

第二章 文獻探討

第一節 大腦科學與學習

我們對於人類心智和頭腦的方式反映在新與舊的典範之間。舊典範指的是傳統上在神經科學方面的機械論，是來自哲學的思維，認為人類的心智是大腦的產物，心智是大腦運作的東西。只注重大腦功能，要解決心智問題最好就是先瞭解大腦，所以人類的問題，可以用「修理」大腦的方式來解決。這樣的論點不解釋其自身的複雜現象，只解釋其組成的部分。而教育工作者採用神經系統科學解釋，讓我們堅持說看得見學習者在零碎和限制的方面。而新典範是在神經系統科學之外且為我們提供心智/大腦功能為何之根本新意見。近幾年已大量湧進有關大腦的資訊，而教育工作者也在不同程度的使用。這是我們思考人類的可能和有可能變得如何的時間，而不是探討人類在生存階段如何被協助。要達到這個新思維無論如何有些渾濁，有些發展採用有關大腦獨立的新瞭解方式；其他則尋求心智與大腦間更複雜的連結。如視身體、大腦、和心智為一動態的整體，其本質與可能性是遠超出其本身，其品質也不同於其所構成的部分。也就是說大腦不是只能做大腦，身體只能做身體，身體、大腦、和心智可協同出人類更大的可能 (Caine, R., Caine, G., 1997)。所以瞭解腦神經系統的機能與學習機制，可能有效促進學習效果，因此研究者將針對大腦神經系統與學習的關係做文獻探討。

壹、持續的神經連結與修剪

創造大腦活動的細胞是神經元(neurons)，大腦內有幾千億的神經元和節細胞，靠神經通路和軸突綿密地連接在一起。神經通路外包覆的白色組織是髓鞘，幫助神經原內激發出來的電流訊號的傳遞。神經元和短的當地神經元連接形成灰質，而長的包覆著髓鞘的神經通路則構成白質。每一個神經元都與許多神經元相互連接，形成一個複雜精緻的交互網。同時激發的神經細胞像跳螢火舞般，在複雜的激發型態下創造出思考感覺和知覺，在此之中幾百萬個神經元必須同步活化

化才能製造出最微小的思想。用電腦模擬神經網路的運作模式，既使最簡單的網路在最短的時間內也會發展出很複雜的現象。在大腦的成長過程中，表面產生無數的腦溝和凸出來的腦迴，每一個人的型態都不一樣，這些構成我們怎麼看、怎麼思考這個外在世界。雖然細胞內產生的訊號是電流，細胞之間卻是以化學形式來傳遞。這個生物物質稱為神經傳導物質以及神經調節，它們使細胞之間得以互通訊息。一個電流訊號是在細胞體內產生，透過軸突傳送出去，當他到達軸突與另一個細胞的樹狀突相交之處時，電流無法跳過縫隙，此時，動作電流會使終端器釋放出微量的化學物質，然後與對岸的感受體相結合，這些感受體被活化後就會產生電流。當有機體從外界接收到新的訊號型態時，突觸接觸點的強度就增加了，局部化學的和電流特性就逐漸改變成複雜分散式型態的銀河系統，這就是學習（洪蘭譯，2002；洪蘭譯，2004）。

胚胎發育時大腦是神經管上端的一個像植物球根的東西，約七個禮拜時可以看到大腦的主要區塊包括大腦皮質，孩子出生時已經有十兆之多的神經細胞，這些神經細胞尚未成熟，軸突外面還沒包上髓鞘，神經之間的連接也很稀疏，此時大部分的腦還沒有功能，尤其是大腦皮質。大腦中的神經元彼此競賽找伙伴，與之連結成團隊，神經連接在出生時很稀疏，嬰兒齊長得非常快，到六歲大已經達到最大密度，此後神經密度開始減弱，因為不需要的連接開始死亡，而這種細胞凋亡(apoptosis)或計畫性細胞死亡(programmed cell death)此為神經修剪歷程；成人只要繼續使用大腦，學習新的東西，神經連接數就會增加，假使大腦沒有持續使用，連接會更少（洪蘭譯，2004）。

