

能動者的認知控制： 大腦輔助運動區 在音樂活動中的重要性

蔡振家

摘 要

2018 年有一篇腦造影研究指出，人們在聆聽音樂時某個腦區的活化，可以預測其未來學習樂器的成效，這個關鍵的腦區即為額葉上方中央的輔助運動區。本文根據腦科學文獻，釐清輔助運動區的多元功能，重新檢視音樂演奏、聆聽、創作，以及音樂治療之間的關係。音樂活動不僅可以強化運動功能，也能強化許多執行控制功能，包括注意力控制、抑制控制、工作記憶、序列處理，以及認知靈活性。在即興演出時，這些功能特別會跟自我意志緊密結合，讓音樂演出者成為能動者，以極具創意又妥善組織的音樂，來表達個人意圖。在這種音樂活動中，輔助運動區扮演著關鍵角色。

關鍵詞：認知科學、音樂與大腦、即興、意志、動作控制

*本篇文章為認知科學領域，採用 APA 格式。

Cognitive Control in Agents: On the Importance of Supplementary Motor Area in the Brain for Music Activities

Chen-Gia TSAI

Abstract

A brain imaging research published in 2018 showed that the activation of a brain region when people listen to music can predict their future performance in learning a musical instrument. This key brain area involved is the supplementary motor area located in the superior and medial aspects of the frontal lobe. Based on the literature of brain science, this article reviews the multiple functions of the supplementary motor area and clarifies the relationships between music performance, listening, creation, and music therapy. Music activities not only stimulate motor functions, but also enhance executive control functions, including attention control, inhibitory control, working memory, sequence processing, and cognitive flexibility. These functions are further integrated with volition in musical improvisation, which transforms the role of musical performers to creative “agents” when they can more fully express themselves through structured music. The supplementary motor area plays a key role in this music activity.

Keywords: cognitive science, music and the brain, improvisation, volition, motor control

* This article, written on the subject of cognitive science, uses APA format.

一、前言

瞭解學生演奏樂器的天分高低，在音樂教學中相當重要，近年的腦科學研究，為演奏天分的「測量」帶來新的方向。2018 年發表於《美國國家科學院院刊》（*Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*）的一篇論文指出，人們在聆聽音樂時的腦部活化型態，可以預測其未來學習樂器的成效（Wollman, Penhune, Segado, Carpentier, & Zatorre, 2018）。這項研究招募了十三位未曾正式學過音樂的受試者，讓他們接受一個月的訓練，學習演奏大提琴，結果發現：假如個體在訓練前聆聽大提琴音樂¹時的前輔助運動區（pre-supplementary motor area）活性較高，則他在訓練後的演奏品質較佳；反之，假如他在訓練前聆聽音樂時前輔助運動區活性較低，則訓練後的演奏品質較差。

這項實驗結果的涵義相當深刻，也許腦造影技術可以用來預測每個人在各領域的學習成效，在不遠的將來，腦造影資料甚至可能成為機構選才、個人生涯規劃的參考。筆者曾經在大學的通識課中介紹以上這篇腦科學論文，學生們對此提出了許多看法。首先，絕大多數的人認為，隨著科技的進展，腦造影技術、基因檢測都能提供越來越可靠的資訊，讓人們預測未來的學習成效與身體變化，這是必然的趨勢。有學生指出，在中小學已經做過許多次性向測驗，其結果可以作為選擇科系或職業的參考，而較先進的腦造影技術與基因檢測，可以視為更客觀、更準確的性向測驗，不必對此感到大驚小怪。另外有學生認為，如果早點知道自己不適合學習演奏樂器，可以避免浪費時間與金錢。

雖然人們預測未來的能力與日俱增，但是使用冰冷的腦造影技術來測量音樂天分，畢竟頗具爭議性，此議題引起許多學生的疑慮。筆者對學生的意見做了整理、歸納之後，將這些疑慮分成以下三個面向。第一，在現代社會，任何冠上新興科技的東西，都有可能遭到商人扭曲，都有可能被大眾誤解；用來「檢測天分」的腦造影技術一旦普及，人們可能未蒙其利，先受其害。第二，若藉由科學檢測來預測個體的未來，以至決定其發展方向，很可

¹ 這些音樂也是這些受試者將要學習的音樂，總共有四段，每一段有五個音。

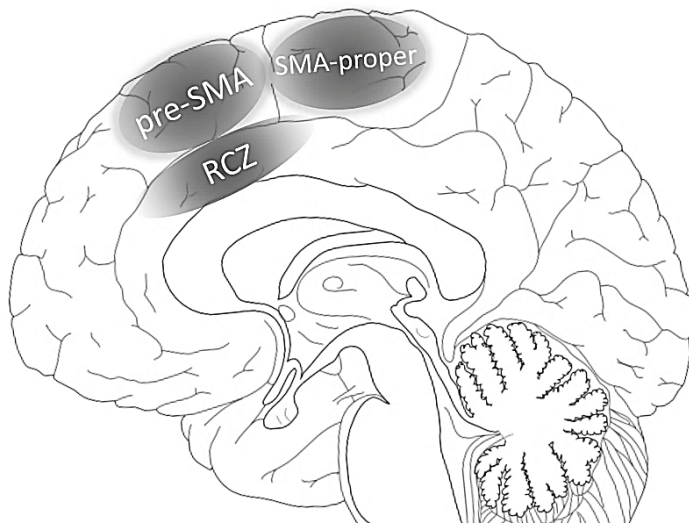
能會影響個體的選擇自由。舉例而言，現在有許多家長希望為小孩安排人生，腦造影技術可能會讓家長掌握更強大的工具，進一步去限縮小孩的自主性。第三，許多因素都會影響未來，故科學檢測有其不準確性，但如果個體知道了檢測結果，可能會低估其不準確性，過度相信檢測結果的「預言」，而自我設限。舉例而言，若某個人很想學習演奏某一項樂器，但是腦造影結果預測其未來的學習成效較低，他得知後可能會大受打擊，往後學習演奏樂器時，可能有揮之不去的心理陰影。另外有學生指出，學樂器的樂趣之一在於享受過程，如果只因為最後的成效較低，便剝奪其享受學習過程的權利，未免太不公平。因此也有學生指出，就算腦造影檢測可以預測未來的學習成效，但如果檢測結果會澆熄學習熱情，他寧願一開始就不知道自己的檢測結果，繼續勇敢追夢。

有些科技就像潘朵拉的盒子，暗藏種種禍害，但也帶來新的希望。筆者在通識課介紹以上的腦科學論文，除了想要引起學生的關注與討論之外，更重要的教學目標，是想要強調大腦的可塑性（**plasticity**）。大腦在環境、經驗、訓練等各種影響下，會產生功能與結構上的改變，此即神經可塑性。雖然聽音樂時的腦部活化型態可以預測未來學習樂器的成效，但聆聽音樂的習慣是可以改變的；如果在學習演奏之際（或之前），認真去調整聽音樂的方式，或許就能提升前輔助運動區的活性，讓往後的學習更有效率。從這個觀點來看，腦科學研究其實是在提醒我們，學習演奏的一大關鍵是聆聽音樂、處理訊息的方式。本文將探討聽音樂時的序列處理（**sequence processing**）跟學習演奏的關係，還有認知控制（**cognitive control**）跟學習爵士樂的關係。筆者認為，音樂教育或許應該加強訓練學習者的前輔助運動區，讓它在各種音樂活動中，都能妥善發揮功能。

人類的大腦皮質分為幾個腦葉，包括額葉、頂葉、顳葉、枕葉，在額葉後上方的正中間，接近頭頂心的腦區，即為輔助運動區（**supplementary motor area**，以下簡寫為 **SMA**）。**SMA** 可以分為兩個部分，後區稱為輔助運動區本體（以下簡寫為 **SMA-proper**），前區稱為前輔助運動區（以下簡寫為 **pre-SMA**）。雖然目前已知 **SMA** 掌管許多認知功能，有些功能跟運動並沒有直接的關係，但是在 1950 至 1970 年代，神經科學家把 **SMA** 視為腦中運動區的一部分，因為它在動作的執行、計畫、控制中，皆扮演關鍵角色（Orgogozo & Larsen, 1979; Penfield & Welch, 1951）。另外，當前輔助運動區活化時，緊鄰

