

音乐之脑*

叶 铮 周晓林

(北京大学心理学系, 北京 100871)

摘 要 回顾并总结了近年来对音乐认知神经基础的研究结果, 包括人类感知乐曲的音高、理解音乐的结构和意义中的脑基础, 音乐家和普通人在音乐认知上的脑功能差异, 以及东西方听众在聆听本土和非本土音乐时的脑活动差异, 并对国内利用脑功能成像技术和事件相关电位技术研究音乐认知的前景作出展望。

关键词 音乐认知, 神经基础, fMRI, ERP。

分类号 B842

人们谈论音乐, 如同谈论语言的双生兄弟一般: 音乐通过变化不同的声学参数, 犹如言语中的语音参数, 传达不同层次的信息; 它遵循类似于语法的有限的规则, 将可与词汇相比拟的乐音排列组合成悦耳的曲调, 最终建构出纷繁复杂的歌曲, 而曲调和歌曲则类似于语言中的句子和文章^[1]。人类的音乐能力如同他们的语言能力一样, 在很大程度上是先天性的, 取决于进化、遗传所决定的大脑特定神经基础。加拿大多伦多大学的研究者发现, 6个月大的婴儿对旋律轮廓 (melodic contour) 和节奏型 (rhythmic pattern) 的敏感程度已不亚于成人; 即使是双耳失聪的母亲也能生下音乐知觉敏锐的孩子^[2]。这表明, 人类对音乐的敏感性源于大脑神经网络的特定生物机能。换言之, 音乐不仅是人类文化的一部分, 也可能是人类天性的一部分。

1 乐曲的音高

音乐和言语一样, 依赖频域和时域变化来传达信息。对任何一种音乐体系来说, 音质 (tonal pitch) 的变化都是至关重要的。音乐家通过调整音高来创造悦耳的音调, 影响乐句切分 (phrasing)^[3]。

Peretz 及其同事的研究显示, 双侧颞叶损伤的患者通常会失去唱歌的能力, 也无法辨认从前熟悉的曲调^[4,5]。一些更为系统的研究则表明, 感知音高

和处理频域信息的职能主要由大脑右半球的颞叶承担^[6-15]。更具体地说, 大脑右侧颞叶听皮层受损的患者往往难以分辨音高变化的方向^[16]。而基于健康受试者的研究结果也表明, 右半球的听皮层对于音高的判断和保持, 节奏的想象和重复, 音质的评判, 以及异常和弦的检测都承担着十分重要的功能 (详见文献^[3])。

近来 Zatoore (加拿大蒙特利尔神经学研究所) 和 Belin (加拿大蒙特利尔大学) 的功能性核磁共振成像 (fMRI) 研究表明, 从总体上看, 与左半球相比, 大脑右半球对频率变化 (即音高变化) 更为敏感。具体地说, 左半球听皮层前部和右半球颞上沟的某些区域在处理频率信息的过程中有着显著的激活 (如图 1 所示)^[17]。由此可见, 大脑右半球对音乐的感知, 尤其是对其中音高变化的感知, 十分重要。

2 音乐的结构

像语言一样, 音乐也遵循其内在复杂的规律并拥有精密的结构。音乐理论认为, 和声具有制约音乐形式的结构功能: 它组织音高的纵向结合; 确立或瓦解调性、调式; 发展或终止某一结构; 听众能根据前一段和声预期随之出现的和声的特性。

关于和声的事件相关电位 (ERP) 研究显示, 音乐序进 (musical sequence) 中突然出现的走调和弦 (out-of-key chord) 不仅在 350ms 左右诱发了大脑右半球前部的右前颞负电位 (RATN), 而且在 600ms 左右诱发了大脑后部的正电位 (P600)^[18]。此外, 研究还表明, 乐曲上下文中 (musical context) 不和谐的和弦也能很快诱发大脑右半球前部的右

收稿日期: 2005-12-22

* 国家攀登计划 (批准号: 95-专-09)、国家自然科学基金 (30070260, 30470569, 60435010)、教育部科学技术重点项目基金 (01002, 02170) 和中国科学院知识创新工程方向性项目 (KGCX2-SW-101)。