在突觸過量產生和修剪的現象，有些神經科學家會用雕刻的藝術來比喻，也就是說去到不需要的部分，只留下所要的部分，神經系統一開始先設定大量連結，然後已生活經驗所需來選擇適當的連結，並且宜除不適當的連結。最後留下來的，是一個精鍊過的最終形式。形成突觸的另一種方法是透過加進新的突觸，在人得一生中都會進行新的突觸的增加，這個歷程主要是由經驗來主導。在本質上，一個人所接觸到的訊息品質和他所獲得的訊息量，終其一生都會反應在他的大腦結構上（鄭谷苑、郭俊賢譯，2004）。

貳、理性的腦與感性的腦

一、理性的腦

理性的腦指的是大腦的皮質區，尤其是前額葉皮質(Prefrontal cortex)，一般稱為腦的 CEO。因為神經元相互連結急速增加，大腦自由度增加，會導致混亂，在皮質發展的最後階段，額葉理性的控制整體，找到可以處理的大腦區域，將這些區域串聯起來（像公司的 CEO）般，所以額葉主要和個人的社會的自主性及控制有關，在大腦中肩負領導能力的角色，為目前神經科學研究的重點。社會成熟與社會責任，也與額葉成熟有關。額葉要一直到人類 18 至 20 歲才會成熟（洪蘭譯，2004）。

二、感性的腦

感性的腦指的是邊緣系統，是大腦的發電機，負責食慾、動機、慾望、情緒和心情，並驅使我們所有的行為。當思考與情緒發聲衝突時，情緒必然獲勝，因為情緒原本就設定在們的神經迴路意識的思想扮演調節者的角色。替潛意識世界產生的生理求力量做調節工作。邊緣系統送出針對恐懼和憤怒的緊急訊息，而皮質再做出反應，產生意識將情緒淹沒（洪蘭譯，2002）。

三、大腦發育

嬰兒的情緒是無意識的，因為情緒中心連接到意識經驗的迴路還為完成；三歲以前掌管記憶的海馬迴還未成熟，無意識的情緒存放在杏仁核中，杏仁核可能一出生就有功用。當嬰兒逐漸長大時，髓鞘逐漸形成，讓大腦中越來越多連接，其頂葉很早就開始工作，以感覺外界基本空間；而其額葉約在六個月大時參加工作主要是認知。嬰兒在一歲時逐漸掌握邊緣系統的控制權，逐漸掌握感性的腦。十八個月左右語言中心開始活動，此時孩子懂得比能說出的多，有口難言發脾氣；同時，前額葉的髓鞘也開始包圍神經，孩子有意識了！但是某些大腦區域要很久才成熟，尤其是理性腦部分，頂葉的灰質部分要到十二歲才完成發育過程；顳葉要到十六歲才完成生長，網狀結構(reticular formation)要到青春期才包完髓鞘，最後完成發育的，是具備假設、洞察未來、關納分析、邏輯推理的額葉，額葉一直到成年才包好髓鞘，要到二十至二十五歲才底定（洪蘭譯，2002）。

情緒是演化的產物，藉以讓生物能快速解決比較簡單的問題，主要是由理性的腦乃處理。現代人所要處理與學習的事情比較複雜，人類後來演化出理性的腦，來控制情緒，提高 EQ 的功能。青少年由於理性腦的額葉還沒有發展成熟，所以感性腦的杏仁核主導性較大，對外界的刺激容易做出情緒化的反應。成人以後就能擁有一個可以關閉負面感受的開關，只要經過訓練學習，提高額葉的活動力，就可以有效管理情緒。所以國民十八歲才能考駕照，二十歲才有選舉權，這是有其道理的，為理性的腦到這個時候才完成生長，也才能做出理性的判斷和決定。

叁、大腦可塑性與認知練習

人的大腦突觸，雖然在三歲時就比成人還多，六歲時達到最大密度，許多人只看到這個階段，就以為三歲定終身，而忽略了青少年時期與成年期，現在發現這是錯誤的，學習的主要因素不是神經元的數量，而是個別神經元之間是否產生連接。所以大腦發育完成後，神經元數目不再增加，人的學習力還是可以持續提昇，二十五歲以後，人類可以藉由學習刺激腦力，使神經元連結。

一、大腦的可塑性

從腦傷老鼠的實驗發現環境刺激其神經連接生長比普通環境更茂密，由實驗延伸，認知練習在有限的時間至少能夠改進大腦生理組織。早期想法是兒童期進入成人期後會失去大腦的可塑性，但是現在證據大腦到成年一直都保持可塑性，直到生命終結，所以大腦具有可塑性。

