

DOI:10.11784/tdxbz20240431

基于脑电的音乐经验影响频率相关音乐特征感知研究

倪广健^{1,2,3}, 冯昆芸¹, 郑琪^{1,3}, 刘洪兴^{1,3}, 金嘉祺¹, 白艳茹^{1,2,3}

(1. 天津大学医学工程与转化医学研究院, 天津 300072; 2. 脑机交互与人机共融海河实验室, 天津 300392;
3. 天津大学先进医用材料与医疗器械全国重点实验室, 天津 300072)

摘要: 最近的研究表明, 音乐家对声音的辨别能力比非音乐家更强。然而, 关于音乐经验能否增强频率相关音乐特征的感知尚无共识。本研究从行为学表现和神经反应两个维度探究音乐经验对感知频率相关音乐特征的潜在影响。实验采用 oddball 范式, 选取音高、音程以及和弦作为表征频率相关音乐特征的感知内容。实验过程记录了两组受试者(有音乐经验受试者作为音乐组, 无音乐经验受试者作为对照组)在主动辨识任务中的行为学反应和脑电图(EEG)数据, 对其进行事件相关电位和微状态分析。行为学结果发现, 音乐组识别偏差刺激的正确率更高、反应时间更短。事件相关电位分析结果发现, 在初级听觉皮层反应(N1 成分)上音乐组与对照组之间并未观察到统计学意义上的明显差异。然而, 音乐组的失匹配负波(MMN)潜伏期更短, 与更深层次认知加工相关的 P3b 响应明显增强。在 P3b 对应时间窗内进一步的微状态分析结果显示, 在和弦感知任务中音乐组的各项微状态特征参数(全局解释方差、覆盖率、持续时间)显著更高。结合脑地形图分析发现, 音乐经验增强了顶叶区域的激活强度并扩大了激活范围。以上结果表明, 音乐经验虽在声音感知的初步处理阶段影响有限, 但在信息处理的后期加工阶段能显著提升个体对声音的敏感度与认知加工效率。

关键词: 脑电图; 音乐经验; 事件相关电位; 微状态

中图分类号: R318

文献标志码: A

文章编号: 0493-2137(2025)06-0629-11

EEG-Based Investigation of the Effects of Musical Experience on the Perception of Frequency-Related Musical Features

Ni Guangjian^{1,2,3}, Feng Kunyun¹, Zheng Qi^{1,3}, Liu Hongxing^{1,3}, Jin Jiaqi¹, Bai Yanru^{1,2,3}

(1. Academy of Medical Engineering and Translational Medicine, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
2. Haihe Laboratory of Brain-Computer Interaction and Human-Machine Integration, Tianjin 300392, China;
3. State Key Laboratory of Advanced Medical Materials and Devices, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Recent studies have shown that musicians have an enhanced ability to distinguish sounds compared with non-musicians. However, there is no consensus on whether musical experience can enhance the perception of frequency-related musical features. Consequently, this study explored the potential influence of musical experience on the perception of frequency-related musical features from the perspectives of behavioral performance and neural response. The oddball paradigm was adopted in the experiment, and pitch, interval, and chord were selected as perceptual parameters to represent frequency-related musical features. The behavioral responses and electroencephalography (EEG) data of two groups of subjects (those with musical experience as the music group and those without musical experience as the control group) were recorded during the active recognition task, and event-related potentials and microstates were analyzed. Behavioral results revealed that the subjects in the musical group showed higher accuracy and shorter reaction times in identifying deviant stimuli. Event-related potential analysis showed that there was no

收稿日期: 2024-04-30; 修回日期: 2024-05-20.

作者简介: 倪广健(1981—), 男, 博士, 教授.

通信作者: 倪广健, niguangjian@tju.edu.cn.

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2023YFF1203500); 国家自然科学基金资助项目(81971698).

Supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2023YFF1203500), the National Natural Science Foundation of China (No. 81971698).

statistically significant difference between the primary auditory cortex response (N1 component) of the musical group and control group subjects. However, the musical group subjects showed a shorter mismatched negative (MMN) wave latency and a significantly enhanced P3b response, which are associated with deeper cognitive processing. Further microstate analysis in the corresponding time window of P3b showed that the values of microstate feature parameters (global explained variance, coverage rate, and duration) of the musical group subjects were significantly higher in the chord perception task than in the other tasks. Combined with brain topographic map analysis, it was found that musical experience enhanced activation intensity and expanded the activation range in the parietal region. Thus, the above results suggest that although musical experience has a limited effect on the initial processing stage of sound perception, it significantly enhances an individual's sensitivity to sound and cognitive processing efficiency in the later processing stage of information processing.

Keywords: electroencephalography (EEG); musical experience; event-related potential (ERP); microstate

音乐承载着巨大的信息量,对社会和文化生活至关重要。音乐感知是人类听觉系统执行的一项复杂任务,反映了听觉处理和大脑功能的完整性。在音乐的构成要素中,频率、强度和位置都与音乐密切相关,频率在句法上比强度更重要,而强度在表达上比位置更重要^[1]。因此,频率是识别和区分音乐作品及其组成主题的首要线索。音高、音程和和弦是音乐的基本元素,直接反映了音符的频率和声音的频谱特征。这些元素定义了声音的高低、间隔和和声结构,从而决定了音乐作品的旋律和和声质感。此外,音乐所伴随的诸如谐波和共鸣等现象,表明频率信息在音乐的感知和体验中极为关键。对频率变化的敏感性也是评估听力健康的一个重要方面。听力敏锐度的下降,特别是对细微频率变化的识别能力减退,通常预示着听力退化^[2]。及时发现这些变化可以更早采取干预措施,如佩戴助听器或参加专门训练,以保护或改善听觉功能。多项研究证实,音乐训练可以提高音乐感知、语言技能和认知功能^[3]。这是由于长期音乐训练会导致大脑相关区域(如听觉皮层、前额叶、顶叶等)结构与功能的改变,包括灰质厚度增加、神经连接增强、激活模式优化等^[4]。