於其下方的喙部扣帶區（rostral cingulate zone 以下簡寫為 RCZ）也經常同時活化（參見【圖 1】），故在本文中也一併探討。

【圖 1】人類大腦的正中矢狀切面（midsagittal plane），圖的左方為前額。輔助運動區（SMA）分為輔助運動區本體（SMA-proper）與前輔助運動區（pre-SMA），其下為喙部扣帶區（RCZ）。本文作者根據以下網址之圖片修改重製：<http://www.clker.com/clipart-brain-31.html>。



本文有兩個主要的研究目的。第一，根據目前的腦科學文獻，釐清 SMA 與 RCZ 的功能。第二，藉由探討 SMA 與 RCZ 的功能，重新檢視音樂演奏、聆聽、創作（包括即興），以及音樂治療之間的關係，進一步瞭解學習音樂對於個人心智功能的廣泛效益。筆者將指出，音樂活動可以讓個體強化運動功能與認知功能，並且讓這些功能跟自我意志緊密結合，這些效益都跟 SMA 及 RCZ 有關。

二、感覺動作處理

在大腦額葉中，越靠後方的腦區越單純，跟動作執行有關，越往前方則越高階，跟動作的計畫與決策有關。額葉中最低階的腦區是初級運動皮質

(primary motor cortex)，當我們想要進行一項動作時，位於初級運動皮質前方的前運動皮質 (premotor cortex) 先計劃動作，然後送到初級運動皮質去執行。在 SMA 裡面，SMA-proper 較低階而 pre-SMA 較高階。SMA-proper 的神經纖維直接投射到初級運動皮質、前運動皮質，因此跟動作的執行密切相關。相對的，pre-SMA 跟前額葉皮質有較多的神經連結，因此掌管較高階的功能 (Cona & Semenza, 2017)。

當我們在控制動作時，通常涉及了感覺動作處理 (sensorimotor processing)，這種訊息處理整合了動作指令以及相關的感覺訊息 (包括聽覺、視覺、觸覺等等)。舉例而言，我們在演奏樂器時若聽到聲音不對勁，就要去調整動作，讓產生的聲音能更加符合自己的期望；此外，當我們聽到極具動感的音樂時，身體會跟著拍子而律動。這類控制動作的能力，都跟 SMA 的感覺動作處理密切相關 (Schaefer, Morcom, Roberts, & Overy, 2014)。有些人在演奏樂器時不太留意自己所產生的聲音，甚至常常無法察覺錯音，這種人可能沒有善用 SMA 來監控自己的演奏，究其原因，可能是他缺乏演奏音樂的意圖 (intention)。當我們根據自己的意圖，執行某個動作之後，通常會察覺該動作造成的後果，從而產生運動主體感 (sense of agency，又稱為主導感、能動感)。運動主體感讓人們清楚知道，剛剛做這個動作的人就是我自己 (Seghezzi, Zirone, Paulesu, & Zapparoli, 2019)。倘若學習演奏者缺乏內在動機，只是照本宣科，沒有根據自己的意圖去產生音樂，如此一來，這位學習者可能會缺乏運動主體感，不太在意產生這個聲音的人就是自己。從腦科學的角度來看，這種人的 SMA 在演奏時比較不會去進行感覺動作處理。

認知科學家在一篇有關 SMA 的回顧論文中指出，各個面向的證據都顯示，SMA 整合了動作訊息與相關的視覺、聽覺訊息 (Lima, Krishnan, & Scott, 2016)。第一，在有關手部抓握動作和臉部表情的實驗中，無論是自主產生動作或觀看他人做出同樣動作時，SMA 都會活化。第二，在聆聽諸如笑聲之類的情感發聲時，以及自己在進行同樣動作時，SMA 都會活化。第三，聽音樂和演奏 (演唱) 音樂都會導致 SMA 活化，而且在聆聽音樂時，音樂家的 pre-SMA 活化比非音樂家更強。第四，音樂演奏家、芭蕾舞、運動員的 SMA 結構跟一般人不太一樣，這可能是因為他們一直在鍛鍊 SMA 的感覺動作處理功能，花費多年時間在發展能產生特定感覺後果 (sensory consequence) 的動作指令集，故導致 SMA 的灰質體積增加。第五，有關語音的研究顯示，

SMA 參與了語音的理解及產生，特別是當語音處理變得困難時（例如背景噪音變大時），或在講話時需要專心監控語音錯誤時，SMA 活化都會增加，這反映了該腦區在預測聲音與動作控制上所扮演的重要角色。

前運動皮質與 SMA 構成了大腦的前運動區，它們都可以預測動作指令所造成的聲音，但功能不太一樣。前運動皮質與顳平面（*planum temporale*）構成了聽覺背側路徑（*auditory dorsal pathway*），該路徑可以視為「聲音／動作」的轉譯及整合介面（Hickok & Poeppel, 2007）。至於 SMA，則傾向根據之前的訊息來預測下一個訊息，並且將序列訊息做適當的組織，也就是序列處理。

本文開頭提到一項腦造影實驗，該實驗發現，聆聽音樂旋律時 pre-SMA 較活化的人，學習演奏的成效較佳。該文作者（Wollman et al., 2018）在解釋此結果時指出，有些受試者可能在學習演奏之前，就已經讓運動系統和聽覺系統之間有密切的連繫，因此他們的 pre-SMA 活性較高，之後的學習成效也較佳；此外，這些受試者雖然不是音樂家，但 pre-SMA 的活化「可能反映了非專家將聲音映射為動作的基本能力，從而促進了複雜的聲音感覺動作序列（*audio sensorimotor sequence*）之後續表現」²（p. E6061）。這裡所說的感覺運動序列，是指演奏大提琴時的聲音序列與動作序列。

筆者不太同意上述解釋，理由有二。第一，將聲音直接映射為動作，這種單純的能力跟 SMA-proper 比較相關；相對的，其活性可以預測學習成效的 pre-SMA，能以較具彈性的方式來組織聲音與動作，功能更高階。SMA-proper 與 pre-SMA 的功能，不應該混為一談。第二，該實驗中所有的受試者，聆聽音樂時聽覺背側路徑與 SMA-proper 的活化，都在學習大提琴演奏的過程中顯著增加，反映他們逐漸學會將特定的聲音跟動作聯繫在一起，然而該實驗發現，只有學習成效特別好的人，才會在學習演奏之前額外招募 pre-SMA 來聽旋律。由此看來，pre-SMA 的活化應該不是反映了將聲音映射為動作的基本能力，而是少數人才有的某種能力。筆者認為，沒有學過樂器的人，多半能將聽到的旋律映射為哼唱動作，這是將聲音映射為動作的基本能力，但僅有少數人擅於組織這些序列訊息，掌握整體旋律，這種人在學習演奏之前會善用 pre-SMA 來聽音樂，日後學演奏的成效也比較好。

² 引文中譯出自本文作者。

三、聽覺想像

大腦的前運動區可以預測動作指令所造成的聲音，即使這個指令僅停留在準備階段，未付諸執行，所預測的聲音依然歷歷可聞，此現象即為我們所熟悉的聽覺想像（auditory imagery）。人類的聽覺想像主要有兩種：語音想像、音樂想像，不管是說話或唱歌，我們都要預測動作指令所造成的聲音（Rauschecker, 2011）。如果實際的聲音符合預期，就可以忽略；若不符合預期，則需要修正動作指令。有趣的是，這種預測能力也讓我們可以在腦中想出聲音。