二、大腦的可塑性對認知訓練的影響

早期認知訓練的想法強調某特定功能，功能性系統的認知訓練；現在認知訓練的想法，則是強調一般性大腦功能，如選手的練習不只可促進身體健康、加強體力、手眼協調及耐力元氣。

三、大腦能力的增進

由動物的實驗中，推翻了舊有認為成年老鼠的神經元不能發展的概念，也證明認知加強的確可以改變大腦結構，增進訊息處理能力。新的神經細胞特別生長在海馬迴的齒回，位於大腦顳葉的中線，是對記憶非常重要的地方。

教育可以保護一個人比較不會產生認知退化現象;受過高等教育者較可以躲過老年失智的災害(Goswami, U., 2004)。

可見大腦還有許多驚人的可塑性及無限的潛能,透過學習經驗,可以讓神經元的連結更密,可以讓大腦更靈活,所以就腦部神經連結而言並非三歲就定終身,而是活到老學到老的終身學習。

肆、大腦 / 心智學習原則

Caine & Caine(1994)提出十二個大腦 / 心智學習原則(Caine & Caine, 1997):

一、 大腦是一個複雜的適應系統

大腦有能力同時運作許多層次,大腦類似於過程製造者,在學習時加入整體的生理學使大腦包含複雜適應系統。

二、 大腦是社會大腦

在出生最初的 1-2 年、大腦處於最能應付、接納敏感目標的狀態;我們形塑大腦 / 心智,以達到較大的知覺心智,是最初環境及人際間的關係之互動。大腦會將社會建構知識引入知覺,所以大腦 / 心智的改變是在回應與別人的互動,而個人被視為整體社會系統的部分、部分特性依賴社群的建立及其所屬,因此學習是深受社會關係特質的影響。

三、 尋找意義是與生俱來的

是生存取向及人類大腦/ 心智的基本研究,且終身在做此事。其動力源自於我們的目的及價值。例:我是誰?為何我在這裡?範圍從吃的需求到尋求安全、透過關係的發展及認同感、探索我們的潛能及要求超越。

四、 透過「模組」尋找意義

模組包含概要圖及分類而生。大腦會拒絕片斷的學習,因為片斷學習對學習者是無意義的。有效的教育需給學習者形成自己理解的類型。

五、 情緒是形成模組的關鍵

學習受情緒及理念的影響,並涉及期望、個人偏差及偏見、自尊及社會互動的需求,適當的情緒氛圍來健全教育是必須的。

六、 大腦同時認知及創造部分和整體

雖然事實證明左腦與右腦有區別，但健康人的每一個活動都是兩個腦半球的互動，從藝術、估算買賣，到結帳。「兩個大腦」的原理提醒我們，大腦降低對部分的訊息，同時接收整體的訊息，好的訓練及教育認知此事，從開頭導入自然的全體計畫及理念。

七、 學習包括專注力及對周遭的敏感度

大腦吸收訊息靠直接的知覺，亦可吸收目前專注事物以外的訊息。如潛意識的信號就揭露了內在的態度及信念。教育人員應關注所有教育環境的層面。

八、 學習總是涉及意識及潛意識的過程

多數學習是潛意識的，經驗及感知是在知覺之下輸入的。許多理解不是發生在教室內，或許是數小時、數週或數個月之後。教師應透過背景、省思、及認知活動幫助學生在思想、技能及經驗上創新。教學者要做的就是幫助學習者轉化潛意識中所學到的成為可見的。

九、 我們至少有兩種組織記憶的方法

第一種：透過回饋及處罰而激發。第二種：部分/自傳式的記憶，是不需練習及提供立即的經驗回憶。有意義的學習，會用這兩種取向的記憶；但有意義與無意義的訊息會以不同的方式組織及貯存。

十、 學習是具啟發性的

大腦是可塑的，神經持續的運作及強化，新的連結將可持續終身。

十一、 複雜的學習因挑戰而強化，因威脅而消弱

大腦/心智學習最理想的狀況是在鼓勵冒險的挑戰環境，會有最大的聯結。在覺知威脅下會「學習趨緩」，變得較無彈性並回到原始的態度及程續。威脅是指無助或疲倦，而真正的學習無可避免壓力及焦慮，其所涉及的改變導致自我重組，這樣的學習本質上而言是壓力的、與技能無關的、並由教師提供。

