

Brain and Music Learning

Yun Nan

State Key Laboratory of Cognitive Neuroscience and Learning, Beijing Normal University, Beijing
Email: nany@bnu.edu.cn

Received: Jan. 6th, 2016; accepted: Jan. 22nd, 2016; published: Jan. 29th, 2016

Copyright © 2016 by author and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

In recent years, the rapidly developing brain science has offered precious and unique perspectives on how experiences modulate the plasticity of human brain. Besides the behavioral methods, we were thus able to further understand the related neural mechanisms underlying brain plasticity. This article reviewed recent findings on brain and music learning, highlighting the importance of music learning to individual brain and the implications of brain sciences for music learning and education, and promoting “brain science-based music learning and education”.

Keywords

Brain Sciences, Music Learning, Music Education

脑与音乐学习

南 云

北京师范大学认知神经科学与学习国家重点实验室, 北京
Email: nany@bnu.edu.cn

收稿日期: 2016年1月6日; 录用日期: 2016年1月22日; 发布日期: 2016年1月29日

摘 要

近年来迅猛发展的脑科学为人们认识经验对于大脑的塑造作用提供了独特而又宝贵的视角, 使人们能够在行为研究的基础上, 进一步探索脑可塑性相应的神经机理。本文主要综述了脑与音乐学习方面近年来

的研究成果,概括了音乐学习对个体脑的重要意义以及相应脑科学方面的认识对音乐学习与教育的启示,倡导“基于脑科学的音乐学习与教育”。

关键词

脑科学, 音乐学习, 音乐教育

1. 引言

音乐是以声音为基础的一种重要艺术形式,与语言一起构成人类社会最基本的沟通系统。音乐普遍存在于所有社会,在一些原始部落,音乐甚至就是一种生活方式,与其中的每个个体密切相关。在个体的发展过程中,音乐同样发挥着重要的作用。人的音乐潜能自出生时就已显现。功能核磁共振的研究结果显示,刚刚出生1到3天的新生儿即可以感知到音乐的和谐性并且呈现以右脑为主的音乐加工模式,表现出和谐的西方音乐小段主要激活新生儿大脑右侧的初级与次级听觉皮层,而不和谐音乐小段则主要引起左侧额下回与边缘系统激活的模式(Perani et al., 2010)。3到6个月的婴儿就可以加工音乐音高信息,并在右侧颞顶区产生相应的脑激活(Homae, Watanabe, Nakano, & Taga, 2012);婴儿可以敏锐地感知由三拍到两拍的音乐节拍变化(Trainor, 2008)。脑电实验可以记录到4月大的婴儿对一对重复出现的音符的变化与成人相似的脑电成份(He, Hotson, & Trainor, 2009)。人在听音乐时会不自觉地随节奏打拍子,5个月大的婴儿就已经表现出这种对音乐节奏的范畴特异敏感性,并且可以很好适应节奏的快慢,即对快的节奏产生快的节拍反应,对慢的节奏则产生相对缓慢的节拍反应(Zentner & Eerola, 2010)。6个月大的婴儿就可以能辨别复杂和弦中的不合谐音,并且可以区分同时呈现的听觉刺激中的不同元素(Folland, Butler, Smith, & Trainor, 2012)。

婴儿天生的对音乐的敏感性具有跨文化的普遍性与一致性。在发展过程中,相应听觉经验不断积累,这种较为宽泛的感知力越来越特异化:与生活环境密切相关的特定的音乐能力得到强化,而无关的则逐渐消退。例如,婴儿即可感知复杂的音乐节奏,但是如果脱离提供这种复杂节奏的音乐环境,这种复杂节奏的感知能力就会很快丧失(Trainor, 2008)。同理,6个月的婴儿的节奏区分能力不受音乐来源的影响,既可区分本土音乐(西方音乐)也可区分陌生的外国音乐(巴尔干半岛)的节奏变化,而成人却只能区分本土的音乐节奏变化,却不能够区分陌生的外国音乐(节奏变化(Hannon & Trehub, 2005)。这些研究表明,婴幼儿的音乐潜力与后天的环境共同作用影响个体音乐能力的发展,因此,音乐教育作为一种后天的环境因素具有重要的作用。

2. 音乐学习对个体脑的重要意义

近年来迅猛发展的脑科学为人们认识经验对于大脑的塑造作用提供了独特而又宝贵的视角,使人们能够在行为研究的基础上,进一步探索相应的神经基础与脑可塑性的改变。这些新的神经科学的研究手段同样也为音乐学习与音乐教育带来了新的实证依据与启示。音乐经验是一种多感觉通道的体验,涉及运动、体感、听觉、视觉、空间加工与定位以及这些不同形式加工多种不同整合。这种多通道的经验可以促进脑的全面发展,使脑产生相应结构与功能的可塑性变化。音乐经验同时促进个体社会性技能与语言能力的提高,还可以促进其他领域的认知智力发展(Dawson, 2014; Moreno & Bidelman, 2014; Kraus, Hornickel, Strait, Slater, & Thompson, 2014; Francois, Grau-Sanchez, Duarte, & Rodriguez-Fornells, 2015; Tierney, Krizman, & Kraus, 2015; Strait, Slater, O'Connell, & Kraus, 2015)。