为了深入探究音乐经验影响音乐感知的神经基础,行为学和脑电图(electroencephalography, EEG)技术研究已被广泛用于研究音乐家和非音乐家的音乐感知。EEG 因其较高的时间分辨率,可以帮助人们更深入地探索音乐感知随时间变化的过程,进而探究音乐经验对大脑神经可塑性的影响。Hansen 等^[1]的研究发现在简单的 oddball 范式中,音乐经验对音乐特征的感知无促进作用。然而, Burkhard 等^[5]发现具有绝对音高的音乐家在主动辨别音调时 N1 反应增强,表明先前的音乐经验可能提高了他们对音乐特征变化的感知和辨别能力^[4]。对比音乐家和非音乐家对谐和和弦与不谐和和弦的事件相关电位(event-

related potential, ERP)发现,音乐家的早期 ERP 成分(P100、N200)幅值更高,这反映出他们对声音处理的效率更高^[6]。Arndt 等^[7]的研究发现音乐家在主动行为测试中能够区分其个体听觉差异阈值范围内不同音高的频率,但在被动聆听时却并未诱发出显著的失匹配负波(mismatch negativity, MMN)和 P3a,表明音乐经验可能仅作用于注意态下的加工^[8]。相反, Virtala 等^[9]通过改变电吉他和弦的频率特性作为偏差刺激,发现在被动聆听过程中音乐家引发了更早和更强烈的 MMN 和 P3a 反应,表明他们的听觉处理对这种频率的改变更为敏感。音乐经验会影响音乐感知的后期认知阶段,这反映在 ERP 的后期成分(P300、N500)中。因此,大量 ERP 证据已经表明,音乐经验会改变音乐感知过程中的皮层处理。

尽管多数研究表明音乐经验能够提升个体的音乐感知能力,但其背后的神经响应模式尚不完全清晰。现有研究主要集中于相对单一的音乐特征,并且大多关注专业的音乐家,而对具有音乐经验但无专业学位的音乐实践者的研究相对较少,缺乏对这一群体更系统、更全面的探索。此外,现有研究的分析方法多集中于 ERP,忽略了大脑的动态协调模式。微状态分析通过探索大脑活动的瞬时稳定模式,捕捉大脑活动的时空动态,能够更全面地理解音乐经验如何影响脑功能的整体协调。为了更全面地揭示音乐感知任务中的神经动态,本研究引入了微状态分析作为补充。

为此,本研究以音高、音程和和弦表征频率相关音乐特征,探究音乐经验是否能促进个体对频率相关音乐特征的感知。通过分析 N1、MMN、P3b 成分以及 P3b 对应的微状态,深入比较有无音乐经验的个体在这些任务中的神经活动,旨在探索音乐经验对个体神经反应特征的影响。具体来说,考察有无音乐经验的个体感知频率相关的音乐特征,包括音高、音程

和和弦。音高感知评估的是参与者识别单音频率的能力,音程则涉及判断成对音符之间的频率差异,和弦则要求参与者同时感知多个频率。研究结果深化了对音乐经验影响频率相关音乐特征感知的理解,并为未来音乐干预治疗及听觉感知提供了神经科学依据。

1 材料和方法

1.1 受试者

本研究共招募了 24 名受试者,并将其分为两组:音乐组由 12 名受试者组成,他们均具有音乐经验,熟识基本乐理且至少有 5 a 的西方乐器演奏经验,每周至少练习 2 h;对照组由 12 名受试者组成,这些受试者除在基础教育中接触的标准音乐课程外,未曾有过系统学习音乐或者长期自学音乐的经验。将具有音乐经验的受试者定义为具备音乐实践经历的个体,而非严格意义上的“音乐家”,因为他们并未获得正式的音乐相关学位。

头部移动、眨眼、吞咽等动作都会造成伪迹,当被伪迹污染的部分占整个数据的比重超过 30% 时,会影响数据质量和分析结果的可靠性,因此有 3 名受试者(2 名音乐组受试者,1 名对照组受试者)的 EEG 信号未被纳入后续分析。最终,本研究对 10 名音乐组受试者(5 名男性,5 名女性,平均年龄 (22.50 ± 1.58) 岁,年龄范围 20~25 岁)以及 11 名对照组受试者(6 名男性,5 名女性,平均年龄 (23.08 ± 1.16) 岁,年龄范围 22~25 岁)的数据进行分析。10 名音乐组受试者的具体信息在表 1 中详细列出,包括每位受试者的年龄、性别、学习音乐的年限、乐器种类和每周练习音乐的时长。所有受试者均为右利手,无神经系统或听觉障碍,视力正常或矫正后正常,且未服用影响中枢神经系统的药物。所有受试者在参与研究前