十二、 每一個大腦組織都是獨特的

我們都有相同的大腦系統，但每個人的反應都不相同。造成不同部分係因基因、不同的經驗、不同的環境、不同學習形態的表達、不同的天賦

及智力。每位學習者皆不同，且會選擇多樣性的輸入，這亦是多重智力對人類的意義。

伍、學習輸出及引發聯結

我們以不同的類型來學習，我們現在接受記憶和理解是不同的。學習是一個主動的過程，且意義的發展建基於經驗。我們所產生的意義依照我們所選擇關注的，知識的產生是個體去創造意義及在社會背景下個人的功能(Caine, R., Caine, G., 1997)。

一、 教育界的傳統知識類型

(一) 表層知識：

是死記學習的產物，涉及分類記憶系統，很可能發生在學生及教育者學習趨緩的時候。其不論學習者是否了解內容，只要記憶，內容包括記憶事實及技能，與個人的感覺及想法無關。它包含基本的社會反應訓練、需正確執行規律的動作。意義及理解通常是無關的，知識只是工具，轉換及應用此知識去面對動態背景的能力是極端的受到限制(Caine, R., Caine, G., 1997)。

(二) 技術或哲學知識

包含複雜技能及概念知識以形成理解。批判性思考、訊息過程及理解需要的概念是技術或哲學知識的面向，與深層信念和目的不同，此類型知識是理論來源。哲學知識包含傳統學科或訓練核心內容的理念、原則及過程，此種知識需要智能理解的元素，它是非常的重要，無論是在學校或其他地方。排除 Gardner 的「有生產力的」、「深度的」、「真誠的」理解；但哲學知識缺乏解決真實問題或處理複雜狀況，技術或哲學知識缺乏感受意義及領悟實務的應用(Caine, R., Caine, G., 1997)。

二、 超越傳統結果：

要超越傳統就要增加知識的意義，有意義的知識包括深層意義及感覺意義。

(一) 深層意義：

趨使我們及影響我們感覺的方向，包含領域權、社會關係的需求，及情緒豐富的生活、智力及精神的需求、及 Maslow 的需求階層。深層意義

對學習者及教育者的觀點非常重要。形塑我們觀注的意願並解釋我們的經驗。目的和價值是組織的要素，需要和無可避免的參與真實架構我們的知識。目的和價值是有效教育的本質。是本能動機的來源。是鼓勵探索動力的來源(Caine, R., Caine, G., 1997)。

(二) 感覺意義：

真正的理解總有情緒的成分，且真實的理解較智力的理解多，包括「感官」或「感覺意義」。真實理解聯結思想及感覺、心靈及身體。Aha 是思維、意念、感官、印象、及情緒，有點像化學反應。在深層理解中，任何學科、技能或範圍，是需求整合思維和感覺，教育者的實務應用是，我們必須做更多讓學生感覺好的，這樣他們才會有意願學習(Caine, R., Caine, G., 1997)。

三、 動態或知覺知識

當加入深層意義，及處理訊息時，學生獲得智力理解及產生感覺意義，我們稱其為動態的或知覺的知識。動態知識是 Gardner 的「真實」或「深層」理解；是 Morris 指的，當訊息整合理論及經驗時，知識來自特定狀況。動態知識是我們建構自己意義的結果，所以包含所有總類、理念、及思維，是我們對周遭世界的解釋和互動，所以是可知覺的。知覺知識是我們假定我們的世界是可以知覺的世界，包括一般的兒童知識及複雜的專家知識。動態知識是我們希望學生在課程上所擁有的知識類型。當我們認為理論是結合表層及技術/ 哲學知識時，心靈模式或理論都是知覺知識(Caine, R., Caine, G., 1997)。

陸、未來趨勢

一、 以大腦為基礎的教育

大腦架構會提供一些原則幫助我們吸收多元的訊息，我們也相信給予一些可參考的訊息架構，會幫助我們推斷的思考練習。人是透過生活經驗的感覺統合而成的生物個體。有意義的教學藝術在於可激發、促進大腦自我主導與自然發現原則。唯有當身體、心智與大腦都參與其中時，此目標可有效的達成。任務－在於查明過程中的中心元素，而後透過指示去組織它們(Caine & Caine, 1997)。