過去的研究發現，無論是在腦中想像熟悉的歌曲（Herholz, Halpern, & Zatorre, 2012），或是想像熟悉的交響曲（Zhang, Chen, Wen, Lu, & Liu, 2017），SMA 都會活化。在想像演奏樂器時，SMA 整合演奏所需的多模式信息，藉以構建音樂演出的內部表徵（internal representation）（Tanaka & Kirino, 2017）。然而綜覽多項聽覺想像的實驗結果可知，當我們在寂靜之中想像聲音（包括語音）時，SMA 未必會活化（McNorgan, 2012）。因此，SMA 可能只涉及聽覺想像的部分面向，它並沒有掌管最基本的聽覺想像功能。

音樂心理學家指出，音樂想像可以分為三種：自主想像、非自主想像、預期想像（Williams, 2015）。自主想像主要是指回想音樂的能力，幾乎每個人都能在腦中召喚出熟悉的音樂，另外，有些音樂家可以想像不熟悉的音樂，例如看到樂譜就能想出聲音，或是在創作時想像新的音樂作品。至於音樂的非自主想像，則是指腦中自動跳出音樂，不受控制的想像，包括耳蟲（earworm）與音樂幻覺（musical hallucination）。語音想像同樣也可以如此分類。有研究發現，跟非自主的聽覺想像（如：語音幻覺）相比，pre-SMA 在自主的聽覺想像過程中活性更高，並且在聽覺皮質活化之前便已活化（Linden et al., 2011）。此結果顯示，pre-SMA 可能涉及聽覺想像的自主啟動，包括意圖的興起。

除了自主想像之外，音樂的預期想像也需要 SMA 的參與，這牽涉到它的序列處理功能。研究顯示，受試者背下某個旋律之後，讓他們聽到前半段旋律再想像後半段旋律時，會導致 SMA 活化增加（Leaver, Van Lare, Zielinski, Halpern, & Rauschecker, 2009）。當我們聽到一首熟悉的歌曲時，會根據前一

段旋律來預測下一段旋律；當我們在背一段文章或詩詞時，也常常要根據前一句來想出下一句。這些例子都顯示出預測想像跟序列處理的關係。

有一種特殊的音樂想像方式，是在聆聽非旋律性的打擊樂時，想像念出這種音樂的口語版本。在許多音樂文化中，都會以口語來模仿非旋律性的打擊樂，例如爵士鼓、印度塔布拉鼓（tabla）、中國戲曲鑼鼓等。該音樂文化中的人，在聆聽這種音樂時會同步想像念誦，在腦中整合聽到的聲響跟想像的口語版本。針對爵士鼓手和戲曲學習者的腦造影實驗發現，當他們跟著打擊樂聲響在心中默念相同鼓點時，聽覺背側路徑都會活化，這反映他們都把默念動作轉譯為語音。有趣的是，戲曲學習者跟著鑼鼓音樂聲響在心中默念鼓點時，pre-SMA 的活性顯著增加，而爵士鼓手則無此現象（Tsai, Chen, Chou, & Chen, 2010; Tsai, Fan, Lee, Chen, & Chou, 2012）。筆者認為，當爵士鼓手跟著爵士鼓聲響在心中默念固定重複的鼓點時，主要是靠聽覺背側路徑將聲音轉譯成動作，因此不需要 pre-SMA 去做序列處理；戲曲學習者聽到鑼鼓時，一方面靠聽覺背側路徑將聲音轉譯成動作，另一方面，由於鑼鼓點隨時有可能轉換，所以要招募 pre-SMA 去做預測與監控，以較具彈性的方式，對音樂訊息做序列處理。之前提到，音樂家在聽音樂的時候，SMA 的活性比非音樂家更高，這可能也是因為音樂家比較擅長對音樂訊息做序列處理。

四、序列處理

針對散布於各個時間點的訊息，收訊者如何妥善組織這些訊息，讓它們產生整體意義，進一步引導自己的行動，這是序列處理的主要內涵。最基本的音樂序列概念，可能是兩個音高所形成的序列，也就是旋律音程。腦造影實驗發現，要求受試者根據簡譜想像旋律音程時，SMA 活化增加（Tsai, Chou, & Li, 2018）。音樂教育家徐頌仁（Hsu, 2001）指出，讓音樂的初學者建立音程概念，對於往後的音樂序列處理及演奏時的感覺動作處理都很重要：

小孩子的第一堂音樂課應該是音程，而不是音名與其位置或指法的認識。因為音程的學習有如走路，站好了再踏下一步。沒有音程的嚴格視唱訓練，將來他們演奏出來的音樂恐怕只會是沒有指向的原

地踏步走。許多音準上的問題也出在這裡，因為許多人以為音名、指法對了，音準就不是問題，而不懂得用耳朵去聽。(p. 37)

筆者認為，以上這段話可以從 SMA 的功能去理解。SMA 的主要功能是序列處理，它也處理旋律音程；從基本運動功能來看，SMA 確實跟走路時雙腳的流暢運動與身體平衡的保持有關 (Goel et al., 2019; Potgieser, de Jong, Wagemakers, Hoving, & Groen, 2014)。再者，學習者若針對個別的音去死記其絕對音高與指法位置，可能會見樹不見林，若因此而沒有養成使用 SMA 去掌握音樂整體的習慣，久而久之，學習者演奏出的音樂可能會缺乏自然流動的韻律，同時也無法在旋律句法的框架下，以 SMA 的感覺動作功能，去控制弦樂器與管樂器的音準（特別是純律下的音高與和聲），以及細微的時間彈性。

序列處理除了跟聆聽技巧有關，也跟演奏有關。一篇刊登於《自然回顧：神經科學》(*Nature Reviews Neuroscience*) 的論文，探討演奏音樂時的大腦神經機制 (Zatorre, Chen, & Penhune, 2007)。文中強調，演奏音樂需要執行妥善組織的動作，在音高與時間上做精確的控制，其中前運動皮質主要參與聽覺與動作之間的映射，SMA 則參與了較高階的訊息組織，也就是序列處理。在 SMA 裡面，SMA-proper 可能把幾個動作整合為一個組塊 (chunk)，而 pre-SMA 可能進一步去組織這些組塊，掌握其階層關係。

無論是演奏動作或音樂和聲，在處理這些訊息時常常要進行集組 (chunking)，也就是將幾個組塊合併為一個較大的組塊。我們在學習、記憶演奏動作時，有時會練習把幾個子動作結合在一起；我們在分析樂曲之前，會先記熟三、四個和弦所形成的慣用和聲進行。掌握這類組塊之後，處理複雜序列訊息時會更有效率。過去的研究指出，pre-SMA 跟組塊的選擇與啟動有關 (Kennerley, Sakai, & Rushworth, 2004)；因此，若 pre-SMA 受損，會影響一連串複雜動作的執行，簡單動作則不受影響 (Cona & Semenza, 2017)。

從集組這個概念可知，序列處理經常要在非相鄰的訊息之間，建立彼此的依賴關係，藉此掌握序列的內在結構。人類的語言跟音樂都有複雜的內在結構，一句話中的各個詞彙，常先組合為名詞短語 (noun phrase)；同樣地，音樂進行中，常會在骨幹音或和弦之間插入一些裝飾（如：在某個和弦之前添加倚音和弦）。分析樂曲的要領之一，是能切換至較宏觀的視角，暫時忽略裝飾性的細節，去掌握非相鄰音符或和弦之間的關係。以上這些結構特性，

或許是 pre-SMA 參與語言和音樂之理解和預測的原因 (Babajani-Feremi, 2017; Brown, Martinez, & Parsons, 2006; Dietrich, Hertrich, Seibold, & Rolke, 2019)。