表 1 音乐组受试者的具体信息

Tab.1 Specific information of subjects in the music group

被试序号	年龄/岁	性别	学习乐器的年限/a	学习乐器的种类	每周练习时长/h
1	22	女	6	钢琴	3
2	22	男	5	吉他	5
3	21	女	6	小提琴	6
4	23	女	10	钢琴	5
5	25	男	9	吉他	6
6	21	女	8	吉他	6
7	24	男	10	钢琴	4
8	24	男	8	小提琴	2
9	20	男	7	钢琴	7
10	23	女	6	大提琴	5

都自愿签署了知情同意书。本研究已获得天津大学医学伦理审查委员会的批准。

1.2 刺激材料与实验设计

使用 oddball 实验范式,设计了 3 个实验任务:音高感知实验、音程感知实验与和弦感知实验。音高感知实验中标准刺激选择 D4(小字一组)的钢琴声,偏差刺激选择 F4(小字一组)的钢琴声,音程感知实验中标准刺激选择 D4~F4,相差 3 个半音(约 55 Hz),偏差刺激选择 D4~B4,相差 9 个半音(约 199 Hz),和弦感知实验中标准刺激选择 C3-G3-C4-G4 组成的四音和弦,偏差刺激选择 C3-F#3-C#4-G4 组成的四音和弦,其中标准刺激的和弦仅包含纯四度、纯五度和八度,其频率组合在比例上接近整数比,在听感上协和稳定,偏差刺激的和弦包含两个增四度,其频率组合的比例复杂,在听感上尖锐不稳定。实验中所有声音刺激的强度均为 65 dB,用作声音刺激的音乐特征如图 1 所示,图 1(a)、(b)、(c)分别为音高、音程、和弦感知任务中的标准刺激和偏差刺激。



图 1 3个实验中声音刺激的音乐特性

Fig.1 Musical properties of sound stimuli in three experiments

如图 2 所示,将标准刺激与偏差刺激的比例设置为 5 : 1。实验总共包括 540 个试次,每个感知任务包含 180 个试次。标准刺激和偏差刺激的呈现模式是伪随机的,确保偏差刺激只出现在标准刺激之后。每个实验的前 5 个刺激均是标准刺激,作为基线。受试者必须集中精力分辨连续出现的刺激,并在听到偏差刺激时按下鼠标左键。每个刺激持续时间为 340 ms,

2 个刺激之间的间隔设定为 1 130 ms. 实验刺激的呈现和行为反应的记录均使用 E-Prime 软件进行.

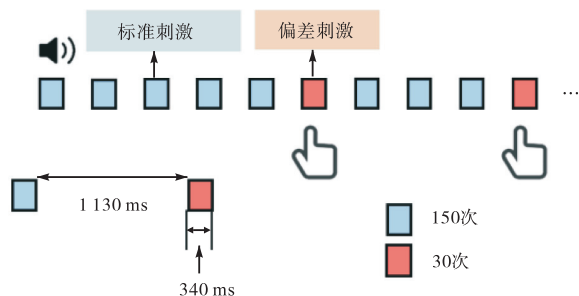


图 2 实验范式示例

Fig.2 Examples of experimental paradigms

1.3 EEG 的记录与分析

EEG 数据通过 64 通道电极帽采集, 并通过 Net Amps 400 放大器进行放大, 其中 64 个电极根据国际 10~20 系统及其附加位置分布设置. 在实验过程中, 保证所有电极的阻抗低于 50 kΩ. 物理参考电极位于 Cz 点, 接地电极设置在 CPz 和 Pz 两点之间的 COM 点上, 采样率为 1 000 Hz.

原始 EEG 信号通过 Matlab (R2019b) 软件以及开源工具包 eeglab (v2021.1) 进行处理, 以提高分析质量. 信号首先经过 0.5~30.0 Hz 带通滤波和 50 Hz 陷波滤波, 以减少低频基线漂移和 50 Hz 工频干扰. 然后将数据降采样至 256 Hz, 并选择平均参考进行重参考. 采用球型样条插值对不良电极进行插值处理 (不超过 3 个), 并剔除幅值大于 ±100 μV 的坏段, 最后进行独立成分分析去除眼球运动、心电信号、肌电活动和通道噪声等带来的伪迹. 对刺激开始前 100 ms 到开始后 900 ms 的数据进行分段, 并对 -100~0 ms 的数据进行基线校正. 在音程感知任务中, 声音刺激由两个声音组成, 但标签标记在第 1 个声音出现的时刻点. 若将标签标记在第 2 个声音出现的时刻点, 则会导致基线不稳, 因此音程感知任务中 ERP 潜伏期显著长于其他任务. 对于 N1 成分, 在叠加平均后得到的波形在峰值处选取 20 ms 的时间窗计算平均电位和潜伏期. 而对于 MMN 成分, 选择以峰值为中心前后共 30 ms 时间窗进行分析. 关于 P3b 成分的分析选择了以峰值为中心前后共 50 ms 的时间窗. 不同 ERP 成分选择的时间窗不一致, 这是因为它们反应速度、潜伏期范围和生理机制存在差异. 选择这些时间窗是基于先前的研究成果^[10], 这些研究提供了关于分析各成分的最佳时间窗信息, 确保能够最准确地捕捉相关的神经反应.

为了分析 ERP 的微状态, 以刺激开始时作为 0

时刻, 将数据重新分段为 0~800 ms, 对每个任务下所有被试的偏差刺激脑电数据进行叠加平均后, 使用 cartool 软件进行微状态分析. 对数据进行地形图原子化与凝聚层次聚类, 分别提取 3 个不同感知任务的微状态最佳模板, 根据全局解释方差 (global explained variance, GEV)、KL 准则和 MeanCrit 准则确定最佳聚类数量^[11]. 将最佳模板匹配到组平均和每个被试的 EEG 数据, 得到组平均和每个被试在刺激情况下的微状态序列地形图及相关参数. 随后通过个体数据匹配状态模板的结果, 分析和对照每个微状态在各个组 ERP 响应中的情况, 选择持续时间、平均 GEV、平均全局场功率 (global field power, GFP)、覆盖率 4 个指标进行统计学分析.