爲了對經驗有感覺，我們焦點在可以進入與擴展動態經驗感覺的元素(Caine & Caine, 1997)：

(一) 在複雜經驗裡的學習者，可熱衷於此精心策劃中

大腦所架構的學習在於有意義或多方面的經驗延伸。任務是要確保所有想教給孩子學習的知識是埋藏融合在：多元、豐富、互動的經驗裡，在其中孩子可以隨時延伸、真正發現、並且不斷強化的。

(二) 在複合經驗裡的學習特徵

有不同敘述故事層面所構成的事件，發生在生活情境中的問題，這些事件脈絡總是與正在進行的每件事情連結著。

(三) 可利用真實的社會關係

社群中有好的溝通技巧、密切協助是很重要的；例如：如何向國會請願或如何設計水耕法實驗室等。

(四) 多元知覺的輸入

許多重要複雜的計畫中，我們會自動發現廣泛的知覺經驗與輸入，人其不同個體所見所聞之經驗，就會成爲實驗室裡引導的因素。

二、視學習是一種歷程

學習像藝術或科學的學習，藝術家需要技巧或工具，隨時玩味在設計的靈感、創造的想像或創作歷程的各種層面裡。過程中不可避免地歷經許多挑戰、暫停、開始甚或抹殺等等。因應「感覺」之後出現的技巧與工具緊密結合著，不斷的練習與排練因此有意義，換句話說，有了目標才能賦予意義(Caine & Caine, 1997)。

促進學習的歷程是經驗的動態歷程，學習者透過個人化的意義與概念化的方式，緊密結合和內化訊息，而這是一條理解而非記憶的途徑。其目標焦點在於學習與吸取的過程，和清晰結合探索其中意義。學習者會盡可能的問「我該做什麼？」「爲何我要做？」「我該學習什麼？」。動態歷程：包含批判思考、運用蘇格拉底的方法、詰問探測性問題、探索看法的替代性觀點或關鍵、解決問題、組織細節、搜尋更多點子或增廣密切關係等。動態歷程使我們了解事實與精熟內容；也吻合了真實可靠的判斷，此爲有效的教育與學

習歷程元素(Caine & Caine, 1997)。

動態過程意味著經常的發問、延伸思考、精熟結合事實、概念與細節等。動態歷程使學生開始為學習負責，也發展個人的意義。它結合了反射與後設認知的活動，強調自我反省與更深層的學習。更重要的，動態歷程是自我指導，包含了解所有材料和探索個人意義，因此他們會愈益了解自己；而這也是在複雜世界中有效發揮功能的關鍵(Caine & Caine, 1997)。

三、放鬆警覺的最理想心智狀態

大腦與心智原則指出—最佳學習發生在學生低威脅與高挑戰的經驗中，這個分析背後蘊含了整體學校脈絡與社會文化層面的學習環境。研究顯示：對於學生行為太多獎勵或懲罰會抑制創造力、牴觸內在動機、與降低可能發生的意義學習。教師任務是提供方法滿足學生的好奇心與對新奇事物、對發現、對挑戰的渴望。學生透過閱讀理解書中內容，並應用這些知識於真實世界的思考中，他們辨識書中知識與他們自己天生理論的衝突；而這些衝突透過取捨或調整誤解的過程中，形成更強而有力、合理紀律的解釋。學生會盡可能去平衡，然而太多的不協調會引起焦慮，教師的任務就在於創造一個學生邁向卓越時，可安全嘗試、思考、推測與犯錯的氛圍。融合了高挑戰與低威脅，學生有機會一同合作、一同對話，也相互支持。時間或許會帶來壓力但並非來自於人，因此，這些元素會增加意義、降低人為壓力、支持冒險行動與降低無助感的狀態(Caine & Caine, 1997)。

情感領域與認知結合方面，在學校感情上的氛圍必須被監控在穩定的基礎，運用有效的溝通策略與允許師生反思與後設認知的歷程。學習環境也需有潛在基本的慣性與秩序，例行性行為與過程是需要學校保障其穩定的。人需要經常與他人互動，人與人之間的結合象徵一種穩定、情感關懷與持續性(Caine & Caine, 1997)。

越是豐富的經驗，就有越深入的過程；越多真實目的與意義的參與，就會有越深邃與持續的學習。在經驗證實過程中自己會獲得動能，本質上也會透過不斷更深層的追求來履行與實現；因此這過程再進一步延伸無限可能也促進對卓越的追求。這並非一種命令或機械性的結果，而是意義學習帶來的自然享受結局。