通讯作者: 周晓林, E-mail: xz104@pku.edu.cn

前负电位 (ERAN) [19]。简而言之, 这些研究清楚地说明, 人类大脑, 特别是其右半球, 对音乐是否和谐相当敏感。恰如和声理论所认为的那样, 人们总是期望乐曲能保持一定的结构性和稳定性[20]。

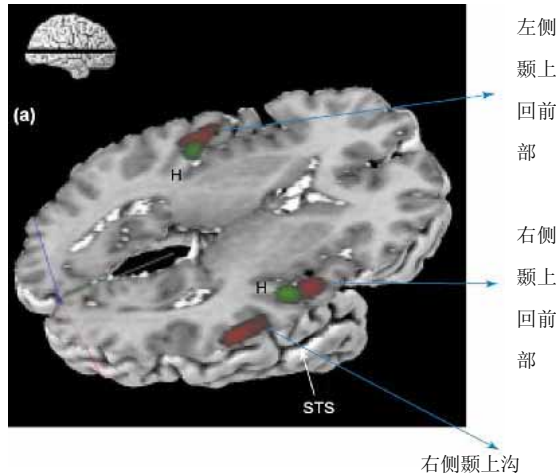


图 1 与感知音高变化相关的脑区

从右侧看大脑横切面的三维图。图中红色区域分别位于左、右半球的颞上回前部和右半球的颞下沟 (STS)。研究显示, 这些区域对语音频率的变化十分敏感。资料来源: 文献[3]

Maess 等研究者 (德国马克斯-普朗克认知神经科学研究所, 2004 年更名为马克斯-普朗克人类认与和脑科学研究所) 在脑磁图 (MEG) 和源分析 (source analysis) 结果的基础上进一步指出, 对和声序进 (harmonic sequence) 的分析和对走调和弦的觉察可能主要是由大脑左半球的布罗卡区及其右半球的对应脑区完成的 (如图 2 所示) [20]。虽然过去认为大脑左半球的布罗卡区主要负责语言认知任务中的句法加工, 但随着研究的逐步深入, 人们发现这一脑区不仅加工语法规则, 而且加工音乐规则。

3 音乐的意义

音乐理论家认为, 作曲家用音乐来表达自己, 音乐所传达的意义是音乐不可或缺的一部分。音乐的意义既来自对客体声音特征的模仿和对某种特定心情的营造, 也来自音乐之外的联想, 以及音乐中时而紧张有力、时而轻快放松的节奏所激发的情感响应[21,22]。即使是一个从未听过贝多芬第三交响曲的人也能够聆听乐曲的过程中自然地联想到“英雄”一词, 而不是“懦夫”。

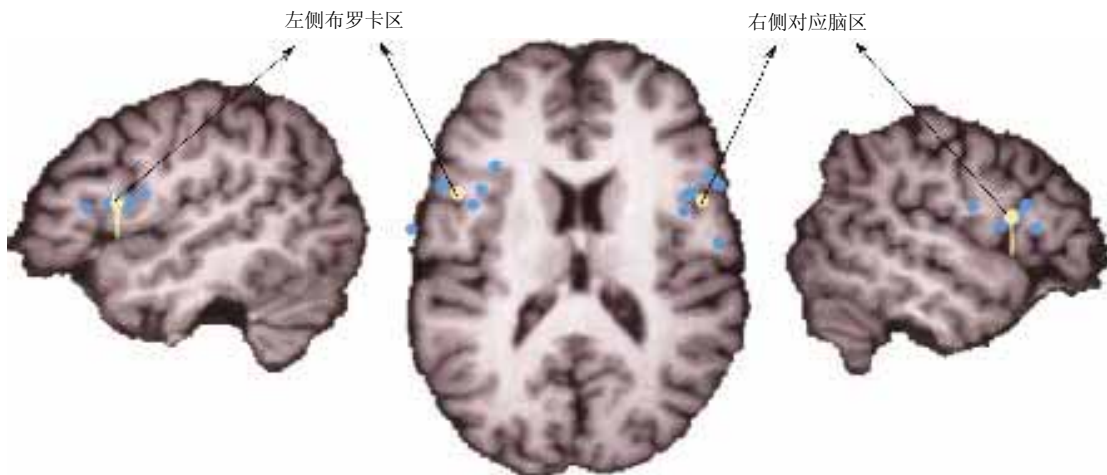


图 2 与加工音乐规则相关的脑区

从左至右分别为大脑左侧矢状面、轴状面和右侧矢状面。黄色标明了大脑左半球的布罗卡区及其右半球的对应脑区。源分析结果认为, 这两个区域在和声序进的分析中起主要作用。资料来源: 文献[20]