在許多歌謠中，上句 (antecedent) 接下句 (consequent) 的結構，牽涉到旋律與和聲的序列處理，這種句法的處理可能跟 SMA 有關。就旋律而言，上句跟下句的前半段通常相同，pre-SMA 可能會將上句與下句的前半段聯繫在一起。在和聲方面，上句的後半段為半終止式，下句的後半段為正格終止，上句與下句的前半段都環繞著主和弦，pre-SMA 可能會將這兩個主和弦聯繫在一起，跳過其間的半終止式；另外，pre-SMA 可能會將上句後半段的半終止式，跟下句後半段的正格終止聯繫起來。在這種規律句法中，半句 (通常是二小節) 可以形成小組塊，SMA-proper 處理該組塊內前一個音跟下一個音的連結，pre-SMA 則以較宏觀的方式來組織上句與下句中的小組塊。有研究指出，SMA-proper 傾向自動處理一秒以內的序列訊息，訊息單元之間的連結較死板；pre-SMA 則能以較具彈性的方式，去整合、操縱橫跨數秒的幾個組塊 (Schwartz, Rothemich, & Kotz, 2012)。

序列處理的另一個重點，是能夠為個別訊息的時間點做編碼，在音樂領域中，這種訊息處理跟拍子、拍節、節奏的知覺密切相關。SMA 在節奏處理中扮演重要角色。過去的研究顯示，若病患在神經外科手術中，其 SMA 遭到移除，則他們無法準確複製學過的節奏 (Halsband, Ito, Tanji, & Freund, 1993)。此外，在一項腦造影實驗中發現，若音樂節奏的拍子與拍節十分清晰，音符的長度比例呈小整數比 (如 1:2、1:3、1:4、2:3)，則 SMA 及紋狀體 (striatum) 的活化較強；反之，若音樂節奏非常複雜，難以預測，則 SMA 及紋狀體的活化較弱 (Grahn & Brett, 2007)。這可能是因為 SMA 及紋狀體需要預測動作，也需要預測拍子的進行，因此對於音樂的穩定拍子與規律拍節十分敏感。SMA 及紋狀體共同表徵了具階層性的拍節結構，以便對時間間隔呈小整數比的節奏做編碼，如此一來，動作時間點的預測會比較自動化，動作的產生也會顯得平順而連貫 (Sakai, Hikosaka, & Nakamura, 2004)。

音樂才能較高的人，通常能夠在較長的音樂段落中，掌握序列中各個訊息的關聯，包括訊息的組塊階層與時間組織。本文開頭提到的腦造影實驗中，學習演奏成效較佳者，在學習之前會善用 pre-SMA 來聽旋律。筆者認

為，他們可能一開始就比較能掌握旋律的句法規律，往後在控制自己的音準與節奏時，會循著旋律、和聲、拍節的整體框架，讓音樂自然流動，因此學習之後的演奏品質較高。

五、認知控制

「學音樂的孩子不會變壞」是一句流傳多年的廣告詞，其真偽不得而知，但筆者認為，如果把這句話改成「學音樂可以增進大腦的認知控制」，其可信度就提高許多，因為認知神經科學的一些研究結果都指出，許多音樂活動都能夠訓練大腦中跟認知控制有關的神經迴路。所謂的認知控制，是指控制自己的行為、注意力、思想，以符合當前的任務目標。認知控制也被稱為執行控制或執行功能，有心理學家指出執行功能的內涵如下：

執行功能使智能夠操弄想法；在行動之前能夠花點時間思考；能夠應付新穎的、無法預料的挑戰；能夠抵制誘惑，保持專注。執行功能的核心是抑制（inhibition）、工作記憶（working memory），以及認知靈活性（cognitive flexibility）。³（Diamond, 2013, p. 135）

這段話首先指出，執行功能可以讓我們想像與計畫行為，預測行為的後果，這部分跟 SMA 的感覺運動處理與聽覺想像有關。接下來，這段話所談到的驚奇訊息（跟預期衝突的訊息）之處理、注意力控制、抑制控制、工作記憶、認知靈活性，則是更複雜的執行功能，本節將指出，這些功能可以讓我們適應複雜多變的環境，面對音樂活動中的種種挑戰，進而樂在其中。

SMA 與 RCZ 在注意力控制中扮演重要角色，這方面的部分證據，來自史楚普作業（Stroop task）的相關實驗。在史楚普作業中，受試者會看到一些色彩詞彙，這些文字以各種顏色呈現，受試者的任務是要能不受字義的干擾，念出文字的顏色。當詞彙所指的顏色與該文字本身的顏色不一致時，受試者為了抑制字義的干擾，把注意力集中在文字的顏色，通常要花費較多的時間與認知資源來念出字體顏色。有一項研究探討音樂訓練對於史楚普作業的影響，結果發現，跟沒有接受音樂訓練的兒童相比，曾接受音樂訓練的兒

³ 引文中譯出自本文作者。

童在進行史楚普作業時，SMA/RCZ 的活性較強（Sachs, Kaplan, Der Sarkissian, & Habibi, 2017）。在參與許多音樂活動時，都需要運用注意力控制與抑制控制。例如在聆聽多聲部音樂時，有時為了專心聽某個聲部，便要調控自己的注意力。在視譜演奏時，有時要特別注意升降記號。這些控制都能讓自己參與音樂活動時，符合當前的任務目標。

工作記憶是執行功能的一環，它包括我們為了某項任務所暫存的短期記憶，以及所提取的長期記憶，這些訊息在工作記憶的平台上可以做整合與操弄。有研究指出，進行工作記憶任務時 pre-SMA 的活性與一般智力（general intelligence）呈現顯著的正相關，這可能是因為聰明的受試者能夠善用該腦區，以減輕認知負擔（Takeuchi et al, 2018）。

序列處理跟工作記憶之所以密切相關，是因為當我們要整合不同時間點的訊息時，必須把它們暫存起來。此外，由於工作記憶的容量有限，故經常要運用集組的技巧，進一步組織序列訊息，以便完成複雜的認知作業（如：理解一段文字或一段和聲進行）。有不少證據指出，腦中的額下回（inferior frontal gyrus）和 pre-SMA 協同處理工作記憶與集組，以支持序列處理（Wiener, Turkeltaub, & Coslett, 2010）；有趣的是，不具絕對音感的音樂家在聽到幾個音高接連出現時，額下回與 pre-SMA 的活性比具絕對音感的音樂家更高（Leipold, Brauchli, Greber, & Jäncke, 2019）。不具絕對音感的音樂家可能有較佳的相對音感，而相對音感的一大特質就是能掌握音高之間的關係，忽略個別音符的絕對音高資訊。筆者認為，具良好相對音感的音樂家在聆聽一連串的音高時，額下回與 pre-SMA 可能將這些資訊暫存在工作記憶的平台上，分析其階層關係，因此這些腦區的活性較高（跟只有絕對音感的音樂家相比）。

除了額下回之外，背外側前額葉（dorsolateral prefrontal cortex）也經常跟 pre-SMA 協同運作，在不確定性較高的情況中，運用認知控制（Taren, Venkatraman, & Huettel, 2011）。不確定性伴隨著可預測性的降低，pre-SMA 跟 RCZ 具有偵錯功能，它可以跟背外側前額葉協同處理預測失準（prediction error）。舉例而言，當我們聆聽調性不穩定的和聲時，pre-SMA 跟 RCZ 可以偵測到調性外的音，因此其活化增加（Alluri et al., 2012; Cheung et al., 2019; Seger et al., 2013）；這些變化音雖然有點出乎預期，但 pre-SMA 與背外側前額葉可以靈活更新調性訊息，以經過音、臨時轉調等概念，去理解這些和弦。