第二節 運動與大腦

本節文獻探討中，研究者將針對運動如何影響大腦認知的機制作探討。其說明如下：

壹、運動對大腦的影響

流行病學及臨床研究報告指出，長期規律運動可以提升及維持大腦的功能；亦即降低憂鬱、抵抗壓力、提高正面情緒、延緩神經退化性疾病或老化所導致的認知功能喪失及促進學習與記憶(Amelia R.N. et al. 1999, Russo-neustadt A. A. et al. 2000, Laurin D. et al. 2001, van Praag H. et al. 1999)。雖然，運動是透過何種機制來影響大腦的功能，目前仍需進一步的實驗證實。但是已有許多實驗和發現，運動和大腦的認知有關係，其中 Chodzko-Zajko W. J.與 Moore K. A. (1994) 提出大腦循環假說(cerebral circulation hypothesis)、神經營養刺激假說(neurotrophic stimulation hypothesis)、神經效率假說(neural efficiency hypothesis)三個可能解釋運動改善老化認知功能的機轉：大腦循環假說是指規律運動可以改善大腦血液循環，讓腦神經獲得較充分的氧氣與葡萄糖供應，減緩大腦區域的低氧狀態；神經營養刺激假說是認為運動可以改善神經傳遞物質的合成與分解，有助於中樞神經功能的維護；神經效率假說則是認為運動可以維持老年人中樞神經系統處理效率。從運動對腦功能的研究發現亦可呼應這些假說，運動會在身體和大腦中產生一些化學物質，有血清素(serotonin)、正腎上腺素(norepinephrine)、腦內啡(endorphin)、多巴胺(dopamine)、腦源神經營養因子(brain-derived neurotrophic factor, BDNF)，中腦源神經營養因子(BDNF)與促進認知能力有關(Fordyce & Farrar, 1991)。此外亦有研究發現運動有助於神經細胞的可塑性(plasticity)，產生構造上的改變而有所不同(van Praag H. et al. 1999a)。

貳、運動與大腦的關係

一、大腦需要氧和養分

人類大腦在運作時約用到身體總能源的百分之二十，當大腦整個動起來的時候，每單位細胞重量所用的能量比盡全力奔跑的四足動物還多，所以大腦需要消

耗很多的葡萄糖。血液在運送氧分即葡萄糖到細胞組織時也同時運送氧，當腦細胞吸取葡萄糖時，細胞內的化學物質會把葡萄糖分子結構拆散來吸取糖能量，此過程使葡萄糖分子中的原子扯散釋放出電子，而這些電子即為廢料，若不理會這些電子，則會聚集到其他分子上，轉換成人類身上所知最毒的物質「自由基(free radicals)」；而氧會吸收多餘的電子，經過化學作用轉換成二氧化碳，讓血液運送到肺代謝出去。當大腦缺氧超過 5 分鐘，就會因沒有即時提供吸收有毒電子的氧，會使毒物累積造成永久性的傷害(洪蘭譯，2009)。

二、運動使大腦更容易得到氧和養分

運動本身並不提供氧和養分，但是會讓身體比較容易取得氧和養分；運動會增加流過身體各部位細胞組織的血液並刺激血管增加其流量，當血流量變大時，身體所製造的新血管更深入身體組織，使血液中所攜帶的氧和養分更容易送到身體各角落。由腦造影的研究發現，運動增加海馬迴(hippocampus)中齒迴血管的血流量，海馬迴跟記憶的形成有關，血流量增加可能會造成新的微血管增加，新的微血管使大腦神經細胞得到更多的氧和養分(洪蘭譯，2009)。也就是大腦循環假說所認為的，規律運動可以改善大腦血液循環，讓腦神經獲得較充分的氧氣與葡萄糖供應，減緩大腦區域的低氧狀態 (Chodzko-Zajko W. J.& Moore K. A., 1994)。