2.1. 音乐的情绪反应及其对健康的促进作用

聆听或者演奏音乐经常伴随着强烈的情绪体验。寻求这些特殊的情绪体验通常是人们喜爱音乐的首要原因。音乐的情绪知觉很可能是一个独立的系统，涉及到一系列与动机、社会性与奖赏有关的脑区。经颅磁刺激研究发现，相对于中性音乐，令人恐惧的音乐可以在皮层运动区诱发出更大的运动诱发电位(motor evoked potentials, MEP) (Giovannelli et al., 2012)。运用近红外成像技术可以观察到前额叶皮层对音乐情绪内容的自动反应(Moghimi, Kushki, Power, Guerguerian, & Chau, 2012)。早期的正电子发射计算机断层扫描研究发现，被试在聆听音乐小段时边缘与新皮质区随着音乐愉悦度的不同而产生不同的变化(Blood, Zatorre, Bermudez, & Evans, 1999)。随后的研究表明(Blood & Zatorre, 2001)，愉悦的音乐之所以使人激动得颤栗是因为其主要激活了脑内负责奖赏与动机的区域(比如基底前脑，脑干以及眶额皮层)。另外一个研究发现普通被试聆听不熟悉但却非常喜欢的音乐时可以激活双侧的边缘与边缘区(Brown, Martinez, & Parsons, 2004)。脑损伤研究进一步提示一些重要脑区的损伤会导致相应的音乐情绪认知障碍。根据对一位 71 岁病人的个案研究，右脑顶叶梗塞导致病人选择性的音乐情绪感知障碍：病人出现脑梗塞之后即无法感知之前能够正常感受的音乐片段的情绪内涵(Satoh, Nakase, Nagata, & Tomimoto, 2011)。这也同时说明右侧顶叶在音乐情绪加工中可能有重要的作用。另外一个研究表明，杏仁核在音乐的情感加工过程中起着重要的作用，杏仁核损伤导致音乐情感加工障碍(Gosselin, Peretz, Johnsen, & Adolphs, 2007)。

音乐诱发情绪反应是基于人体一系列的生理反应变化，包括心率、呼吸、血压、皮肤电传导、皮温、肌张力以及生化反应。更重要的是，音乐可以促进脑释放特定的情绪相关神经递质。与不愉悦的音乐相比，聆听愉悦的音乐可以提高被试的血清素(5-羟色胺, serotonin, 5-HT)水平(Evers & Suhr, 2000)。聆听愉悦音乐也可以提高多巴胺水平(Zatorre & Salimpoor, 2013)，并且增强负责奖赏、自主与认知加工的脑区之间的联系(Menon & Levitin, 2005)。甚至连高血压的老鼠在听莫扎特音乐时也会出现多巴胺水平提高及血压降低的现象(Sutoo & Akiyama, 2004)。

音乐诱发的躯体化学改变及其相应的情绪调节作用有重要的健康促进意义，在医学领域引起了极大兴趣。临床上有报道使用音乐来减轻疼痛的有效实践，可以加速康复并减少麻醉药物的剂量(Spintge, 2000)。手术过程中，轻柔的背景音乐可以促进医患之间更有效的沟通(Zalewsky, Vinker, Fiada, Livon, & Kitai, 1998)。最近的临床随机对照实验研究表明，以玻璃体注射为例，术前与术中聆听经典音乐有助于减轻病人的焦虑情绪，虽然病人的痛感并没有显著变化(Chen, Seth, Rao, Huang, & Adelman, 2012)。

2.2. 音乐经验对脑结构的塑造作用

脑的解剖结构与生理机能受到人毕生经历的影响(Stiles, 2000)。长期音乐学习在提高相应音乐能力的同时，也改变脑的形态结构。音乐家的脑是研究音乐学习相关神经结构可塑性的完美模型。一系列比较音乐家与非音乐家脑结构的研究发现，音乐家通常比非音乐家有更大的胼胝体(Schlaug, Jancke, Huang, Staiger, & Steinmetz, 1995)、小脑(仅限于男性)(Hutchinson, Lee, Gaab, & Schlaug, 2003)、左侧颞平面(仅限于具有绝对音高的音乐家)(Schlaug, Jancke, Huang, & Steinmetz, 1995)以及 Omega 标记(位于中央前回上部，与功能性手部/手指运动表征的增大有关)(Bangert & Schlaug, 2006)。通常，如果在七岁之前就正式开始音乐训练，这些脑区的变化就更为明显。比如，较早开始音乐训练的钢琴家比较晚开始音乐训练的钢琴家右侧壳核的灰质体积更小，且相应的钢琴演奏的时间精确性更强(Vaquero et al., 2015)。一项对儿童进行长时间音乐训练的纵向研究表明，15 个月的键盘演奏训练可以改变初级运动与听觉皮层以及胼胝体的结构改变(Hyde et al., 2009)，这说明与音乐经验相关的脑部结构改变很可能也受到音乐经验本身的影响，而并非全部由音乐家的先天特性所决定。

音乐学习不但可以改变不同脑区的结构，而且可以影响脑区之间的白质神经纤维连接。运用弥散张量成像技术，最近的一些研究揭示了上纵束(superior longitudinal fasciculus, SLF)与弓形束(arcuate fasciculus, AF)在音乐家与没有受到正规音乐训练的正常被试之间的宏观与微观结构差异。上纵束是脑内音乐与语言感知和产生的重要神经通路，研究表明，具有绝对音高能力(即可以不用参考音对单独的音符进行命名)的音乐家与一般音乐家、普通正常对照相比，其左侧上纵束的各向异性分数(fractional anisotropy, FA)比右侧更大，并且这种一侧化倾向与绝对音高行为测试反应的准确性正相关(Oechslin, Imfeld, Loenneker, Meyer, & Jancke, 2009)。最近的一个研究比较了歌唱家、器乐演奏者与普通正常对照弓形束结构的差别，发现两组音乐家相对于正常对照有更大的左右弓形束，且其各向异性分数也更高(Halwani, Loui, Ruber, & Schlaug, 2011)。更重要的是，这些研究者发现，歌唱家比器乐演奏者左侧弓形束更大，但各向异性分数较低，且这种结构特点与歌唱家声乐训练的时间长短密切相关：训练时间越长，则各向异性分数更低(Halwani et al., 2011)。这些结果说明长期的音乐训练可以导致连接不同脑区的白质纤维束体积增大且微观结构更复杂。