即興演出 (improvisation) 也充滿了不確定性，例如在爵士樂合奏中，時時要面對新穎的、無法預料的挑戰，這些挑戰可導致 SMA/RCZ 活化增加。針對專業鋼琴家的一項腦造影研究指出，背外側前額葉與 SMA 的功能連結 (functional connectivity)，跟即興訓練的時間成正相關 (Pinho, de Manzano, Fransson, Eriksson, & Ullén, 2014)。在另一項腦造影實驗中，主修古典鋼琴的音樂學院學生分別在節奏與旋律上做即興，這些受試者的額下回與 RCZ 在這兩種即興活動中皆活化增加 (Berkowitz & Ansari, 2008)。此外，饒舌歌手在進行歌詞即興時，中央前額葉 (medial prefrontal cortex) 跟額下回、SMA/RCZ 之間的功能連結增加 (Liu et al., 2012)。另有研究發現，音樂家在進行節奏即興演奏時，SMA/RCZ、背外側前額葉、腦島的活化比非音樂家高 (de Aquino, Verdejo-Román, Pérez-García, & Pérez-García, 2019)。

綜合本節所述，筆者認為台灣的音樂教育應該加強創作與即興訓練，例如戲曲音樂、傳統絲竹合奏、爵士樂、嘻哈音樂，以及巴洛克數字低音的實踐，因為這些有創意且蘊含不確定性的活動，比較能鍛鍊學生的認知靈活性。長久下來，這些學生或許會更擅長以認知控制來應付環境變化與挑戰，對於任務目標的本質與實踐目標的步驟，也會有更深刻的理解。近年有項研究指出，若想藉由學習音樂來增進認知控制，即興訓練相當關鍵 (Norgaard, Stambaugh, & McCranie, 2019)。該研究將學生分為兩組，兩組都接受了為期兩個月的爵士樂基本訓練，但只有實驗組被教導即興演奏。兩個月之後，實驗組的八年級學生在認知靈活性方面的得分變高，實驗組的七年級學生在抑制控制方面的得分變高。該文作者強調，學習音樂對於認知功能的增益效果，跟教學的性質與內涵密切相關。

六、自我意志

在動作之前，我們通常會先產生動作背後的意圖，這種意圖的產生，是 pre-SMA 與 RCZ 的重要功能 (Seghezzi et al., 2019)；音樂即興與充滿情感的哼唱，都跟這項功能有關，同時也跟自我意志的展現有關。RCZ 接收了來自腦中邊緣系統 (limbic system) 的情緒訊息與記憶訊息，因此它在音樂即興獨奏時活化增加，可能也意味著對於內心情感狀態的自省 (reflection on

mental states) (Passingham, Bengtsson, & Lau, 2010)。聲樂是人類表現情感的重要方式，在演化過程中，社會性哺乳類發展出自主控制情感發聲的神經迴路，也就是 RCZ；即使人類已經發展出複雜的音樂來進行情感溝通，RCZ 依然參與控制演唱、演奏的音高 (Segado, Hollinger, Thibodeau, Penhune, & Zatorre, 2018)。

德國哲學家叔本華 (Arthur Schopenhauer, 1788-1860) 認為，音樂是通往內在意志 (will) 的唯一路徑，這裡所說的意志，包含了自我本質、情緒、欲望、身體反應等。在認知心理學中，意志 (volition) 是指產生內源性行動的能力，這種行動不同於由環境刺激所導致的行動，而是自己為了追求特定目標所採取的行動，因此跟個體的欲望、價值感有關 (Haggard, 2019)。有神經科學研究指出，SMA/RCZ 的神經元之放電速率變化超過閾值，就會產生意志 (Fried, Mukamel, & Kreiman, 2011)。

音樂、SMA/RCZ、自我意志，這三者似乎有著千絲萬縷的關係。之前提到，學習音樂的動機會影響演奏品質，如果學習者缺乏演奏音樂的內在意圖，只是照譜演奏，這種人可能會缺乏運動主體感，不太在意「剛剛產生這個聲音的人就是我」，因此其 SMA/RCZ 比較不會在演奏時去監控自己的演奏。筆者認為，當演出音樂的人成為主體感強烈的能動者 (agent)，他才比較會運用 SMA/RCZ 的認知控制功能，並且在音樂中表達自我。在社會學中，能動者是指沒有被社會結構完全制約（但不排除其影響），能夠自發行動的個人 (Alexander, Giesen, Münch, & Smelser, 1987)；本文借用這個觀念，用以指涉某些學習音樂的人，並非完全被外在因素（如：學位、證書、比賽名次、父母觀感等等）所制約，而是具有自發性與內在意圖。學習演奏的人，如果在正式學樂器之前，即已具備自發性與內在意圖，也許他在聽音樂時就已經傾向於使用 SMA/RCZ 的認知控制，去注意音樂的序列性質；此外，他也可能有意地跟著音樂默唱，使用 SMA/RCZ 對默唱時的內心情感狀態進行自省。以上猜測，尚待未來的研究來檢驗。

除了音樂教育之外，在音樂治療領域也可以觀察到音樂、SMA/RCZ，以及自我意志的關聯，以下針對妥瑞症 (Tourette syndrome) 與阿茲海默症 (Alzheimer's disease) 稍作討論。

妥瑞症是一種以抽動 (tic) 為主要症狀的運動障礙，動作型的抽動包括眨眼、仰頭、擠眉弄眼，聲語型的抽動包括清喉嚨、模仿環境聲音、口出穢

言。這些短暫的、突然的、強迫性的重覆行為，雖然通常無傷大雅，但仍會使這些病人遭到歧視。妥瑞症可以分為典型（*stereotypic*）與變幻不定型（*phantasmagoric*）兩種（Sacks, 1992），典型的妥瑞症主要表現於抽動，變幻不定型的妥瑞症則常有探索環境與模仿他人的強烈衝動、不按牌理出牌的創意與幽默感、積極的行動力。許多妥瑞人都有敏銳的感官、過人的智力與運動細胞，他們可以成為傑出的作家、科學家、醫生、運動員、音樂家。

長期關注音樂治療的神經內科醫師薩克斯（Sacks, 2008）指出，妥瑞人很適合演奏打擊樂，他們可能具有特殊的音樂才華，表現在節奏強烈且注重即興的音樂種類中（pp. 249-251）。妥瑞人在打鼓時可能會有狂野的即興獨奏，這種演奏動作的產生，伴隨著明顯的衝動與驅力，這跟產生動作型抽動時的心理狀態十分類似。腦造影實驗發現，妥瑞人在抽動之前，SMA/RCZ 活化增加，這可能反映著他想要執行該動作的渴望與衝動（Bohlhalter et al., 2006）。由此看來，妥瑞人的音樂才華，或許也跟 SMA/RCZ 中欲望、意圖的產生有關。薩克斯醫師（Sacks, 2008）認為，妥瑞症讓我們重新思考意志的問題，當這頭創意之獸（妥瑞症）化為音樂時，妥瑞人已經成功結合原始的衝動與可控的自我，享受著比一般人更複雜的雙重人生（pp. 251-253）。

除了妥瑞症之外，阿茲海默症的音樂治療也跟 SMA/RCZ 與自我有關。阿茲海默症是最常見的失智症，患者因為腦中類澱粉蛋白逐漸累積，認知功能退化，對人、事、物的辨認出現障礙，記憶力也會逐漸喪失。許多論文都指出，音樂的介入能夠改善阿茲海默症患者的情緒與認知功能（Leggieri et al., 2019）；比較特別的是，即使患者有記憶障礙，他們在聆聽 10 至 30 歲學會的音樂時，容易想到自己的往事（Baird, Brancatisano, Gelding, & Thompson, 2018）。因此薩克斯醫師（Sacks, 2008）指出，給阿茲海默症患者聆聽他們熟悉的歌曲，是希望藉此讓「通往情緒與記憶的路再度開通」，或是喚起身體動作的記憶與舞蹈反應（pp. 372-374）。

為什麼阿茲海默症患者容易對多年前的熟悉歌曲有反應？解開這個謎的鑰匙，可能藏在大腦的 pre-SMA 與 RCZ。腦造影研究指出，對於熟悉音樂有反應的 pre-SMA 與 RCZ，是阿茲海默症患者腦中較晚萎縮的區域，雖然此處也有類澱粉蛋白累積，但其功能較慢退化（跟其他腦區相比），這可以解釋為何阿茲海默症患者較容易保留音樂記憶（Jacobsen et al., 2015）。筆者認為，上述研究發現還暗示，阿茲海默症患者可能會跟著熟悉音樂一起想像哼唱，