三、運動誘發大腦神經新生

(一)大腦神經新生現象

在二十世紀初期，科學家普遍認為成年後的哺乳動物之中樞神經系統，神經元只有逐漸減少，沒有修補再生能力。Altman & Das(1965)首度報導成年大鼠的海馬迴區域有神經再生現象(Altman & Das, 1965)。Kaplan 等(1977)利用電子顯微鏡觀察大鼠腦內神經新生現象，發現在大鼠腦中的 dentat gyrus 及嗅球的 granule cells 有新分裂的細胞，因此確定了在成年哺乳類動物中，具有神經新生的能力。Kaplan 在大鼠的研究繼之發現，除了嗅球(olfactory bulb)、海馬，還有視覺皮質都有神經新生的現象。由於成熟的神經元是沒有辦法分裂的，而成年哺乳類動物的中樞神經系統具有神經幹細胞(neural stem cells)，因此神經新生的現象被認為是由中樞神經系統的神經幹細胞所

生成。隨著神經科學發展，Gould et al.(1998)在猴腦中利用胸腺核苷的類化合物-溴化去氧尿嘧啶核苷酸(bromodeoxyuridine, BrdU)及幾種神經標誌劑雙重染色，結果亦證實在哺乳類動物中樞神經系統，的確具有神經新生的現象。雖然大腦中樞系統中的神經幹細胞在很多腦區都存在，但是神經新生現象卻只在特定的腦區被發現：嗅球、側腦室旁區(subventricular zone)與海馬迴的齒迴內側區(subgranular zone)（陳怡潔，2006；張雅婷，2007）。

(二)神經生長因子 BDNF 和神經新生的關係

成年的神經幹細胞會受很多生長因子的調控，其中最重要的生長因素大腦神經生長因子(brain-derived neurotrophic factor, BDNF)，BDNF 為大腦中含量豐富的神經滋養因子，分佈於大腦皮質、海馬迴、杏仁核(amygdale)、黑質區(substantia nigra)等腦區，為神經滋養因子家族(neurotrophin family)其中一員(Conner et al.1997)，這種蛋白質使已經存在的細胞保持年輕和健康，使其和別的神經元更容易相連結，可以調節神經介質傳導，參與神經元生長與分化過程，促進大腦的新細胞形成，其分泌之多寡也和憂鬱症、學習與記憶的形成等有密切的關係(Karege F. 2002, Egan M. F. et al. 2003, Tyler W. J. et al. 2002, Mizuno M. et al. 2003)。

在細胞培養的實驗中給予 BDNF 會增加神經細胞的生長和存活(Naylor et al., 2005)。在動物實驗中，若注射 BDNF 於腦室，會增加神經新生的現象(Pencea et al.,2001)。大腦中對 BDNF 最敏感的細胞是海馬迴的細胞（陳怡潔，2006；李嘉宜，2007；洪蘭譯，2009；Kempermann et al. 1997, van Praag et al., 1999)。亦有研究發現在海馬迴齒迴區，BDNF 在神經細胞中會促進齒迴區的神經新生、神經元的可塑性增加、增進長期增益效用(long-term potentiation, LTP)及維持神經細胞生存，在突觸可塑性(synaptic plasticity)中扮演重要角色，並參與學習和記憶的形成過程(Karege et al.2002)。

(三)運動和神經新生的關係

神經營養刺激假說是認為運動可以改善神經傳遞物質的合成與分解，有

助於中樞神經功能的維護(Chodzko-Zajko W. J.& Moore K. A., 1994)。目前越來越多的證據顯示 BDNF 可能參與運動促進大腦功能之中，因為運動會增加海馬迴內 BDNF 的濃度，如上述，BDNF 可促進大腦神經新生，故此推測運動可以藉由促進 BDNF 基因表現來影響大腦功能(陳鐸丰，2004)。運動會誘發抗老化基因的表現、增加神經的可塑性，並且活化神經元的訊號傳遞(陳怡潔，2006；Cotman et al.2002, Gomez-Pinnila et al. 2004, Molteni et al.2002)。近來的研究發現多樣的外在環境和運動，皆使小鼠的海馬迴有神經新生現象(Kempermann et al. 1997, van Praag et al., 1999)。Cotman 等人研究發現小鼠在經過三周及四週的滾輪運動，BDNF 蛋白質的表現有顯著增加，而其表現可以維持一個星期(Berchtold et al., 2005)。此外大鼠在經過自發性滾輪運動後，海馬迴中 BDNF 表現量會增加，且與運動量呈現正相關(Karege et al.2002)。國內最近研究亦有相同的證據顯示運動促進腦神經細胞新生的現象，陳怡潔(2006)觀察小鼠在跑跑步機運動後是否誘發腦部海馬迴齒迴區域的神經新生，結果顯示，經過二、五、八週的跑步機訓練後，C57BL/6J 小鼠海馬迴齒迴區的新生細胞數目比控制組多，且在訓練五週後，其新生神經細胞數達到最大量。