2.3. 音乐经验对不同脑功能的作用

音乐经验广泛地影响听觉、视觉、体感运动与记忆等多种基本脑功能的可塑性。早期长时间的音乐训练可以提高听觉系统的敏感性(Meyer et al., 2011)，具体表现为音乐家的声音加工优势—包括复杂旋律(Fujioka, Trainor, Ross, Kakigi, & Pantev, 2004)、和弦序列(Koelsch, Schmidt, & Kansok, 2002)以及言语刺激(Besson, Chobert, & Marie, 2011)等。除听觉外，音乐家在体感与运动加工方面的优势也非常明显(Elbert, Pantev, Wienbruch, Rockstroh, & Taub, 1995; Lotze, Scheler, Tan, Braun, & Birbaumer, 2003)。更重要的是，横断研究表明音乐经验还会促进不同系统的功能整合与交互(Schulz, Ross, & Pantev, 2003)。这种音乐训练所涉及的不同脑区之间的功能交互与整合很可能是与音乐经验相关的各种相对独立的系统功能提高的重要基础机制，正是在这种多系统共同作用实现诸多功能优化整合的基础上，才会有不同的相对独立脑功能的显著提高。

音乐与脑功能可塑性的密切关系对教育与医疗具有重要的应用意义。在这些领域，一个曾经得到广泛关注的概念要属“莫扎特效应”(Jausovec, Jausovec, & Gerlic, 2006; Ho, Mason, & Spence, 2007; Lints & Gadbois, 2003; Gilletta, Vrbancic, Elias, & Saucier, 2003; Hughes, 2001; Rauscher & Shaw, 1998; Newman et al., 1995)。最初的研究者先请大学生聆听莫扎特奏鸣曲 K. 448 的前十分钟，然后再进行空间-时间推理任务。与听放松指导语或者不听任何声音的条件相比，听莫扎特奏鸣曲的大学生在空间-时间推理任务上得分更高(Rauscher & Shaw, 1998)。该作用效果较小且持续的时间也很短，但却被夸大宣传为一种提高儿童智力的捷径，一度产生了大量缺少事实根据的文章、书籍以及唱片。目前在儿童群体中是否存在莫扎特效应仍然有很大争议，更明确的结论只有通过下一步的纵向随机对照研究才可能得出。

2.3.1. 语言

对音乐经验或者能力向语言领域迁移的理论理解主要是基于两个方面：1) 音乐与语言存在共享的加工过程；2) 音乐经验可以提高听觉注意与记忆能力，促进语音知觉与提高语音意识，进而改善语言功能(Besson et al., 2011; Chobert, Marie, Francois, Schon, & Besson, 2011)。

音乐与语言作为人类社会两种主要的沟通方式，存在着许多共同点。以音高为例，作为音乐与语言的重要构成元素，音高的具体表现形式与声学物理属性虽然有领域特异性，但其相关的神经基础却存在跨领域的共通之处。我们最近的一项研究表明，音乐的音高与语言领域的声调在脑内各自的神经网络涉及到的共用的脑区—即左侧的布洛卡区(Broca's area, 负责语言加工的脑区，运动性语言中枢) (Nan &

Friederici, 2013)。这种部分共享的神经基础很好地解释了行为(Lee & Hung, 2008)与脑干诱发电位(Wong, Skoe, Russo, Dees, & Kraus, 2007)的一致研究结果：即便没有声调语言经验，音乐专业成人亦比普通成人对汉语声调的加工更为精准。更多的研究发现，这种由音乐音高加工能力向语言领域的迁移并不只局限于声调语言，音乐经验也有助于非声调语言中音高属性的加工。法国马塞 Besson 教授的研究小组的一系列工作表明，具有专业音乐经验的成人和儿童都比没有音乐经验的同龄人能够更准确地检测到语调的细微变化。脑电研究发现，音乐专业的成人对语调变化的脑电反应比普通成人出现得更早(Schon, Magne, & Besson, 2004)；而在儿童群体，只有受过音乐训练的儿童才产生语调变化相关的脑电反应(Magne, Schon, & Besson, 2006)。

此外，音乐经验还可以通过促进听觉注意与记忆加工进而提高或者改善某些特异性的语言功能，比如语音加工及噪音环境中的语音识别。运用 MMN (失匹配负波, mismatch negativity)与行为的手段，研究者发现受过音乐训练的 9 岁儿童对于语音音节的元音时长与噪音起始时间(VOT, voice onset time)的脑电与行为加工比没有受过音乐训练的 9 岁儿童要更为精准(Chobert et al., 2011)。这个横断研究的结果被随后的纵向追踪研究证实，音乐训练的确可以促进儿童 VOT 相关的语音加工(Chobert, Francois, Velay, & Besson, 2014)。成人的类似横断研究也表明，与非音乐家相比，音乐家对不同语音/ba//da//ga/在脑干水平的感知加工区分更准确，而且与行为层面的噪音背景下语音识别能力成正相关(Parbery-Clark, Tierney, Strait, & Kraus, 2012)。有关横断研究还表明，音乐经验也许可以对抗老化引起的噪音背景下语音感知能力的降低：具有音乐经验的老年人在噪音背景下识别语音的能力与听觉工作记忆水平都显著地高出年龄与教育水平匹配但没有音乐经验的老年人(Parbery-Clark, Strait, Anderson, Hittner, & Kraus, 2011)。

在较高的水平，音乐经验向语言领域的迁移作用最明确的直接体现就是言语能力的提高。横断研究表明，经过 3 年以上音乐训练的儿童比没有音乐经验的对照组儿童词汇量更大(Forgeard, Winner, Norton, & Schlaug, 2008)。一项横断研究考察了 194 名小学三年级男孩，发现演奏乐器的男孩(大约占 53%)比没有音乐经验的男孩拼写能力更强，器乐经验与拼写能力的正向关系在控制了环境因素后依然存在(Hille, Gust, Bitz, & Kammer, 2011)。成人的类似横断研究也表明，受过 5 年以上音乐训练的大学生比音乐经验在 5 年以下的同龄人字表测验成绩更好(Hogan & Huesman, 2008)。一些研究者已经逐步开展针对儿童言语发育迟缓的音乐训练干预，初步的结果支持音乐训练提高语音能力并增强言语理解的研究假设(Gross, Linden, & Ostermann, 2010)。新近的一篇元分析的工作表明，音乐训练确实可以促进语音意识的增强(Gordon, Fehd, & McCandliss, 2015)。