Koelsch 等研究者 (德国马克斯-普朗克人类认知和脑科学研究所) 用事件相关脑电位技术测量了乐曲选段是否能够启动相关的词汇意义。结果发现, 即使听众是一些从没听过该乐曲的普通人, 作曲家试图在音乐中表达的意义也能很快地被听众理解, 并激活相关的语义概念。例如, Schönberg

在他的弦乐三重奏中描述了自己心脏病发作时的针刺感, 其中的曲段在听者的大脑中启动了“针”这一语义概念。此外, 那些被音乐术语描述为音域 (pitch range) 较窄的音乐段落会启动“狭小”这一语义概念, 反之, 音域较宽的曲段会启动“宽阔”这一语义概念。最后, 斯特拉文斯基 (Strawinsky)

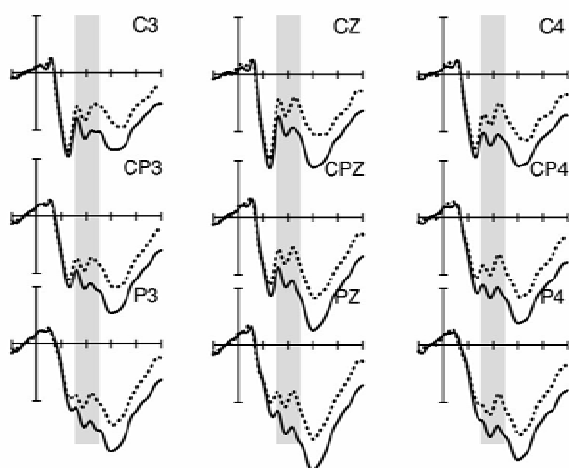


图3 音乐意义加工中的N400效应

上图阴影所示部分表明，由与曲段意义相关的词所诱发的负电位（实线）小于由与曲段意义无关的词所诱发的负电位（虚线）。图中坐标上负下正。其中 C3、Cz、C4 分别表示在大脑中中部左、中、右位置记录到的电位变化；CP3、CPz、CP4 分别表示在大脑中后部左、中、右位置记录到的电位变化；P3、Pz、P4 分别表示在大脑后部左、中、右位置记录到的电位变化。资料来源：文献[23]

一段表达炽烈情感的乐曲则能够激活“红色”的概念。与此相对地，那些与音乐段落意义无关的概念

却不会得到激活。当受试者在听完乐曲后突然读到一些与曲段语义无关的词时，大约 400ms 后其大脑中后部就产生了相应的负电位（N400），表明当前的词与先前听到的音乐段落在意义上并不匹配（即被音乐段落启动的语义概念不同于当前词的语义概念；如图 3 所示）^[23]。

此后的源分析进一步表明，人类大脑中负责加工音乐含义的区域位于左右半球的颞中回后部，接近颞上沟（如图 4 所示）^[23]。

由此可见，音乐所传达的意义比人们想象的要多。乐曲能启动特定的语义概念，它无需假借言语标签（例如英雄式的、热情的、淘气的等等）就可以表达自己。在理解音乐意义的过程中，左右半球颞中回后部承担了十分重要的职责。

4 音乐家与普通人

大多数人都曾经喜爱过某位演奏家、歌唱家或某个乐队，迷恋他们的演出技巧和舞台魅力，羡慕他们的音乐才华。普通大众对音高、意义和结构的敏感性令人惊奇不已，但他们毕竟不是音乐家。认知神经科学家感兴趣的一个问题是，与普通人的相比，音乐家在音乐感知和理解的脑功能方面究竟存在什么特别之处？