叁、運動影響學習發展

(一)BDNF 之於突觸可塑性(synaptic plasticity)的重要性

研究指出 BDNF 在突觸可塑性(synaptic plasticity)中扮演重要角色，並參與學習和記憶的形成過程(Karege et al.2002)；BDNF 於細胞本體合成後分裝並儲存至突觸小泡(synaptic vesicle)。當動作電位產生，細胞膜電位去極化(depolarization)，大量的鈣離子流入細胞內，突觸小泡與細胞膜融合而促使 BDNF 釋放，作用在位於突觸前或突觸後的受體 tyrosine receptor kinase B(TrkB)並活化之，可以促進突觸前神經細胞釋放更多的神經傳遞物質，增加突觸後細胞對於神經傳遞物質的敏感性、細胞膜的興奮性，或是修飾突觸的型態，進而提升突觸的效益(Schinder A. F. et al. 2000)。而大腦中對 BDNF 最敏感的細胞是海馬迴的細胞，海馬迴與人類的記憶相關，而記憶是人類認知功能的重要部件(陳怡潔，2006；李嘉宜，2007；洪蘭譯，2009；Kempermann

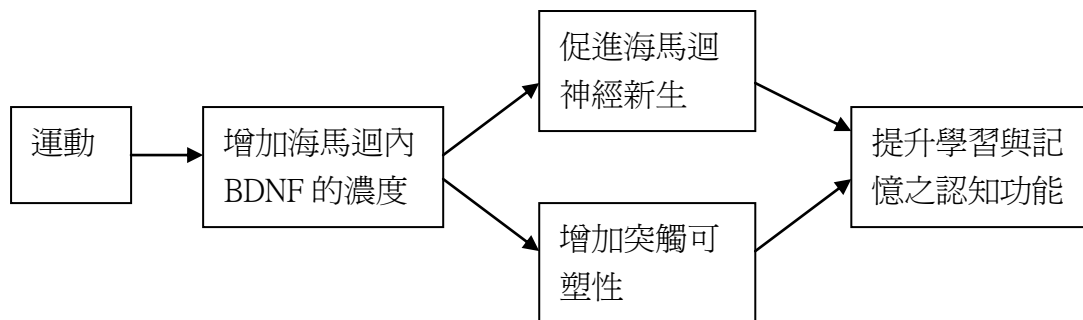
et al. 1997, van Praag et al., 1999)。可見 BDNF 在神經新生、學習和記憶能力扮演著重要角色。

(二)運動促進 BDNF 基因表現影響大腦認知功能

國內外研究均顯示運動增加海馬迴內 BDNF 的濃度，越來越多的證據顯示 BDNF 是參與運動增進大腦功能的因子之一(陳怡潔，2006；Cotman et al.2002, Gomez-Pinnila et al. 2004, Molteni et al.2002)。van Praag H. (1999)等人在動物實驗中觀察到，老鼠經過數天的滾輪運動後，於摩理斯水迷宮 (Morris water maze)中表現較佳的空間學習能力，並且海馬迴中細胞進行分化(cell proliferation)以及有新的神經生成(neurogenesis)(van Praag et al., 1999)。國內亦有相似研究指出經過四週中度運動訓練的老鼠在水迷宮有較佳的表現，且運動後訓練後的 BDNF 均顯著增加，發現運動訓練可能會促進空間學習，這可能是透過不斷地刺激 BDNF 表現量增加活化其下游訊息傳遞路徑，而促使學習與記憶能力增強 (陳鏞丰，2004)。

運動在人類認知表現上的研究發現，小學生一週只要慢跑二到三次，每次三十分鐘，十二週以後他們的認知表現就比慢跑前進步很多，當運動停止後，他們的成績又退回到慢跑之前的程度(Sibley B. & Etnier J. ,2003; 洪蘭譯，2009)，故運動可能對認知表現有所影響。

綜合上述文獻，研究者將運動影響大腦認知學習的機制流程圖呈現如下：



圖一 運動提升學習與記憶之認知功能機制圖