Shapiro-Wilk 检验结果显示, 行为学以及脑电特征参数的数据均服从正态分布. 同时, levene 方差等同性检验显示, 两组数据满足方差齐性, 且本研究中样本量较小, 故采用独立样本 *t* 检验进行两组之间的差异比较, 通过 spss26 软件完成.

2 结果

2.1 行为学结果

在 3 项实验任务中, 要求受试者在 1 s 内对偏差刺激进行按键响应, 对标准刺激则不做反应. 采集行为反应数据后, 对音乐组和对照组受试者在 3 个实验任务中的正确率进行 *t* 检验分析, 结果如图 3 所示 (本文所有图片的误差棒均表示标准差). 在正确率方面, 音乐组比对照组的正确率更高. 在音高感知和音程感知任务中, 音乐组的正确率达到 100.00%. 音高: 音乐组的准确率为 100.00%, 对照组的准确率为 99.30% ± 1.76%; 音程: 音乐组的准确率为 100.00%, 对照组的准确率为 99.56% ± 1.03%; 和弦: 音乐组的准确率为 99.94% ± 0.13%, 对照组的准确率为 97.18% ± 3.71%. 只有在和弦感知任务中, 两组之间的正确率存在统计学差异 (音高: $t(19) = 1.316, p = 0.218$; 音程: $t(19) = 1.420, p = 0.187$; 和弦: $t(19) = 2.460, p <$

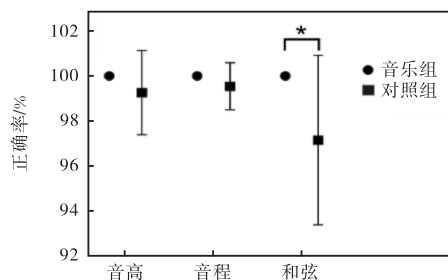


图 3 3 个实验的正确率

Fig.3 Accuracy of the three experiments

0.050).

关于反应时间的 t 检验结果如图 4 所示, 音程感知任务的反应时间最长, 原因是该任务中的刺激包含了 2 个声音, 直到第 2 个声音出现受试者才做出反应, 使得反应时间延长 170 ms, 减去 170 ms 后, 和弦感知任务中的反应时间最长. 音高: 音乐组的反应时间为 (465.96 ± 91.93) ms, 对照组的反应时间为 (571.03 ± 110.13) ms; 音程: 音乐组的反应时间为 (614.16 ± 74.51) ms, 对照组的反应时间为 (699.86 ± 83.32) ms; 和弦: 音乐组的反应时间为 (479.85 ± 81.24) ms, 对照组的反应时间为 (620.08 ± 79.8) ms.