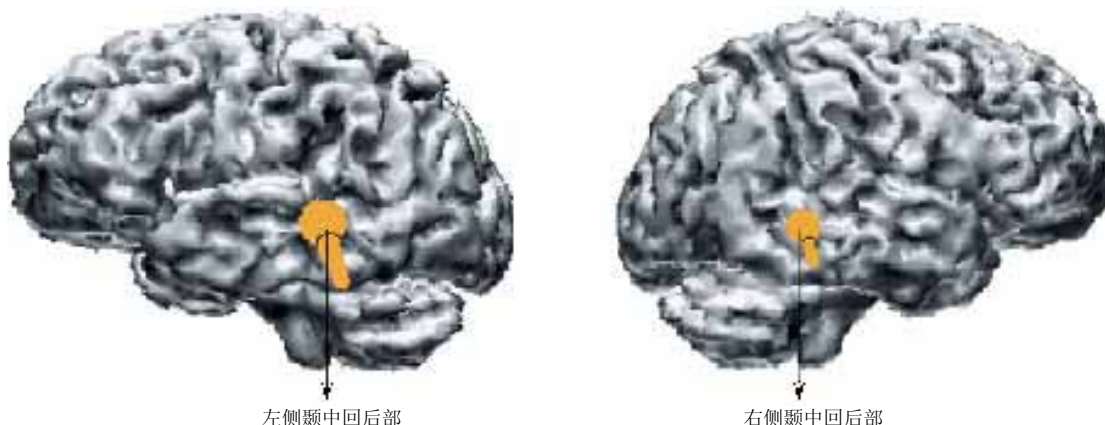


图4 与加工音乐意义相关的脑区

上图从左到右分别显示了大脑左侧矢状面和右侧矢状面。土黄色所标明的部分位于左右半球的颞中回后部，是与加工乐曲的意义密切相关的脑区。资料来源：文献[23]

Lotze（德国图宾根大学）等人发现，音乐家在演奏莫扎特小提琴协奏曲时，大脑运动辅助区的活动水平低于普通人演奏同一乐曲时的脑活动水平。

当音乐家想象自己演奏的情景时，其右半球运动区也保持着较低的活动水平。研究者猜测，上述结果可能是长期的音乐训练造成的；音乐家演奏时的每

个手部动作都经过了反复联系，他们只需要动用较少的认知资源就可以随心所欲地控制每个手部动作。相对而言，没有经过专业训练的普通人则不得不消耗更多的认知资源，以便完成演奏小提琴这样复杂的任务^[24]。

另一方面，Koelsch 等人观察到，音乐家对乐曲中不和谐和弦的敏感度更胜普通人^[25]。此后的

fMRI 结果^[26]清楚地表明，无论是音乐家与普通成年人相比，还是受过一定音乐训练（1年以上乐器演奏训练）的儿童与普通儿童相比，前者在觉察到不和谐和弦时大脑左右半球岛盖部（pars opercularis）和右半球颞上回前部的活动水平都强于后者（如图5所示）。