2.3.2. 社会性

前述音乐的情绪反应构成音乐学习促进脑社会性认知发展作用的重要基础。从根本上来讲，音乐其实是一种社会性的活动。音乐经验很可能是通过激活奖赏系统强化人的社会性的。行为研究的结果表明，音乐的社会性特点对于 2 岁半的孩子来说就已经非常明显。研究者观察三组不同年龄段的孩子(分别是 2 岁半，3 岁半与 4 岁半三组，每组 12 人)在三种不同的社会情境下(分别为有一个人在打鼓，一个打鼓机器在打鼓或者只有一个扬声器播放打鼓的声音)参与打鼓活动的表现。研究者发现，在与人一起打鼓时，就连 2 岁半的孩子也可以跟随超出他们自发运动节拍的鼓点；并且所有年龄组的孩子都在与人一起打鼓时表现出最高的准确率(Kirschner & Tomasello, 2009)。该研究同时也表明，音乐活动的社会性可以正向调节音乐行为。另外一个功能核磁研究对于成年女性(没有接受过正规音乐训练的)在打鼓时进行扫描发现，被试与主试步调一致的打鼓行为会激活尾状核，以往研究表明尾状核同时也是对金钱奖赏产生反应的脑区。在这个研究中还进一步发现，尾状核的激活程度与实验后的亲社会行为成正相关——尾状核的激活水平越高，亲社会行为表现越明显(Kokal, Engel, Kirschner, & Keysers, 2011)。由此可见，音乐活动中普遍存

在的人际同步行为很可能也是受到脑的奖赏回路的调节。

同理，社会性方面的障碍的一个显著表现即是对于音乐情绪的反应异常。社会沟通交往技能障碍是自闭症个体的重要行为问题，其根基即可能为情绪认知障碍。功能核磁共振成像的研究表明，自闭症个体对于音乐情绪的脑区激活与正常对照被试相比有异常，主要表现在前运动区与脑岛前部的激活减低，这种反应在聆听愉悦音乐时尤其明显(Caria, Venuti, & de Falco, 2011)。类似地，脑损伤研究表明，额颞叶变性病人(frontotemporal lobar degeneration, FTL D)的社会性功能障碍与其对同种主要音乐情感(高兴、悲伤、愤怒与恐惧等)的认知障碍密切相关，这种行为反应的问题与脑灰质的减少变化一致，涉及到广泛的与社会认知相关的脑区，包括脑岛、眶额皮层、扣带前回、内侧前额叶，颞叶前部、后侧颞顶区以及杏仁核等(Omar et al., 2011)。

3. 应用脑科学的知识促进音乐学习与教育

3.1. 脑内的奖赏系统与学习

学习是人脑的个体先天特征，受到脑内动机、奖赏系统的调节。学习或者解决难题时会在脑内产生极度美妙的奖赏感，即一种强烈的极度兴奋感觉。这通常是以中脑边缘系统的多巴胺释放为基础(Vrieze et al., 2011)。多巴胺是奖赏、学习和成瘾的关键生物基础(Wise, 2004)。边缘系统(腹侧纹状体、伏隔核)因此通过神经调节功能调节奖赏回路从而强化学习。儿童生来就有强烈的学习动机，正性的学习体验会激活脑内的特异性奖赏系统，产生自我奖励与强化。如此一来，一个自我奖赏的有效自主学习回路即可以形成。然而，如何能够有效地促进这个主动的学习回路正常运转起来却是专业教育工作者的重大问题。

脑的可塑性一方面表现在正性的经验对脑的促进作用，从而诱发与强化学习。另外一方面，不愉快的环境刺激或者贫乏的环境可能会干扰和阻碍学习和记忆的形成与提取，产生学习与行为的障碍。新生儿和青少年期的强烈负性刺激与过度压力可能会导致边缘系统的神经化学变化，打乱主要神经递质的平衡状态。研究发现社会剥夺环境中八齿鼠和沙鼠个体的部分前额叶皮层多巴胺能神经纤维分布密度减少(Winterfeld, Teuchert-Noodt, & Dawirs, 1998)。被社会剥夺的八齿鼠的边缘系统脑区出现多巴胺能和5-羟色胺能神经系统的失衡(Poeggel, Nowicki, & Braun, 2003)。

对于儿童与青年来讲，其边缘系统与前额叶仍然处于不断的发展过程中，关注脑内的奖赏系统与学习的关系因此具有更为重要的意义。教育者要确保学习内容是与正性情绪相联系的，避免孩子将学习情境与负性情绪相关联产生负性情绪记忆。如果使学习与负性的厌恶情绪相联系，则会产生负面效果，阻碍学习与记忆。因此，重视脑内奖赏系统与学习的天然联系并加以科学利用，使儿童能够以自我奖赏的方式调节与控制自己的学习与进步，将是教育工作者实现成功教育最重要与最关键的工作。

3.2. 关键期与毕生学习的可能性

音乐学习有关键期吗？这是一个非常重要的问题，但目前的脑科学研究结果尚且无法给出一个简单而明确的答案。关键期通常是指在出生后脑与行为发展的一个敏感时期。对于感觉与运动系统来说，这一概念更为严格与明确：因为发展的关键期一旦错过，就会造成无法弥补的不足。例如，如果视觉、听觉和躯体感觉没有在关键期内得到相应的感觉刺激，那么这些脑环路的功能就无法得到完善发展与实现(Bengoetxea et al., 2012)。

然而，不同的脑系统以各自不同的速度发育成熟(Bengoetxea et al., 2012)。有的系统比如人的生命中枢—脑干，其主要功能自出生起就已完备。而对感觉与运动系统，特别是高级认知与情绪系统(比如边缘系统和前额叶系统)来说，经验和学习相对更为重要，会引起相应的神经网络重组而逐渐完善其功能。其中感觉系统的发展相对较早，在生命最初几年基本得到充分发展；而边缘系统和前额叶则发育得较晚、