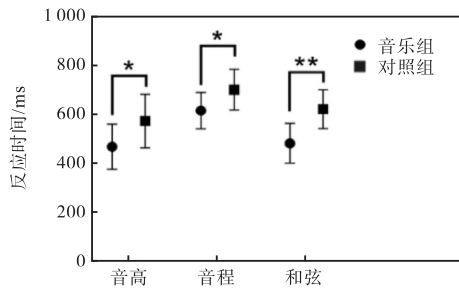


图 4 3个实验的反应时间

Fig.4 Reaction time of the three experiments

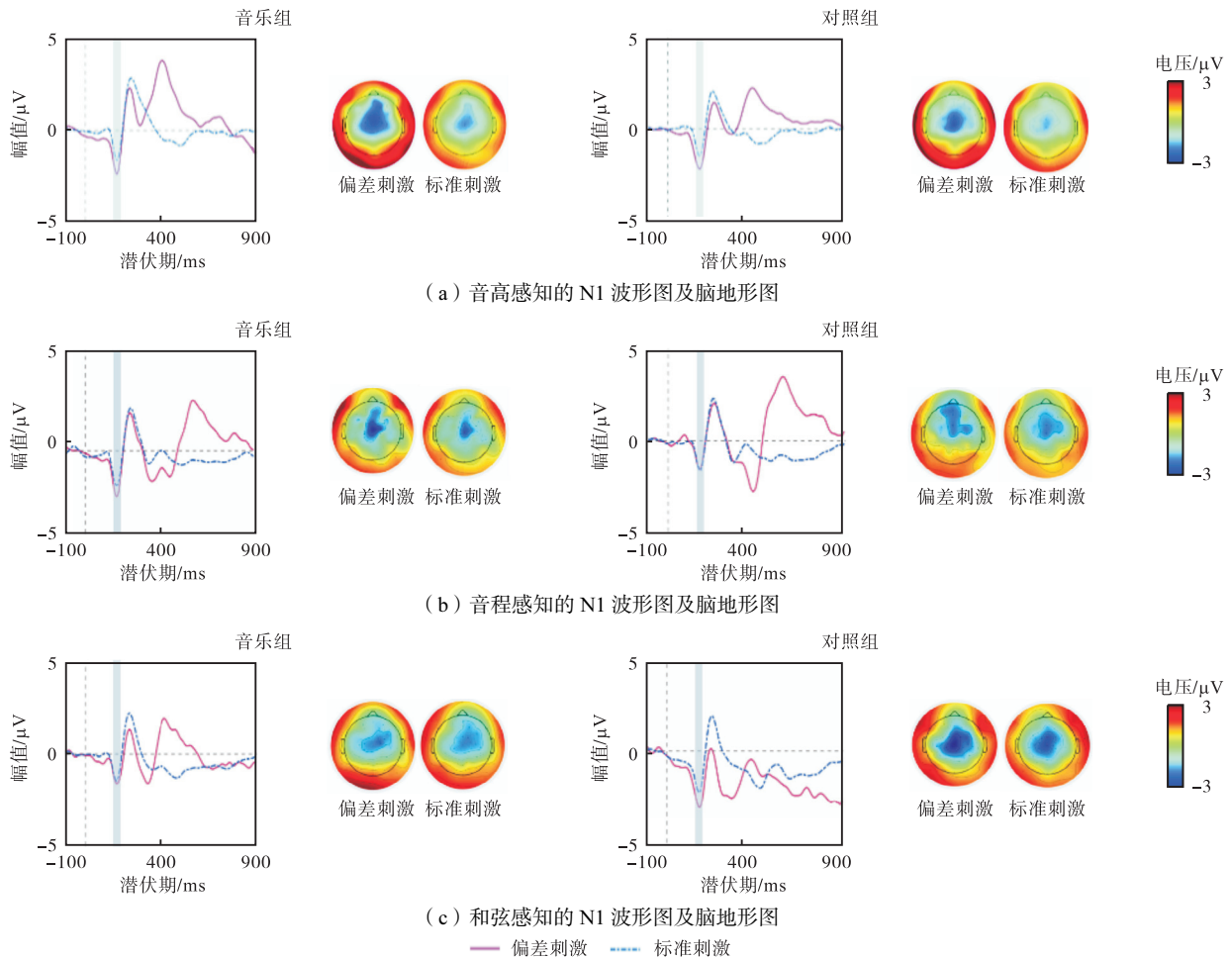


图 5 3个实验的 N1 波形图及脑地形图

Fig.5 N1 waveforms and brain topography of the three experiments

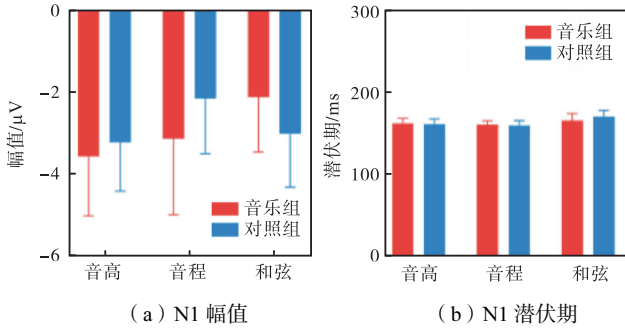
在 3 项感知任务中, 两组间的反应时间均具有统计学差异 (音高: $t(19) = 2.360, p < 0.050$; 音程: $t(19) = 2.470, p < 0.050$; 和弦: $t(19) = 3.980, p < 0.010$), 其中和弦感知任务中的差异最为明显, 与正确率的趋势一致.

2.2 ERP 结果

2.2.1 N1

图 5(a)、(b)、(c) 分别为音乐组和对照组在音高、音程和和弦 3 个不同的感知任务中的 N1 成分波形图及其峰值处的脑地形图. 根据脑地形图的分布以及前人的经验, 选择电极 Cz 作为感兴趣的电极, 在时间窗内计算 N1 的平均幅值和潜伏期. 研究结果表明, 在 Cz 电极处两个组都观察到了明显的 N1 成分, 相比于标准刺激, 显然偏差刺激诱发了更大的 N1 成分, 反映了大脑对音乐序列变化的敏感性和即时处理能力.

音乐组和对照组 N1 幅值 t 检验分析结果如图 6(a) 所示, 在音高和音程任务中, 与对照组相比, 音乐组的 N1 幅值更大, 但差异无统计学意义; 然而在和弦任务中, 对照组的 N1 幅值大于音乐组, 但差异