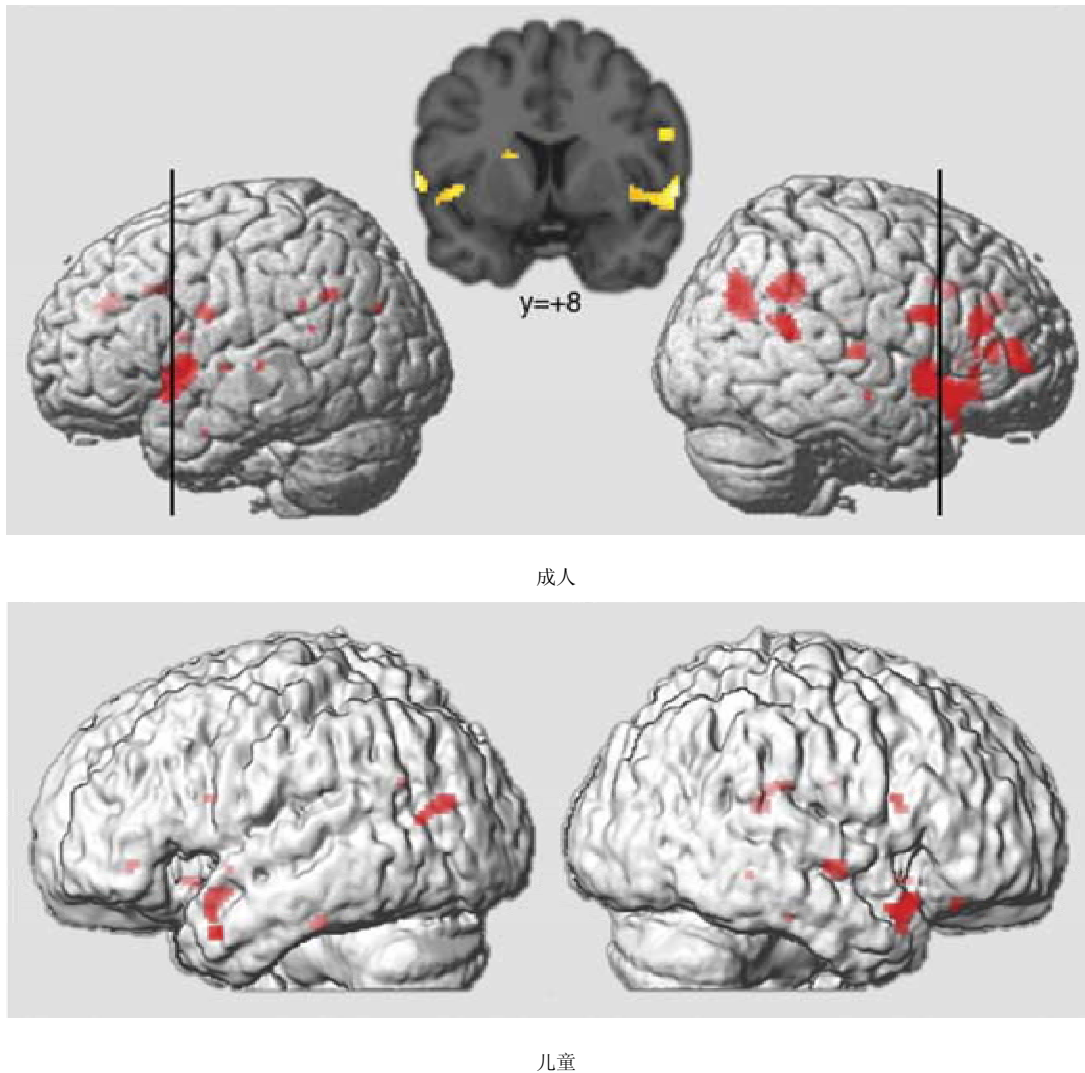


图5 音乐家与普通人的激活差异

上图显示了音乐家与普通成年人相比，在觉察到不和谐和弦时的脑活动差异。从左到右分别是大脑左侧矢状面、横状面和右侧矢状面。红色区域表明，与普通成人相比，音乐家在左右半球岛盖部和右半球颞上回前部的活动较强。下图显示了受过音乐训练的儿童与普通儿童相比，在觉察到不和谐和弦时的脑活动差异。从左到右分别是大脑左侧矢状面和右侧矢状面。红色区域表明，与普通儿童相比，受过音乐训练的儿童在左右半球岛盖部和右半球颞上回前部的活动略强。资料来源：文献^[26]

联系前面的介绍可以知道，上述脑区主要与音乐结构的认知过程有关。可以推测，音乐家胜于常

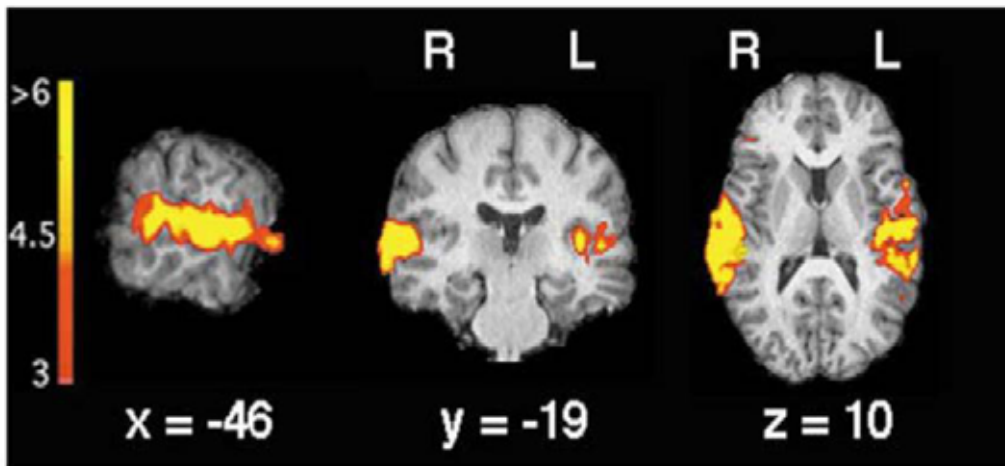
人之处恐怕还在于他们的大脑中存储着一系列特定的音乐规则，故而才会对音乐结构的和谐与否表