较慢, 这些脑系统是产生内在情绪所必需的, 负责学习的关键加工过程比如记忆存储和提取等。人类的边缘系统和前额叶皮层甚至要到 20 多岁以后才会逐渐发育成熟。

如前所述, 音乐学习涉及多个不同脑系统功能的整合, 不但包括感觉与运动, 更需要脑的奖赏与动机系统(边缘系统和前额叶皮层)的积极参与。因此从理论上讲, 这个复杂的学习通路并没有严格意义上的关键期。因为脑的奖赏与动机系统在整个生命过程中都具有一定程度的可塑性, 终生学习因而成为可能。在此需要强调的是基于以往横断研究的结果, 音乐学习所产生的脑功能与结构方面的优势还是与音乐训练开始的时间有密切的关系, 通常音乐训练开始的越早(早于七岁), 这些相关变化亦越显著, 这可能在很大程度上与音乐学习中的感觉与运动系统的发育规律有关。

4. 小结

目前流行的主要音乐教学法大都是依据先人的理论与经验得出的, 尚且无法决定一个最好的适宜教学法。因为个体之间普遍存在着差异, 并没有一种教学法可以普遍适用于所有人。另外一个更为重要的原因是, 人们对于音乐学习甚至是一般学习过程的认识还十分有限。尽管过去十多年间有关脑与学习的认识可能会对理解复杂的学习与发展过程提供一些线索, 但是我们目前对于脑与学习的理解程度还不足以指导音乐教学进行重要的改变。尽管如此, 因为脑是音乐学习与教育主要的对象, 充分地理解脑对促进学习与发展是至关重要的。

西方发达国家比如美国深刻认识到了脑科学知识在教育实践过程中的重要性。美国国家幼儿教育协会(National Association for the Education of Young Children, NAEYC)提出的基本幼儿教育纲领即倡导“适宜于发展的教育(developmentally appropriate practice)”, 鼓励基于发展、学习、儿童个体特征和儿童所生活的社会和文化背景知识方面原理的教育实践(Bredenkamp & Copple, 1997)。这一纲领既不放弃已有的成功教育实践经验, 同时也注重参考脑科学方面对于学习与发展不断深入的认识, 在此基础上结合儿童个体实际情况, 寻求最佳方案以促进个体的发展与学习。

本文所综述的研究工作大部分属于横断研究, 所揭示的音乐经验与音乐学习效应主要是相关关系。相反, 纵向随机分组对照的音乐训练研究则可以更好地阐述因果关系。尽管这种纵向研究相对于横断研究无疑需要更多时间、精力与经济上的投入, 但其最终所揭示的因果关系对于教育与学习的启示是不可替代的。毕竟, 个体的发展与学习实际上是生理成熟与经验累积复杂交互作用的结果, 而非二者的简单加合。尽管音乐经验以各种方式影响神经发育, 但要清楚地了解音乐学习对于神经发育以及脑结构的影响, 需要进行更多长期音乐训练的纵向研究, 记录个体接受音乐训练整个过程的脑变化。真正实现以脑科学指导音乐学习与教育就要应用脑科学研究解决音乐学习与教学的实际问题, 经过由理论到实践再到理论的不反复, 通过这个反馈回路的每一次小的进展, 逐步深化对音乐学习与脑之间关系的具体认识, 从而有目的有针对性地提高相应教育与学习实践, 做出更有利于个体发展的音乐学习/教育选择。

最终, 基于脑科学的音乐教育将脱离机械的课程表, 真正以个体的脑为其服务对象, 以对脑的科学理解为前提对脑进行个体化的适宜发展的可塑性改造, 促进个体的全面健康发展, 真正实现“基于脑科学的音乐学习与教育”(南云等, 2012)。

参考文献 (References)

- 南云, 陈雪梅, 刘文利, 周加仙(2012). 音乐教育的脑认知机制与国民素质的提升. *全球教育展望*, 9, 53-59.
- Bangert, M., & Schlaug, G. (2006). Specialization of the Specialized in Features of External Human Brain Morphology. *European Journal of Neuroscience*, 24, 1832-1834. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1460-9568.2006.05031.x>
- Bengoetxea, H., Ortuzar, N., Bulnes, S., Rico-Barrio, I., Lafuente, J. V., & Argandona, E. G. (2012). Enriched and Deprived Sensory Experience Induces Structural Changes and Rewires Connectivity during the Postnatal Development of the Brain. *Neural Plasticity*, 2012, 305693. <http://dx.doi.org/10.1155/2012/305693>