(a) N1 幅值 (b) N1 潜伏期
图 6 N1 幅值和潜伏期的统计结果

Fig.6 Statistical results of N1 amplitude and latency

仍然无统计学意义(音高: $t(19) = 0.608, p = 0.551$; 音

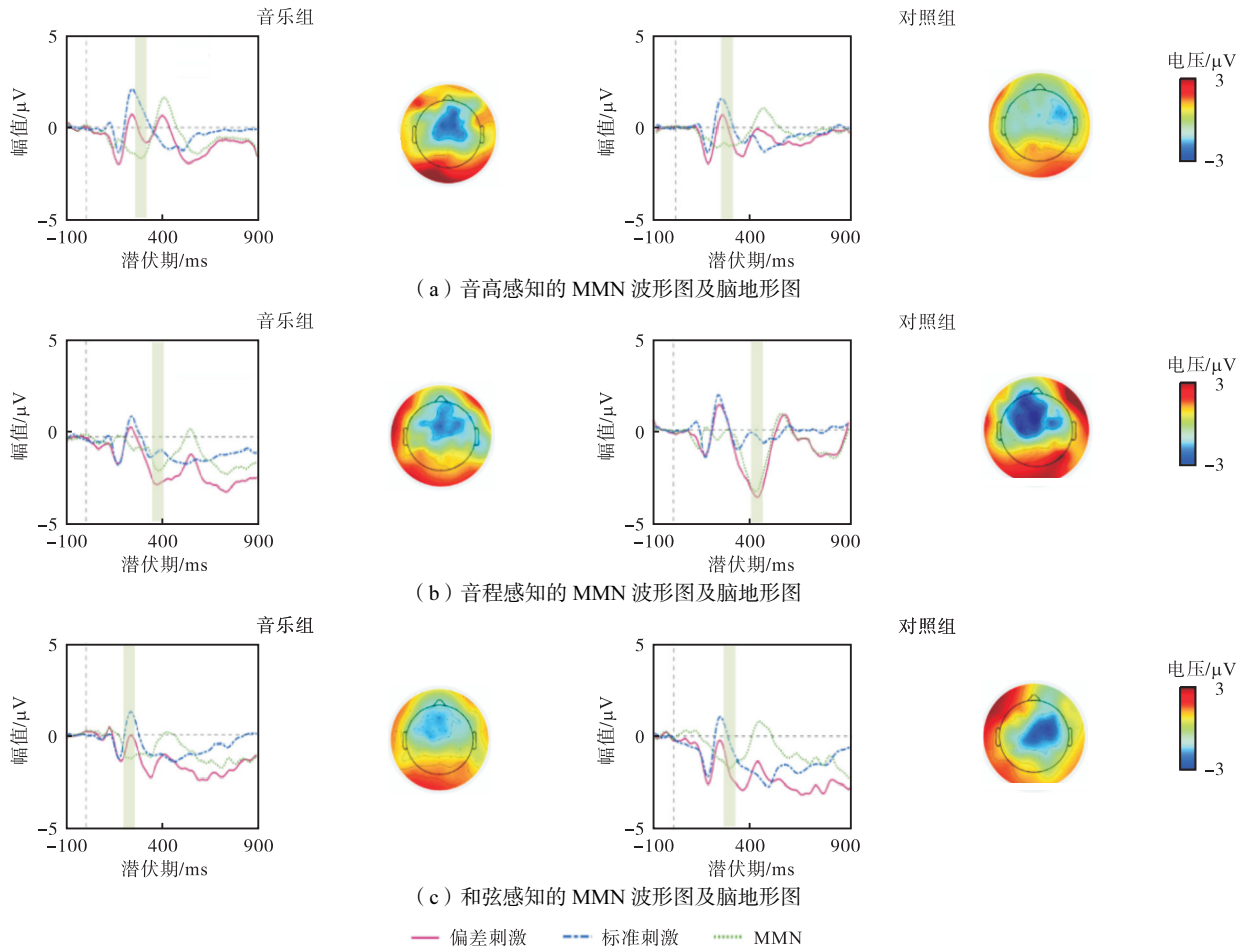


图 7 3 个实验的 MMN 波形图及脑地形图

Fig.7 MMN waveforms and brain topography of the three experiments

间的 MMN 幅值无统计学差异(音高: $t(19) = 0.922, p = 0.368$; 音程: $t(19) = 1.418, p = 0.172$; 和弦: $t(19) = 0.463, p = 0.649$). 在音程感知任务中, 对照组的 MMN 幅值虽然大于音乐组, 但仍未达到统计学显著水平, 这可能是由于对照组中一些个体的差异性较大, 导致该组的方差有所增加. MMN 潜伏期的 t 检验结果如图 8 (b) 所示, 在较为简单的音高任务中, 对照组的 MMN 潜伏期反而短于音乐组(音高: $t(19) = 3.677, p < 0.010$). 然而, 在音程与和弦感知任务中,

程: $t(19) = 1.393, p = 0.180$; 和弦: $t(19) = 1.560, p = 0.135$). 音乐组和对照组 N1 潜伏期 t 检验分析结果如图 6 (b) 所示, 无显著差异(音高: $t(19) = 0.421, p = 0.678$; 音程: $t(19) = 0.260, p = 0.798$; 和弦: $t(19) = 0.135, p = 0.205$). 图 5 中 N1 峰值处的空间分布结果显示 N1 集中分布在额叶-中央区域.

2.2.2 MMN

3 个实验任务中音乐组和对照组在 FCz 电极处记录到的 ERP 波形, 以及偏差刺激减去标准刺激得到的差异波 MMN 如图 7 所示. MMN 幅值的 t 检验结果如图 8 (a) 所示, 在 3 个感知任务中, 两个组别之

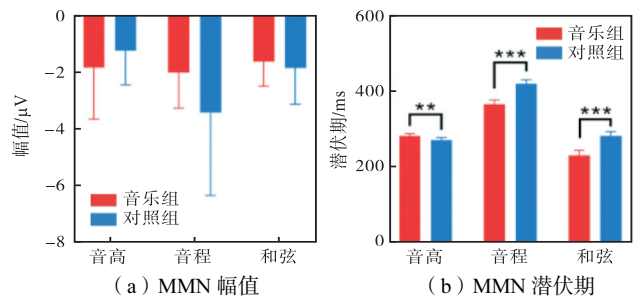


图 8 MMN 幅值和潜伏期统计结果

Fig.8 Statistical results of MMN amplitude and latency

音乐组的 MMN 潜伏期显著短于对照组 (音程: $t(19) = 11.050, p < 0.001$; 和弦: $t(19) = 9.566, p < 0.001$). 此外, 通过图 7 中 MMN 峰值处的脑地形图可以观察到 MMN 峰值处的空间分布特点, 主要分布在额叶-中央区域.