现得异常敏感。音乐训练所造就的这种敏锐在儿童（平均年龄仅为 10 岁）身上已经体现出来了。

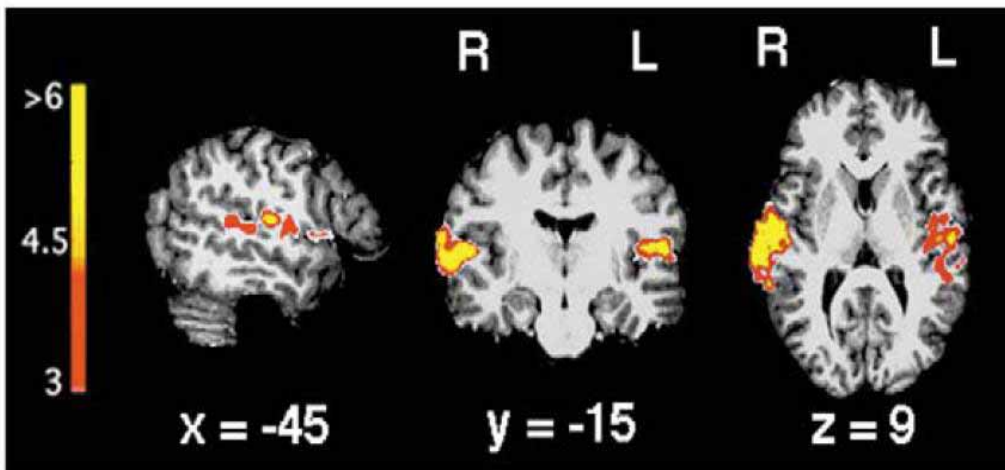
5 西洋音乐与民乐

人们常说，音乐无国界。虽然各个国家和地区的音乐在旋律、和声、节奏和音色上存在着种种差

异，但是在西方文化的哺育中成长起来的孩子并非完全无法领会东方音乐的精神，反之亦同。从认知心理学角度对音乐认知的文化异同开展的研究，近年来逐渐增多，但从神经水平上探讨听者对东西方音乐在感知和理解上差异的研究还不多见^[27]。



听巴洛克音乐



听中国民乐

图 6 与加工音乐风格相关的脑区

上图是小提琴手听巴洛克音乐时的脑活动情况，可以看到左右半球的颞皮层存在明显激活。下图是小提琴手听中国民乐时的脑活动情况，也可以看到左右半球的颞皮层存在明显激活。

图中 R 表示大脑右半球，L 表示大脑左半球。X、Y 和 Z 所对应的分别是大脑右侧矢状面、横状面和水平面。颜色从红色到黄色表示大脑的活动水平从低到高。资料来源：文献[30]

最初的研究结果似乎并不支持“音乐无国界”的观点。一个研究指出，土耳其受试者在听音乐的过程中更注意土耳其耐笛（ney）的乐声，而非西

洋乐器大提琴的乐声^[28]。一个 48 岁土耳其女癫痫患者的案例（该案例为一种音乐诱发的癫痫）则显示，只有土耳其阿拉伯风格的乐曲（无论乐曲本身

是否为患者所熟悉)才能诱其发病,任何其它风格的音乐均无此效果^[29]。

Morrison (美国华盛顿大学)等研究者给 6 名专业的西方小提琴手播放亚力山德罗·斯卡拉蒂(Alessandro Scarlatti)的《第三小调高音竖笛、弦乐和低音奏鸣曲》(Sonata Terta in C minor for Treble Recorder, Strings and Basso Continuo)第二和第三乐章的选段(典型的巴洛克音乐,由竖笛、小提琴、大提琴和大键琴等演奏),以及中国民乐《柳青娘》选段(由管乐器、二胡和古筝等演奏)。出乎意料的是,无论是听巴洛克风格的乐曲,还是听中国民乐,这些职业音乐人大脑右半球颞横回和左半球颞上回均有显著的激活,而且大脑的活动水平在两种音乐条件下并无显著差异(如图 6 所示)^[30]。这似乎暗示着西方听众对东西方音乐的认知方式可能是相同的,文化差异并不从根本上影响他们对音乐的感知和理解。

