions. The experimental group comprised 21 participants with mathematical and scientific talents and an age of 21.00 ± 1.67 years; the control group comprised 21 participants with typical developmental and an age of 21.48 ± 2.29 years. The mathematical and scientific talent and typical developmental groups consisted of 21 people each. The researchers adopted the third version of the Wechsler Adult Intelligence Test to evaluate individual intelligence, conduct diffusion tensor imaging of participants, and construct a network of white matter to analyze the overall network attributes and nodal efficiencies using graph theory. The results show that the communication efficiency among the nodes inside the local region is relatively better in people with mathematical and scientific talents, particularly the in the superior prefrontal gyrus. Moreover, when intelligence was equal between the two groups, the mathematical and scientific talent group outperformed the other in terms of node efficiency in local regions and the clustering coefficient in the superior occipital gyrus. The relationship between the topological properties and the intelligence of the mathematical and scientific talent group and the

typical developmental group showed that only the intelligence of the typical developmental group was positively connected with integrated efficiency across several regions of the brain; however, no direct correlation was shown in the mathematical and scientific talents group. The results not only provided empirical evidence for the disparity in white matter structure between mathematical and scientific talent and typical development groups but also distinguished mathematical and scientific talents, mathematical ability, and intelligence based on the topological network of the brain, which can be used in future assessments for people with mathematical and scientific talents.

KEY WORDS: Diffusion tensor imaging, Graph theory, Intelligence, Mathematical and scientific talents