甚至記起相關的身體動作。或許在 SMA 與 RCZ 的運作下，音樂可以讓阿茲海默患者恢復為能動者，讓他們重新享受有焦點、有自由意志的人生。

七、結 論

本文藉由探討腦中 SMA 與 RCZ 的功能，重新認識音樂活動的本質，並且對於音樂教育提出一些建議。音樂活動可以強化 SMA 與 RCZ 的功能，讓個體的運動、感覺、認知，跟情緒表達與自我意志緊密結合。為了達到這樣的效果，音樂教學中應加強演奏（演唱）的想像、音樂聲響的想像，訓練相對音感，讓學習者在拍節與和聲中掌握音樂的句法與呼吸，另外最重要的一點，就是讓學習者在音樂即興中運用注意力控制、抑制控制、工作記憶，鍛鍊認知靈活性，以便有創意地表達自我。

瞭解以上鍛鍊 SMA 與 RCZ 的要領之後，我們可以重新思考本文開頭所提到的腦造影研究（Wollman et al., 2018）。學習演奏大提琴之前，pre-SMA 對於音樂的反應固然預言了未來的學習成效，但是預言並非無法動搖的宿命。由於大腦具有可塑性，因此教育可以改變腦部的活化型態，從而提升學習效率。具體而言，音樂老師可以教導學生，聆聽音樂時應以內在哼唱的方式去模仿旋律，藉此掌握音符之間的關係。一旦學生能夠善用序列處理與執行控制，往後再聆聽音樂時，pre-SMA 的活化可能會增加，演奏樂器時也會更有音樂性。

有關音樂的認知神經科學研究，在教育與臨床上深具應用潛力，期待未來能有更多的跨領域交流，讓音樂活動更符合人性，同時也讓認知神經科學研究更貼近生活。

參考文獻

- Alexander, J. C., Giesen, B., Münch, R., & Smelser, N. J. (Eds.). (1987). *The Micro-Macro Link*. Berkeley: University of California Press.
- Alluri, V., Toiviainen, P., Jääskeläinen, I. P., Glerean, E., Sams, M., & Brattico, E. (2012). Large-scale brain networks emerge from dynamic processing of musical timbre, key and rhythm. *NeuroImage*, 59, 3677-3689. doi:10.1016/j.neuroimage.2011.11.019
- Babajani-Feremi, A. (2017). Neural mechanism underling comprehension of narrative speech and its heritability: Study in a large population. *Brain Topography*, 30, 592-609. doi:10.1007/s10548-017-0550-6
- Baird, A., Brancatisano, O., Gelding, R., & Thompson, W. F. (2018). Characterization of music and photograph evoked autobiographical memories in people with Alzheimer's disease. *Journal of Alzheimer's Disease*, 66, 693-706. doi:10.3233/JAD-180627
- Berkowitz, A. L., & Ansari, D. (2008). Generation of novel motor sequences: The neural correlates of musical improvisation. *NeuroImage*, 41, 535-543. doi:10.1016/j.neuroimage.2008.02.028
- Bohlhalter, S., Goldfine, A., Matteson, S., Garraux, G., Hanakawa, T., Kansaku, K., ... Hallett, M. (2006). Neural correlates of tic generation in Tourette syndrome: An event-related functional MRI study. *Brain*, 129, 2029-2037. doi:10.1093/brain/awl050
- Brown, S., Martinez, M. J., & Parsons, L. M. (2006). Music and language side by side in the brain: A PET study of the generation of melodies and sentences. *European Journal of Neuroscience*, 23, 2791-2803. doi:10.1111/j.1460-9568.2006.04785.x
- Cheung, V. K. M., Harrison, P. M. C., Meyer, L., Pearce, M. T., Haynes, J.-D., & Koelsch, S. (2019). Uncertainty and surprise jointly predict musical pleasure and amygdala, hippocampus, and auditory cortex activity. *Current Biology*, 29, 4084-4092. doi:10.1016/j.cub.2019.09.067

- Cona, G., & Semenza, C. (2017). Supplementary motor area as key structure for domain-general sequence processing: A unified account. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 72, 28-42. doi:10.1016/j.neubiorev.2016.10.033
- de Aquino, M. P. B., Verdejo-Román, J., Pérez-García, M., & Pérez-García, P. (2019). Different role of the supplementary motor area and the insula between musicians and non-musicians in a controlled musical creativity task. *Scientific Reports*, 9, 13006. doi:10.1038/s41598-019-49405-5
- Diamond, A. (2013). Executive functions. *Annual Review of Psychology*, 64, 135-168. doi:10.1146/annurev-psych-113011-143750
- Dietrich, S., Hertrich, I., Seibold, V. C., & Rolke, B. (2019). Discourse management during speech perception: A functional magnetic resonance imaging (fMRI) study. *NeuroImage*, 202, 116047. doi:10.1016/j.neuroimage.2019.116047
- Fried, I., Mukamel, R., & Kreiman, G. (2011). Internally generated preactivation of single neurons in human medial frontal cortex predicts volition. *Neuron*, 69, 548-562. doi:10.1016/j.neuron.2010.11.045
- Goel, R., Nakagome, S., Rao, N., Paloski, W. H., Contreras-Vidal, J. L., & Parikh, P. J. (2019). Fronto-parietal brain areas contribute to the online control of posture during a continuous balance task. *Neuroscience*, 413, 135-153. doi:10.1016/j.neuroscience.2019.05.063
- Grahn, J. A., & Brett, M. (2007). Rhythm and beat perception in motor areas of the brain. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 19, 893-906. doi:10.1162/jocn.2007.19.5.893
- Haggard, P. (2019). The neurocognitive bases of human volition. *Annual Review of Psychology*, 70, 9-28. doi:10.1146/annurev-psych-010418-103348
- Halsband, U., Ito, N., Tanji, J., & Freund, H. J. (1993). The role of premotor cortex and the supplementary motor area in the temporal control of movement in man. *Brain*, 116, 243-266. doi:10.1093/brain/116.1.243
- Herholz, S. C., Halpern, A. R., & Zatorre, R. J. (2012). Neuronal correlates of perception, imagery, and memory for familiar tunes. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 24, 1382-1397. doi:10.1162/jocn_a_00216

- Hickok, G., & Poeppel, D. (2007). The cortical organization of speech processing. *Nature Reviews Neuroscience*, 8, 393-402. doi:10.1038/nrn2113
- 徐頌仁。(2001)。《音樂演奏的實際探討》(第三版)。臺北：全音樂譜。
- 【Hsu, S.-J. (2001). Practical Investigations of Musical Performance (3rd ed.). Taipei: Chuan Yin Music.】
- Jacobsen, J.-H., Stelzer, J., Fritz, T. H., Chételat, G., La Joie, R., & Turner, R. (2015). Why musical memory can be preserved in advanced Alzheimer's disease. *Brain*, 138, 2438-2450. doi:10.1093/brain/awv135
- Kennerley, S. W., Sakai, K., & Rushworth, M. F. S. (2004). Organization of action sequences and the role of the pre-SMA. *Journal of Neurophysiology*, 91, 978-993. doi:10.1152/jn.00651.2003
- Leaver, A. M., Van Lare, J., Zielinski, B., Halpern, A. R., & Rauschecker, J. P. (2009). Brain activation during anticipation of sound sequences. *Journal of Neuroscience*, 29, 2477-2485. doi:10.1523/JNEUROSCI.4921-08.2009
- Leggieri, M., Thaut, M. H., Fornazzari, L., Schweizer, T. A., Barfett, J., Munoz, D. G., & Fischer, C. E. (2019). Music intervention approaches for Alzheimer's disease: A review of the literature. *Frontiers in Neuroscience*, 13, 132. doi:10.3389/fnins.2019.00132
- Leipold, S., Brauchli, C., Greber, M., & Jäncke, L. (2019). Absolute and relative pitch processing in the human brain: Neural and behavioral evidence. *Brain Structure and Function*, 224, 1723-1738. doi:10.1007/s00429-019-01872-2
- Lima, C. F., Krishnan, S., & Scott, S. K. (2016). Roles of supplementary motor areas in auditory processing and auditory imagery. *Trends in Neurosciences*, 39, 527-542. doi:10.1016/j.tins.2016.06.003
- Linden, D. E., Thornton, K., Kuswanto, C. N., Johnston, S. J., van de Ven, V., & Jackson, M. C. (2011). The brain's voices: Comparing nonclinical auditory hallucinations and imagery. *Cerebral Cortex*, 21, 330-337. doi:10.1093/cercor/bhq097
- Liu, S., Chow, H. M., Xu, Y., Erkkinen, M. G., Swett, K. E., Eagle, M. W., ... Braun, A. R. (2012). Neural correlates of lyrical improvisation: An fMRI study of freestyle rap. *Scientific Reports*, 2, 834. doi:10.1038/srep00834