然而,要断言“音乐无国界”需要慎之又慎。因为这个研究仅仅测试了西方听众在聆听东西方音乐时的脑活动情况,并没有检查东方听众在同样条件下的脑活动水平,其结果的可推广程度尚待商榷。Morrison 等研究者也无法否定下面这种可能性,即西方听众在以西方文化的传统方式理解西方音乐的同时,也不自觉地以同样的方式体验中国民乐。可能正是因为他们对两种音乐采取了相同的理解方式,所以才表现出相似的脑活动模式。但如果不同国家和地区的人在通常情况下是以不同的方式理解同一音乐,那么文化差异不影响音乐认知这一观点就有些站不住脚了^[31]。

不管谁是谁非,实证研究才是最有说服力的。在仔细考察中国听众对西方音乐和本土民乐之间的认知差异、比较中西方听众在两种音乐条件下的脑活动之前,对于“音乐无国界”的说法还是应持谨慎态度。

6 小结

总之,在音乐的认知上,左右大脑确实存在着某种程度的分工:右半球的颞叶承担了知觉音高、分析音乐结构和理解乐曲含义的任务,左半球的颞叶则在分析音乐结构和理解乐曲含义的过程中发挥了一定作用。音乐家在音乐演奏和感知等方面确实存在异于常人之处。

虽说对音乐认知的脑机制之研究,即使在西方

发达国家也仅处于起步阶段,但英国皇家学会(The Royal Institution)早在 2002 年 7 月就集英、美、加三国科学家于一堂,召开了名为“音乐之脑”(The Musical Brain)的高级研讨会。在次年 7 月出版的《自然》杂志《神经科学》专刊上,关于音乐认知(主要是关于西方调性音乐的认知)的理论和综述性文章就占到了将近三分之一,可见其对音乐认知研究的重视程度。

相比之下,尽管中国的民族音乐源远流长,所具有的独特表现力和鲜明个性是西方音乐无法替代的,然而国内从认知神经科学角度、以高技术手段研究音乐认知的领域尚是一片空白,值得科学界反省。

参考文献

- [1] Krumhansl C L. Cognitive Foundations of Musical Pitch. Oxford: Oxford University Press, 1990
- [2] Trehub S E. Musical predispositions in infancy. Annual New York Academic Science, 2001, 930: 1~16
- [3] Zatorre R J, Belin P, Penhune V B. Structure and function of auditory cortex: music and speech. Trends in Cognitive Sciences, 2002, 6: 37~46
- [4] Peretz I, Kolinsky R, Tramo M, Labrecque R, Hublet C, Demeurisse G, Belleville S. Functional dissociations following bilateral lesions of auditory cortex. Brain, 1994, 117: 1283~1301
- [5] Peretz I, Hebert S. Toward a biological account of music experience. Brain and Cognition, 2000, 42 (1): 131~134
- [6] Milner B A. Laterality effects in audition. In: Mountcastle V. Interhemispheric Relations and Cerebral Dominance. Baltimore: Johns Hopkins Press, 1962. 177~195
- [7] Divenyi P, Robinson A. Nonlinguistic auditory capabilities in aphasia. Brain and Language, 1989, 37: 290~326
- [8] Samson S, Zatorre R J. Contribution of the right temporal lobe to musical timbre discrimination. Neuropsychologia, 1994, 32: 231~240
- [9] Zatorre R J, Samson S. Role of the right temporal neocortex in retention of pitch in auditory short-term memory. Brain, 1991, 114: 2403~2417
- [10] Zatorre R J. Discrimination and recognition of tonal melodies after unilateral cerebral excisions. Neuropsychologia, 1985, 23: 31~41
- [11] Zatorre R J, Halpern A R. Effect of unilateral temporal-lobe excision on perception and imagery of songs. Neuropsychologia, 1993, 31: 221~232
- [12] Ligeois-Chauvel C, Peretz I, Babai M, Laguitton V, Chauvel P. Contribution of different cortical areas in the temporal lobes to music processing. Brain, 1998, 121: 1853~1867