- Besson, M., Chobert, J., & Marie, C. (2011). Transfer of Training between Music and Speech: Common Processing, Attention, and Memory. *Frontiers in Psychology, 2*, 94. <http://dx.doi.org/10.3389/fpsyg.2011.00094>
- Blood, A. J., & Zatorre, R. J. (2001). Intensely Pleasurable Responses to Music Correlate with Activity in Brain Regions Implicated in Reward and Emotion. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 98*, 11818-11823. <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.191355898>
- Blood, A. J., Zatorre, R. J., Bermudez, P., & Evans, A. C. (1999). Emotional Responses to Pleasant and Unpleasant Music Correlate with Activity in Paralimbic Brain Regions. *Nature Neuroscience, 2*, 382-387. <http://dx.doi.org/10.1038/7299>
- Bredenkamp, V. S., & Copple, C. (1997). *Developmentally Appropriate Practice in Early Childhood Programs*. Washington, DC: NAEYC.
- Brown, S., Martinez, M. J., & Parsons, L. M. (2004). Passive Music Listening Spontaneously Engages Limbic and Paralimbic Systems. *Neuroreport, 15*, 2033-2037. <http://dx.doi.org/10.1097/00001756-200409150-00008>
- Caria, A., Venuti, P., & de Falco, S. (2011). Functional and Dysfunctional Brain Circuits Underlying Emotional Processing of Music in Autism Spectrum Disorders. *Cerebral Cortex, 21*, 2838-2849. <http://dx.doi.org/10.1093/cercor/bhr084>
- Chen, X., Seth, R. K., Rao, V. S., Huang, J. J., & Adelman, R. A. (2012). Effects of Music Therapy on Intravitreal Injections: A Randomized Clinical Trial. *Journal of Ocular Pharmacology and Therapeutics, 28*, 414-419. <http://dx.doi.org/10.1089/jop.2011.0257>
- Chobert, J., Francois, C., Velay, J. L., & Besson, M. (2014). Twelve Months of Active Musical Training in 8- to 10-Year-Old Children Enhances the Preattentive Processing of Syllabic Duration and Voice Onset Time. *Cerebral Cortex, 24*, 956-967. <http://dx.doi.org/10.1093/cercor/bhs377>
- Chobert, J., Marie, C., Francois, C., Schon, D., & Besson, M. (2011). Enhanced Passive and Active Processing of Syllables in Musician Children. *Journal of Cognitive Neuroscience, 23*, 3874-3887. http://dx.doi.org/10.1162/jocn_a.00088
- Dawson, W. J. (2014). Benefits of Music Training Are Widespread and Lifelong: A Bibliographic Review of Their Non-Musical Effects. *Medical Problems of Performing Artists, 29*, 57-63.
- Elbert, T., Pantev, C., Wienbruch, C., Rockstroh, B., & Taub, E. (1995). Increased Cortical Representation of the Fingers of the Left Hand in String Players. *Science, 270*, 305-307. <http://dx.doi.org/10.1126/science.270.5234.305>
- Evers, S., & Suhr, B. (2000). Changes of the Neurotransmitter Serotonin but Not of Hormones during Short Time Music Perception. *European Archives of Psychiatry and Clinical Neuroscience, 250*, 144-147. <http://dx.doi.org/10.1007/s004060070031>
- Folland, N. A., Butler, B. E., Smith, N. A., & Trainor, L. J. (2012). Processing Simultaneous Auditory Objects: Infants' Ability to Detect Mistuning in Harmonic Complexes. *The Journal of the Acoustical Society of America, 131*, 993-997. <http://dx.doi.org/10.1121/1.3651254>
- Forgeard, M., Winner, E., Norton, A., & Schlaug, G. (2008). Practicing a Musical Instrument in Childhood Is Associated with Enhanced Verbal Ability and Nonverbal Reasoning. *PLoS ONE, 3*, e3566. <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0003566>
- Francois, C., Grau-Sanchez, J., Duarte, E., & Rodriguez-Fornells, A. (2015). Musical Training as an Alternative and Effective Method for Neuro-Education and Neuro-Rehabilitation. *Frontiers in Psychology, 6*, 475. <http://dx.doi.org/10.3389/fpsyg.2015.00475>
- Fujioka, T., Trainor, L. J., Ross, B., Kakigi, R., & Pantev, C. (2004). Musical Training Enhances Automatic Encoding of Melodic Contour and Interval Structure. *Journal of Cognitive Neuroscience, 16*, 1010-1021. <http://dx.doi.org/10.1162/0898929041502706>
- Gilletta, K. S., Urbancic, M. I., Elias, L. J., & Saucier, D. M. (2003). A Mozart Effect for Women on a Mental Rotations Task. *Perceptual and Motor Skills, 96*, 1086-1092. <http://dx.doi.org/10.2466/pms.2003.96.3c.1086>
- Giovannelli, F., Banfi, C., Borgheresi, A., Fiori, E., Innocenti, I., Rossi, S. et al. (2012). The Effect of Music on Corticospinal Excitability Is Related to the Perceived Emotion: A Transcranial Magnetic Stimulation Study. *Cortex, 49*, 702-710.
- Gordon, R. L., Fehd, H. M., & McCandliss, B. D. (2015). Does Music Training Enhance Literacy Skills? A Meta-Analysis. *Frontiers in Psychology, 6*, 1777. <http://dx.doi.org/10.3389/fpsyg.2015.01777>
- Gosselin, N., Peretz, I., Johnsen, E., & Adolphs, R. (2007). Amygdala Damage Impairs Emotion Recognition from Music. *Neuropsychologia, 45*, 236-244. <http://dx.doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2006.07.012>
- Gross, W., Linden, U., & Ostermann, T. (2010). Effects of Music Therapy in the Treatment of Children with Delayed Speech Development—Results of a Pilot Study. *BMC Complementary and Alternative Medicine, 10*, 39.
- Halwani, G. F., Loui, P., Ruber, T., & Schlaug, G. (2011). Effects of Practice and Experience on the Arcuate Fasciculus: Comparing Singers, Instrumentalists, and Non-Musicians. *Frontiers in Psychology, 2*, 156. <http://dx.doi.org/10.3389/fpsyg.2011.00156>