- McNorgan, C. (2012). A meta-analytic review of multisensory imagery identifies the neural correlates of modality-specific and modality-general imagery. *Frontiers in Human Neuroscience*, 6, 285. doi:10.3389/fnhum.2012.00285
- Norgaard, M., Stambaugh, L. A., & McCranie, H. (2019). The effect of jazz improvisation instruction on measures of executive function in middle school band students. *Journal of Research in Music Education*, 67, 339-354. doi:10.1177/0022429419863038
- Orgogozo, J. M., & Larsen, B. (1979). Activation of the supplementary motor area during voluntary movement in man suggests it works as a supramotor area. *Science*, 206, 847-850. doi:10.1126/science.493986
- Passingham, R. E., Bengtsson, S. L., & Lau, H. C. (2010). Medial frontal cortex: From self-generated action to reflection on one's own performance. *Trends in Cognitive Sciences*, 14, 16-21. doi:10.1016/j.tics.2009.11.001
- Penfield, W., & Welch, K. (1951). The supplementary motor area of the cerebral cortex: A clinical and experimental study. *AMA Archives of Neurology and Psychiatry*, 66, 289-317. doi:10.1001/archneurpsyc.1951.02320090038004
- Pinho, A. L., de Manzano, Ö., Fransson, P., Eriksson, H., & Ullén, F. (2014). Connecting to create: Expertise in musical improvisation is associated with increased functional connectivity between premotor and prefrontal areas. *Journal of Neuroscience*, 34, 6156-6163. doi:10.1523/JNEUROSCI.4769-13.2014
- Potgieser, A. R. E., de Jong, B. M., Wagemakers, M., Hoving, E. W., & Groen, R. J. M. (2014). Insights from the supplementary motor area syndrome in balancing movement initiation and inhibition. *Frontiers in Human Neuroscience*, 8, 960. doi:10.3389/fnhum.2014.00960
- Rauschecker, J. P. (2011). An expanded role for the dorsal auditory pathway in sensorimotor control and integration. *Hearing Research*, 271, 16-25. doi:10.1016/j.heares.2010.09.001
- Sachs, M., Kaplan, J., Der Sarkissian, A., & Habibi, A. (2017). Increased engagement of the cognitive control network associated with music training in children during an fMRI Stroop task. *PLoS ONE*, 12, e0187254. doi:10.1371/journal.pone.0187254

- Sacks, O. (1992). Tourette's syndrome and creativity. *British Medical Journal*, 305, 1515-1516. doi:10.1136/bmj.305.6868.1515
- 薩克斯。(2008)。《腦袋裝了 2000 齣歌劇的人》(廖月娟譯)。臺北：天下文化。
- 【Sacks, O. (2008). *Musicophilia: Tales of Music and the Brain* (Y.-J. Liao, Trans.). Taipei: Bookzone.】
- Sakai, K., Hikosaka, O., & Nakamura, K. (2004). Emergence of rhythm during motor learning. *Trends in Cognitive Sciences*, 8, 547-553. doi:10.1016/j.tics.2004.10.005
- Schaefer, R. S., Morcom, A. M., Roberts, N., & Overy, K. (2014). Moving to music: Effects of heard and imagined musical cues on movement-related brain activity. *Frontiers in Human Neuroscience*, 8, 774. doi:10.3389/fnhum.2014.00774
- Schwartz, M., Rothermich, K., & Kotz, S. A. (2012). Functional dissociation of pre-SMA and SMA-proper in temporal processing. *NeuroImage*, 60, 290-298. doi:10.1016/j.neuroimage.2011.11.089
- Segado, M., Hollinger, A., Thibodeau, J., Penhune, V., & Zatorre, R. J. (2018). Partially overlapping brain networks for singing and cello playing. *Frontiers in Neuroscience*, 12, 351. doi:10.3389/fnins.2018.00351
- Seger, C. A., Spiering, B. J., Sares, A. G., Quraini, S. I., Alpeter, C., David, J., & Thaut, M. H. (2013). Corticostriatal contributions to musical expectancy perception. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 25, 1062-1077. doi:10.1162/jocn_a_00371
- Seghezzi, S., Zirone, E., Paulesu, E., & Zapparoli, L. (2019). The brain in (willed) action: A meta-analytical comparison of imaging studies on motor intentionality and sense of agency. *Frontiers in Psychology*, 10, 804. doi:10.3389/fpsyg.2019.00804
- Takeuchi, H., Taki, Y., Nouchi, R., Yokoyama, R., Kotozaki, Y., Nakagawa, S., ... Kawashima, R. (2018). General intelligence is associated with working memory-related brain activity: New evidence from a large sample study. *Brain Structure and Function*, 223, 4243-4258. doi:10.1007/s00429-018-1747-5
- Tanaka, S., & Kirino, E. (2017). Dynamic reconfiguration of the supplementary motor area network during imagined music performance. *Frontiers in Human Neuroscience*, 11, 606. doi:10.3389/fnhum.2017.00606

- Taren, A. A., Venkatraman, V., & Huettel, S. A. (2011). A parallel functional topography between medial and lateral prefrontal cortex: Evidence and implications for cognitive control. *Journal of Neuroscience*, *31*, 5026-5031. doi:10.1523/JNEUROSCI.5762-10.2011
- Tsai, C.-G., Chen, C.-C., Chou, T.-L., & Chen, J.-H. (2010). Neural mechanisms involved in the oral representation of percussion music: An fMRI study. *Brain and Cognition*, *74*, 123-131. doi:10.1016/j.bandc.2010.07.008
- Tsai, C.-G., Chou, T.-L., & Li, C.-W. (2018). Roles of posterior parietal and dorsal premotor cortices in relative pitch processing: Comparing musical intervals to lexical tones. *Neuropsychologia*, *119*, 118-127. doi:10.1016/j.neuropsychologia.2018.07.028
- Tsai, C.-G., Fan, L.-Y., Lee, S.-H., Chen, J.-H., & Chou, T.-L. (2012). Specialization of the posterior temporal lobes for audio-motor processing – Evidence from a functional magnetic resonance imaging study of skilled drummers. *European Journal of Neuroscience*, *35*, 634-643. doi:10.1111/j.1460-9568.2012.07996.x
- Wiener, M., Turkeltaub, P., & Coslett, H. B. (2010). The image of time: A voxel-wise meta-analysis. *NeuroImage*, *49*, 1728-1740. doi:10.1016/j.neuroimage.2009.09.064
- Williams, T. I. (2015). The classification of involuntary musical imagery: The case for earworms. *Psychomusicology: Music, Mind, and Brain*, *25*, 5-13. doi:10.1037/pmu0000082
- Wollman, I., Penhune, V., Segado, M., Carpentier, T., & Zatorre, R. J. (2018). Neural network retuning and neural predictors of learning success associated with cello training. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *115*, E6056-E6064. doi:10.1073/pnas.1721414115
- Zatorre, R. J., Chen, J. L., & Penhune, V. B. (2007). When the brain plays music: Auditory-motor interactions in music perception and production. *Nature Reviews Neuroscience*, *8*, 547-558. doi:10.1038/nrn2152
- Zhang, Y., Chen, G., Wen, H., Lu, K.-H., & Liu, Z. (2017). Musical imagery involves Wernicke's area in bilateral and anti-correlated network interactions in musicians. *Scientific Reports*, *7*, 17066. doi:10.1038/s41598-017-17178-4