2.2.3 P3b

在 3 个感知任务中诱发的 P3b 成分, 分别如图 9(a)、(b)、(c) 所示, 只有偏差刺激出现才会诱发出显著的 P3b 成分, 而标准刺激则不能诱发出明显的 P3b 成分. 如图 10(a) 所示, 在这 3 个感知任务中通

过 t 检验分析发现, 音乐组的 P3b 幅值显著大于对照组, 两组之间的差异具有统计学意义 (音高: $t(19) = 3.476, p < 0.010$; 音程: $t(19) = 2.629, p < 0.050$; 和弦: $t(19) = 0.363, p < 0.010$). 如图 10(b) 所示, P3b 潜伏期的统计结果表明音乐组与对照组的 P3b 潜伏期存在显著差异 (音高: $t(19) = 3.587, p < 0.010$; 音程: $t(19) = 4.675, p < 0.001$; 和弦: $t(19) = 2.552, p < 0.050$). 此外, P3b 峰值处的脑地形图表明该成分主要分布在顶叶区域.

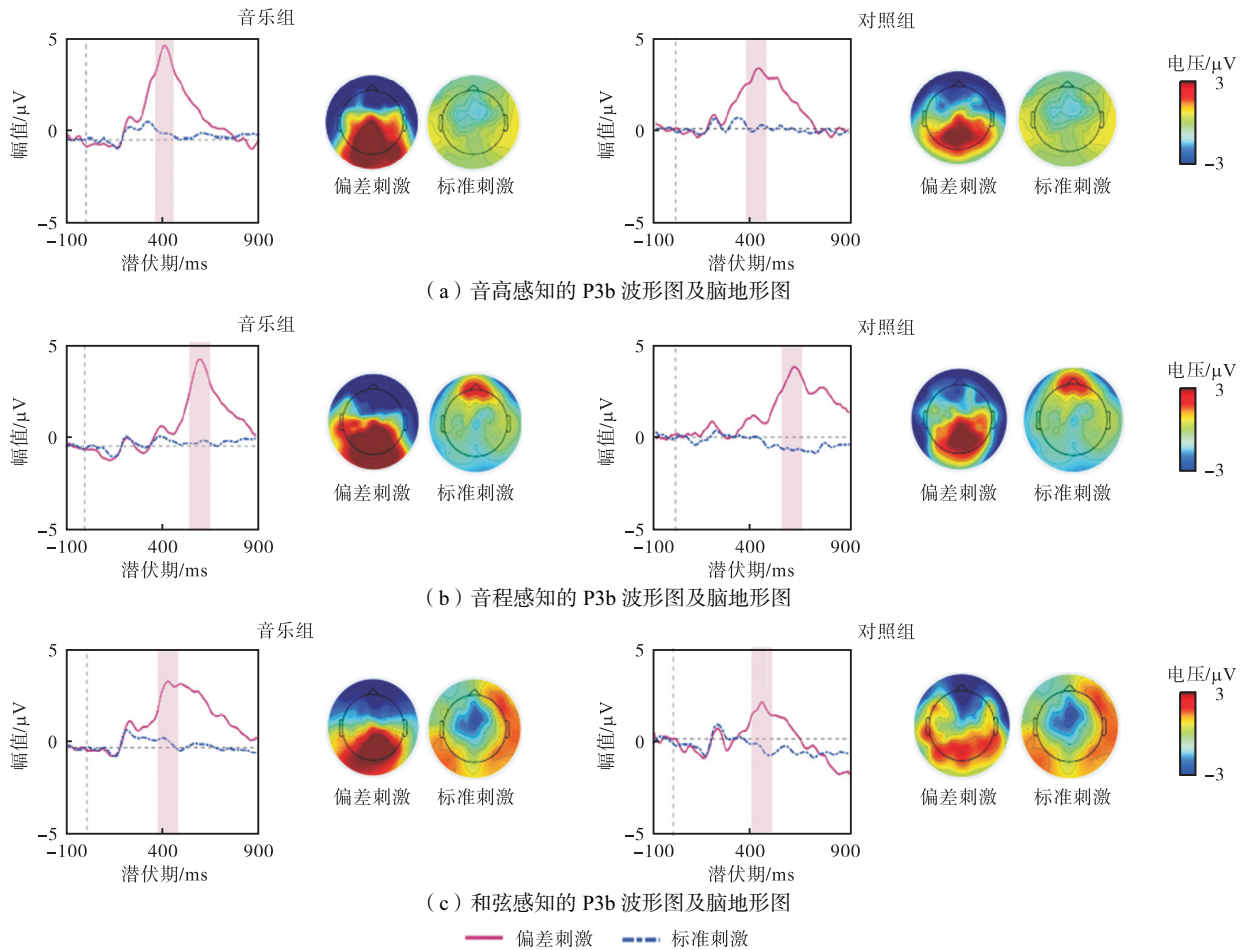


图 9 3 个实验的 P3b 波形图及脑地形图

Fig.9 P3b waveforms and brain topography of the three experiments

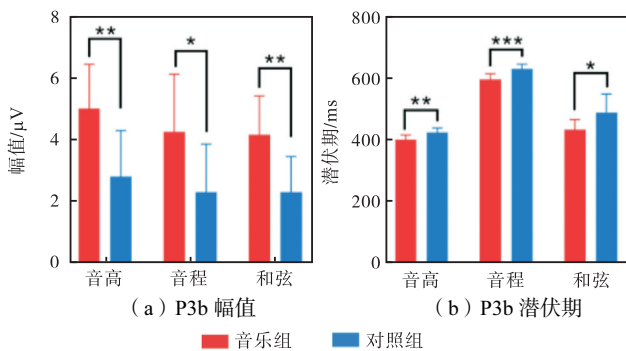


图 10 P3b 幅值和潜伏期统计结果

Fig.10 Statistical results for P3b amplitude and latency

2.3 微状态结果

根据 ERP 的分析结果, 2 个组别在 P3b 成分处的差异最为显著. 因此在后续研究中, 根据 P3b 成分的潜伏期选取了微状态分析的时间窗, 并选择 GEV、覆盖率、GFP 和持续时间作为主要特征参数进行 t 检验分析. 如图 11 所示, 音高感知任务的微状态序列并主要关注 400 ~ 600 ms 的时间窗, 图中 MS 表示微状态. 在这一范围内, 两组均出现了 MS6 成分, 主要涉及顶叶区域, 这与先前的研究一致. 然而, 如图 12 所示的统计结果显示, MS6 中音乐组的 4 个特征参