- Hannon, E. E., & Trehub, S. E. (2005). Metrical Categories in Infancy and Adulthood. *Psychological Science*, 16, 48-55. <http://dx.doi.org/10.1111/j.0956-7976.2005.00779.x>
- He, C., Hotson, L., & Trainor, L. J. (2009). Development of Infant Mismatch Responses to Auditory Pattern Changes between 2 and 4 Months Old. *European Journal of Neuroscience*, 29, 861-867. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1460-9568.2009.06625.x>
- Hille, K., Gust, K., Bitz, U., & Kammer, T. (2011). Associations between Music Education, Intelligence, and Spelling Ability in Elementary School. *Advances in Cognitive Psychology*, 7, 1-6. <http://dx.doi.org/10.2478/v10053-008-0082-4>
- Ho, C., Mason, O., & Spence, C. (2007). An Investigation into the Temporal Dimension of the Mozart Effect: Evidence from the Attentional Blink Task. *Acta Psychologica*, 125, 117-128. <http://dx.doi.org/10.1016/j.actpsy.2006.07.006>
- Hogan, D. E., & Huesman, T. (2008). Music Training and Semantic Clustering in College Students. *The Journal of Genetic Psychology*, 169, 322-331. <http://dx.doi.org/10.3200/GNTP.169.4.322-331>
- Homae, F., Watanabe, H., Nakano, T., & Taga, G. (2012). Functional Development in the Infant Brain for Auditory Pitch Processing. *Human Brain Mapping*, 33, 596-608. <http://dx.doi.org/10.1002/hbm.21236>
- Hughes, J. R. (2001). The Mozart Effect. *Epilepsy and Behavior*, 2, 396-417. <http://dx.doi.org/10.1006/ebeh.2001.0250>
- Hutchinson, S., Lee, L. H., Gaab, N., & Schlaug, G. (2003). Cerebellar Volume of Musicians. *Cerebral Cortex*, 13, 943-949. <http://dx.doi.org/10.1093/cercor/13.9.943>
- Hyde, K. L., Lerch, J., Norton, A., Forgeard, M., Winner, E., Evans, A. C. et al. (2009). Musical Training Shapes Structural Brain Development. *Journal of Neuroscience*, 29, 3019-3025. <http://dx.doi.org/10.1523/JNEUROSCI.5118-08.2009>
- Jausovec, N., Jausovec, K., & Gerlic, I. (2006). The Influence of Mozart's Music on Brain Activity in the Process of Learning. *Clinical Neurophysiology*, 117, 2703-2714. <http://dx.doi.org/10.1016/j.clinph.2006.08.010>
- Kirschner, S., & Tomasello, M. (2009). Joint Drumming: Social Context Facilitates Synchronization in Preschool Children. *Journal of Experimental Child Psychology*, 102, 299-314. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jecp.2008.07.005>
- Koelsch, S., Schmidt, B. H., & Kansok, J. (2002). Effects of Musical Expertise on the Early Right Anterior Negativity: An Event-Related Brain Potential Study. *Psychophysiology*, 39, 657-663. <http://dx.doi.org/10.1111/1469-8986.3950657>
- Kokal, I., Engel, A., Kirschner, S., & Keysers, C. (2011). Synchronized Drumming Enhances Activity in the Caudate and Facilitates Prosocial Commitment—If the Rhythm Comes Easily. *PLoS ONE*, 6, e27272. <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0027272>
- Kraus, N., Hornickel, J., Strait, D. L., Slater, J., & Thompson, E. (2014). Engagement in Community Music Classes Sparks Neuroplasticity and Language Development in Children from Disadvantaged Backgrounds. *Frontiers in Psychology*, 5, 1403. <http://dx.doi.org/10.3389/fpsyg.2014.01403>
- Lee, C. Y., & Hung, T. H. (2008). Identification of Mandarin Tones by English-Speaking Musicians and Nonmusicians. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 124, 3235-3248. <http://dx.doi.org/10.1121/1.2990713>
- Lints, A., & Gadbois, S. (2003). Is Listening to Mozart the Only Way to Enhance Spatial Reasoning? *Perceptual and Motor Skills*, 97, 1163-1174.
- Lotze, M., Scheler, G., Tan, H. R., Braun, C., & Birbaumer, N. (2003). The Musician's Brain: Functional Imaging of Amateurs and Professionals during Performance and Imagery. *Neuroimage*, 20, 1817-1829. <http://dx.doi.org/10.1016/j.neuroimage.2003.07.018>
- Magne, C., Schon, D., & Besson, M. (2006). Musician Children Detect Pitch Violations in Both Music and Language Better Than Nonmusician Children: Behavioral and Electrophysiological Approaches. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 18, 199-211. <http://dx.doi.org/10.1162/jocn.2006.18.2.199>
- Menon, V., & Levitin, D. J. (2005). The Rewards of Music Listening: Response and Physiological Connectivity of the Mesolimbic System. *Neuroimage*, 28, 175-184. <http://dx.doi.org/10.1016/j.neuroimage.2005.05.053>
- Meyer, M., Elmer, S., Ringli, M., Oechslin, M. S., Baumann, S., & Jancke, L. (2011). Long-Term Exposure to Music Enhances the Sensitivity of the Auditory System in Children. *European Journal of Neuroscience*, 34, 755-765. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1460-9568.2011.07795.x>
- Moghim, S., Kushki, A., Power, S., Guerguerian, A. M., & Chau, T. (2012). Automatic Detection of a Prefrontal Cortical Response to Emotionally Rated Music Using Multi-Channel Near-Infrared Spectroscopy. *Journal of Neural Engineering*, 9, Article ID: 026022. <http://dx.doi.org/10.1088/1741-2560/9/2/026022>
- Moreno, S., & Bidelman, G. M. (2014). Examining Neural Plasticity and Cognitive Benefit through the Unique Lens of Musical Training. *Hearing Research*, 308, 84-97. <http://dx.doi.org/10.1016/j.heares.2013.09.012>
- Nan, Y., & Friederici, A. D. (2013). Differential Roles of Right Temporal Cortex and Broca's Area in Pitch Processing: Evidence from Music and Mandarin. *Human Brain Mapping*, 34, 2045-2054. <http://dx.doi.org/10.1002/hbm.22046>
- Newman, J., Rosenbach, J. H., Burns, K. L., Latimer, B. C., Matocha, H. R., & Vogt, E. R. (1995). An Experimental Test of "The Mozart Effect": Does Listening to His Music Improve Spatial Ability? *Perceptual and Motor Skills*, 81, 1379-1387.