Cognitive Control in Agents: On the Importance of Supplementary Motor Area in the Brain for Music Activities

Chen-Gia TSAI

Summary

In recent years, brain-imaging studies on music show the involvement of the supplementary motor area (SMA) in the dorsomedial frontal cortex. The article aims to elucidate the relationships between music and the following functions of pre-SMA, SMA-proper, and rostral cingulate zone (RCZ): sensorimotor processing, auditory imagery, sequence processing, cognitive control, and volition. In 2018, a brain-imaging study reported that pre-SMA activation in response to music can predict the future effectiveness of a person's learning of a musical instrument. This may reflect that pre-SMA plays a key role in organizing sounds and movements in a flexible way. Moreover, SMA contributes to the anticipatory imagery of music and the voluntary initiation of musical imagery.

Sequence processing often entails the establishment of nonadjacent dependencies to grasp the deep structure of a sequence. This explains why pre-SMA participates in comprehension and prediction of language and music. Chunking is often used when processing language and music messages, that is, connecting smaller pieces of information into bigger blocks or chunks. It is well-established that pre-SMA plays a critical role in chunking. In songs, the structure of antecedent followed by a consequent involves the sequence processing of melody and harmony, which may engage SMA. Another important aspect of sequence processing is the ability to encode the time points of events. Therefore,

sequence processing is closely related to musical beats, meters, and rhythms. Past studies have shown that if patients have their SMA removed during neurosurgery, they cannot accurately replicate rhythms. In addition, if the metrical structure of a musical excerpt is clear, and the ratio of the length of the notes is a small integer ratio, significant activity in the striatum and SMA can be observed. The striatum and SMA may represent a metrical structure for encoding rhythms with a small integer ratio of time intervals.

Music activities can enhance the executive control functions of SMA, including attention control, inhibitory control, working memory, and cognitive flexibility. A brain-imaging study exploring the influence of music training on Stroop's task finds that compared with children who did not receive music training, those who did have more intense SMA/RCZ activity when performing Stroop task. When participating in music activities, one often employs attention control and inhibition control. For example, when listening to polyphonic music, attention control is necessary to concentrate on listening to a certain voice. When sight-reading music, special attention is given to key signatures and accidentals.

There is increasing evidence which demonstrates that the inferior frontal gyrus and pre-SMA support working memory and sequence processing. A brain-imaging study validates that there is more activity recorded in the inferior frontal gyrus and pre-SMA for musicians without absolute pitch when listening to note sequences compared to those with absolute pitch. Musicians without absolute pitch may have better ability to process the relationship between musical pitches, usually recruiting the inferior frontal gyrus and pre-SMA for tonal working memory processes. In addition to the inferior frontal gyrus, the dorsolateral prefrontal cortex also coordinates with pre-SMA to support cognitive control in cases of great uncertainty. Pre-SMA and RCZ are responsible for error detection and frequently work in tandem with the dorsolateral prefrontal cortex in situations that cannot be predicted. For example, when one listens to chromatic music, the increasing activity in pre-SMA and RCZ may reflect their role in the detection of out-of-key notes, whereas the increasing activity in the dorsolateral prefrontal cortex may reflect its role in providing and updating tonal context.

During musical improvisation, the executive control functions of SMA are closely integrated with volition, allowing musicians to become “agents,” who can express their personal intentions with highly creative and well-organized music. Improvisation is full of uncertainty, which can prompt and stimulate the exercise of SMA/RCZ. A brain-imaging study of professional pianists points out that the functional connectivity between the dorsolateral prefrontal cortex and SMA is positively related to the time span of improvisation training. Moreover, college students majoring in classical piano also demonstrate more activity the inferior frontal gyrus and RCZ during improvisation. Similarly, when rappers improvises lyrics in performances, the functional connection between the medial prefrontal cortex and the inferior frontal gyrus as well as SMA/RCZ increased. Another study suggests that when musicians perform rhythm improvisation, activity in SMA/RCZ, dorsolateral prefrontal cortex, and insula is higher than that of non-musicians. In these creative and uncertain performative acts, one’s cognitive flexibility can be exercised. This view is consistent with a recent finding which prescribes improvisation training for those who want to improve cognitive control through learning music.

For patients with Tourette syndrome and Alzheimer’s disease, the roles of SMA/RCZ in volition, sensorimotor processing, and sequence processing during music activities can also be observed. Tourette syndrome is a movement disorder that involves repetitive movements (tics) that cannot be voluntarily controlled. Dr. Oliver Sacks, a neurologist and a forerunner in music therapy, points out that percussion instruments are suitable for Tourette syndrome patients because many of them have special musical talents, which are most manifest in music with strong rhythm and spontaneous improvisation. People with Tourette syndrome may be able give exorbitant improvisation when playing drums. Their performance is often accompanied by obvious impulse and drive, which are closely related to the physical action of tics. A brain-imaging study finds that SMA/RCZ activation, which may reflect their desire and impulse, increases in participants with Tourette syndrome before they have a tic. From this point of view, the music talents of people with Tourette syndrome may also be related to

the generation of desires and intentions in SMA/RCZ. Dr. Sacks believes that Tourette syndrome allows us to rethink the question of will—when this creative beast (Tourette syndrome) is transformed into music, people with Tourette syndrome can successfully combine the original impulse with the controllable self, thus enjoying a convoluted double life.

Alzheimer's disease is the most common type of dementia. Because of the gradual accumulation of amyloid in the brain, the cognitive function in patients with Alzheimer's disease degrades, the ability to recognize people and things declines, and the memory fades. Prior studies suggest that the intervention of music can improve the emotional and cognitive functions of patients with Alzheimer's disease. Even with patients with memory impairment, they tend to be more capable of recalling the past events when they listen to music they learned from the age of 10 to 30. Therefore, Dr. Sacks points out that listening to familiar songs for patients with Alzheimer's disease is a way to retrieve the connection between emotion and memory or to evoke the memory via bodily movements or dance. Why do people with Alzheimer's disease tend to respond to familiar songs which they used to know years ago? The key may be hidden in the pre-SMA and RCZ of the brain. A brain imaging study demonstrates that pre-SMA and RCZ, which are responsive to familiar music, are atrophied relatively late in Alzheimer patients. Although there is also accumulation of amyloid proteins in the pre-SMA and RCZ, their function degenerates more slowly. This explains why people with Alzheimer's disease are more likely to retain musical memories. I suggest that this finding also reveals that patients with Alzheimer's disease may be able to hum along with familiar music, and even recall related physical movements. Perhaps with proper stimulation of SMA and RCZ, music can reactivate the impaired mechanism for memory and allow them to enjoy life anew.

Keywords: cognitive science, music and the brain, improvisation, volition, motor control

蔡振家，國立臺灣大學物理系學士，國立臺北藝術大學傳統藝術研究所碩士，德國柏林鴻葆大學（Humboldt-Universität zu Berlin）音樂學博士，現為國立臺灣大學音樂學研究所副教授。專長研究領域為生物音樂學、音樂聲學、戲曲與流行音樂。

Chen-Gia TSAI, Associate Professor at the Graduate Institute of Musicology of the National Taiwan University. His main research fields are biomusicology, music acoustics, Xiqu, and popular music.