- [13] Sidtis J J, Volpe B T. Selective loss of complex-pitch or speech discrimination after unilateral lesion. *Brain and Language*, 1988, 34: 235~245
- [14] Robin D A, Tranel D, Damasio H. Auditory perception of temporal and spectral events in patients with focal left and right cerebral lesions. *Brain and Language*, 1990, 39: 539~555
- [15] Penhune VB, Zatorre RJ, Feindel WH. The role of auditory cortex in retention of rhythmic patterns as studied in patients with temporal lobe removals including Heschl's gyrus. *Neuropsychologia*, 1999, 37: 315~331
- [16] Johnsrude I S, Penhune V B, Zatorre R J. Functional specificity in the right human auditory cortex for perceiving pitch direction. *Brain*, 2000, 123: 155~163
- [17] Zatorre R J, Belin P. Spectral and temporal processing in human auditory cortex. *Cerebral Cortex*, 2001, 11: 946~953
- [18] Patel A D, Gibson E, Ratner J, Besson M., Holcomb P. Processing syntactic relations in language and music: an event-related potential study. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 1998, 10: 717~733
- [19] Koelsch S, Gunter T, Friederici A D, Schröger E. Brain indices of music processing: 'non-musicians' are musical. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 2000, 12: 520~541
- [20] Maess B, Koelsch S, Gunter T C, Friederici A D. Musical syntax is processed in Broca's area: an MEG study. *Nature Neuroscience*, 2001, 4: 540~545
- [21] Krumhansl C L. Perceptual analysis of Mozart's piano sonata KV 282: segmentation, tension, and musical ideas. *Music Perception*, 1996, 13: 401~432
- [22] Krumhansl C L. An exploratory study of musical emotions and psychophysiology. *Canadian Journal of Experimental Psychology*, 1997, 51: 336~352
- [23] Koelsch S, Kasper E, Sammler D, Schulze K, Gunter T, Friederici A D. Music, language and meaning: brain signatures of semantic processing. *Nature Neuroscience*, 2004, 7: 302~307
- [24] Lotze M, Scheler G, Godde B, Erbt M, Groddi W, Birbaumer N. Comparison of fMRI-activation maps during music execution and imagination in professional and non-professional string players. *NeuroImage*, 2000, 11: S67
- [25] Koelsch S, Schmidt B H, Kansok J. Influences of musical expertise on the ERAN: an ERP-study. *Psychophysiology*, 2002, 39: 657~663
- [26] Koelsch S, Fritz T, Schulze K, Alsup D, Schlaug G. Adults and children processing music: an fMRI study. *NeuroImage*, 2005, 25: 1068~1076
- [27] Carterette E C, Kendall R A. Comparative music perception and cognition. In: Deutsch D. *The Psychology of Music*. San Diego: Academic Press, 1999: 725~791
- [28] Arikani M K, Devrim M, Oran O, Inan S, Elhah M, Demiralp T. Music effects on event-related potentials of humans on the basis of cultural environment. *Neuroscience Letters*, 1999, 268: 21~24
- [29] Genç B O, Genç E, Tastekin G, Iihan N. Musicogenic epilepsy with ictal single photon emission computed tomography (spect): could these cases contribute to our knowledge of music processing. *European Journal of Neurolinguistics*, 2001, 8: 191~194
- [30] Morrison S J, Demorest S M, Aylward E H, Cramer S C, Maravilla K R. FMRI investigation of cross-cultural music comprehension. *NeuroImage*, 2003, 20 (1): 378~384
- [31] Swain J P. *Musical Languages*. New York: Norton, 1997

The Musical Brain

Ye Zheng, Zhou Xiaolin

(Department of Psychology, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: In recent years a growing number of researches have been conducted to address the neural basis of music comprehension with ERP and fMRI technique. These studies provided new evidences about the on-line processing of pitch, the music-specific syntax and meaning in left and right hemispheres. Additionally, there are studies concerning whether musicians and non-musicians processes music-related information in the same way. Cross-cultural studies also examined whether western and non-western music active same brain areas in the same pattern. New trends and issues pertaining to the study of music processing with fMRI and ERP technique are covered and discussed in this review.

Key words: music cognition, neural substrate, fMRI, ERP.