- Oechslin, M. S., Imfeld, A., Loenneker, T., Meyer, M., & Jancke, L. (2009). The Plasticity of the Superior Longitudinal Fasciculus as a Function of Musical Expertise: A Diffusion Tensor Imaging Study. *Frontiers in Human Neuroscience*, 3, 76.
- Omar, R., Henley, S. M., Bartlett, J. W., Hailstone, J. C., Gordon, E., Sauter, D. A. *et al.* (2011). The Structural Neuroanatomy of Music Emotion Recognition: Evidence from Frontotemporal Lobar Degeneration. *Neuroimage*, 56, 1814-1821. <http://dx.doi.org/10.1016/j.neuroimage.2011.03.002>
- Parbery-Clark, A., Strait, D. L., Anderson, S., Hittner, E., & Kraus, N. (2011). Musical Experience and the Aging Auditory System: Implications for Cognitive Abilities and Hearing Speech in Noise. *PLoS ONE*, 6, e18082. <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0018082>
- Parbery-Clark, A., Tierney, A., Strait, D. L., & Kraus, N. (2012). Musicians Have Fine-Tuned Neural Distinction of Speech Syllables. *Neuroscience*, 210, 111-119. <http://dx.doi.org/10.1016/j.neuroscience.2012.05.042>
- Perani, D., Saccuman, M. C., Scifo, P., Spada, D., Andreolli, G., Rovelli, R. *et al.* (2010). Functional Specializations for Music Processing in the Human Newborn Brain. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 107, 4758-4763. <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.0909074107>
- Poeggel, G., Nowicki, L., & Braun, K. (2003). Early Social Deprivation Alters Monoaminergic Afferents in the Orbital Prefrontal Cortex of *Octodon degus*. *Neuroscience*, 116, 617-620. [http://dx.doi.org/10.1016/S0306-4522\(02\)00751-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0306-4522(02)00751-0)
- Rauscher, F. H., & Shaw, G. L. (1998). Key Components of the Mozart Effect. *Perceptual and Motor Skills*, 86, 835-841. <http://dx.doi.org/10.2466/pms.1998.86.3.835>
- Satoh, M., Nakase, T., Nagata, K., & Tomimoto, H. (2011). Musical Anhedonia: Selective Loss of Emotional Experience in Listening to Music. *Neurocase*, 17, 410-417. <http://dx.doi.org/10.1080/13554794.2010.532139>
- Schlaug, G., Jancke, L., Huang, Y., Staiger, J. F., & Steinmetz, H. (1995). Increased Corpus Callosum Size in Musicians. *Neuropsychologia*, 33, 1047-1055. [http://dx.doi.org/10.1016/0028-3932\(95\)00045-5](http://dx.doi.org/10.1016/0028-3932(95)00045-5)
- Schlaug, G., Jancke, L., Huang, Y., & Steinmetz, H. (1995). *In Vivo* Evidence of Structural Brain Asymmetry in Musicians. *Science*, 267, 699-701. <http://dx.doi.org/10.1126/science.7839149>
- Schon, D., Magne, C., & Besson, M. (2004). The Music of Speech: Music Training Facilitates Pitch Processing in Both Music and Language. *Psychophysiology*, 41, 341-349. <http://dx.doi.org/10.1111/1469-8986.00172.x>
- Schulz, M., Ross, B., & Pantev, C. (2003). Evidence for Training-Induced Crossmodal Reorganization of Cortical Functions in Trumpet Players. *Neuroreport*, 14, 157-161. <http://dx.doi.org/10.1097/00001756-200301200-00029>
- Spintge, R. (2000). Music and Anesthesia in Pain Therapy. *Anästhesiologie, Intensivmedizin, Notfallmedizin, Schmerztherapie: AINS*, 35, 254-261.
- Stiles, J. (2000). Neural Plasticity and Cognitive Development. *Developmental Neuropsychology*, 18, 237-272. http://dx.doi.org/10.1207/S15326942DN1802_5
- Strait, D. L., Slater, J., O'Connell, S., & Kraus, N. (2015). Music Training Relates to the Development of Neural Mechanisms of Selective Auditory Attention. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 12, 94-104. <http://dx.doi.org/10.1016/j.dcn.2015.01.001>
- Sutoo, D., & Akiyama, K. (2004). Music Improves Dopaminergic Neurotransmission: Demonstration Based on the Effect of Music on Blood Pressure Regulation. *Brain Research*, 1016, 255-262. <http://dx.doi.org/10.1016/j.brainres.2004.05.018>
- Tierney, A. T., Krizman, J., & Kraus, N. (2015). Music Training Alters the Course of Adolescent Auditory Development. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 112, 10062-10067. <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1505114112>
- Trainor, L. (2008). Science & Music: The Neural Roots of Music. *Nature*, 453, 598-599. <http://dx.doi.org/10.1038/453598a>
- Vaquero, L., Hartmann, K., Ripolles, P., Rojo, N., Sierpowska, J., Francois, C. *et al.* (2015). Structural Neuroplasticity in Expert Pianists Depends on the Age of Musical Training Onset. *Neuroimage*, 126, 106-119. <http://dx.doi.org/10.1016/j.neuroimage.2015.11.008>
- Vrieze, E., Ceccarini, J., Pizzagalli, D. A., Bormans, G., Vandenbulcke, M., Demyttenaere, K. *et al.* (2011). Measuring Extrastriatal Dopamine Release during a Reward Learning Task. *Human Brain Mapping*, 34, 575-586.
- Winterfeld, K. T., Teuchert-Noodt, G., & Dawirs, R. R. (1998). Social Environment Alters Both Ontogeny of Dopamine Innervation of the Medial Prefrontal Cortex and Maturation of Working Memory in Gerbils (*Meriones unguiculatus*). *Journal of Neuroscience Research*, 52, 201-209. [http://dx.doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-4547\(19980415\)52:2<201::AID-JNR8>3.0.CO;2-E](http://dx.doi.org/10.1002/(SICI)1097-4547(19980415)52:2<201::AID-JNR8>3.0.CO;2-E)
- Wise, R. A. (2004). Dopamine, Learning and Motivation. *Nature Reviews Neuroscience*, 5, 483-494. <http://dx.doi.org/10.1038/nrn1406>
- Wong, P. C., Skoe, E., Russo, N. M., Dees, T., & Kraus, N. (2007). Musical Experience Shapes Human Brainstem Encoding of Linguistic Pitch Patterns. *Nature Neuroscience*, 10, 420-422. <http://dx.doi.org/10.1038/nn1872>

-
- Zalewsky, S., Vinker, S., Fiada, I., Livon, D., & Kitai, E. (1998). Background Music in the Family Physician's Surgery: Patient Reactions. *Harefuah, 135*, 96-97, 168, 167.
- Zatorre, R. J., & Salimpoor, V. N. (2013). From Perception to Pleasure: Music and Its Neural Substrates. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 110*, 10430-10437. <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1301228110>
- Zentner, M., & Eerola, T. (2010). Rhythmic Engagement with Music in Infancy. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 107*, 5768-5773. <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1000121107>