数都较大,但均未达到统计学显著水平. 覆盖率: $t(19) = 0.620, p = 0.543$; GEV: $t(19) = 1.090, p = 0.289$; 持续时间: $t(19) = 1.427, p = 0.170$; GFP: $t(19) = 1.197, p = 0.246$. 在这一时间窗口内,音乐组从 MS6 转换为 MS7,可能反映了对音高感知敏感度的增强以及能够以独特方式快速处理音高变化的能力.

根据音程感知任务中 P3b 成分的潜伏期结果,音程感知任务的微状态分析中关注 600 ~ 800 ms 时间段,如图 13 所示. 该时间段内仅出现涉及中央顶区的 MS6. t 检验的结果如图 14 所示,尽管音乐组的

各项特征参数更高,但均未有统计学差异. 对于 MS6,覆盖率: $t(19) = 0.680, p = 0.504$; GEV: $t(19) = 1.523, p = 0.144$; 持续时间: $t(19) = 0.204, p = 0.840$; GFP: $t(19) = 1.246, p = 0.228$.

对于和弦感知任务,同样对 400 ~ 600 ms 内的数据进行分析,如图 15 所示. 该时间段内仅出现了激活中央顶区的 MS6.

t 检验的结果如图 16 所示,发现在音乐组中,MS6 更加稳定、持续时间更长. 对于 MS6,覆盖率: $t(19) = 2.814, p < 0.010$; GEV: $t(19) = 2.236, p < 0.050$; 持续时间: $t(19) = 2.121, p < 0.050$.

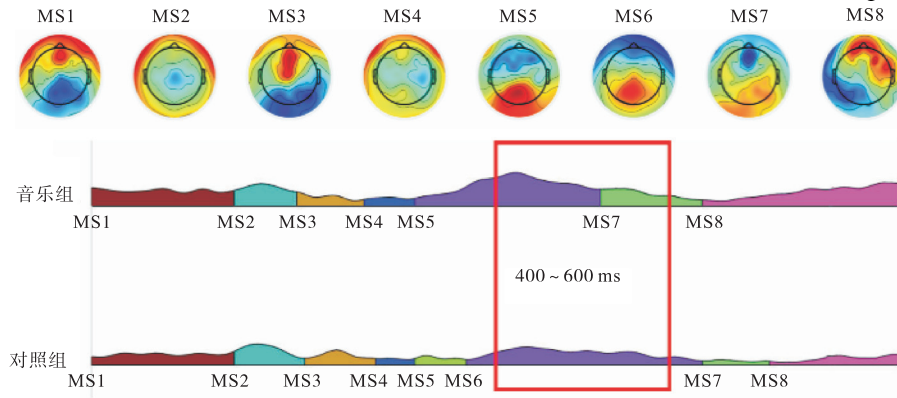


图 11 音高感知任务的微状态序列结果

Fig.11 Microstate sequence results of the pitch perception task

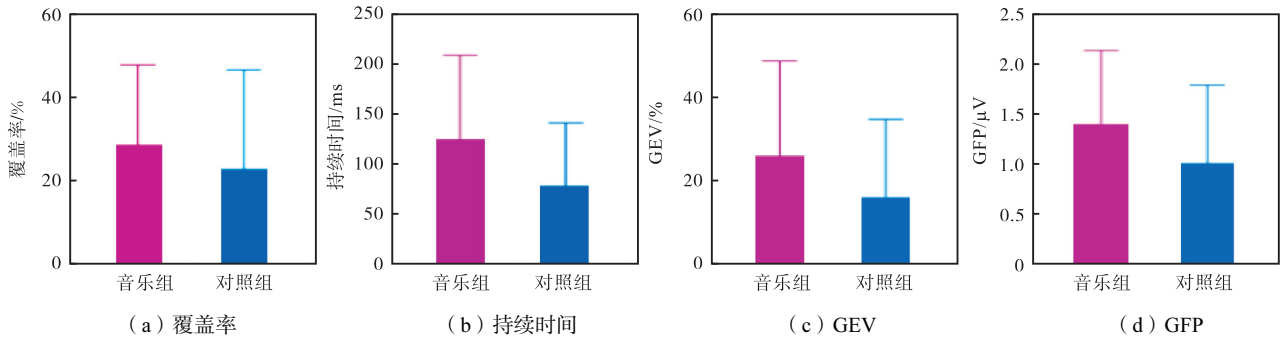


图 12 音高感知任务的 MS6 统计结果

Fig.12 MS6 statistical results of the pitch perception task

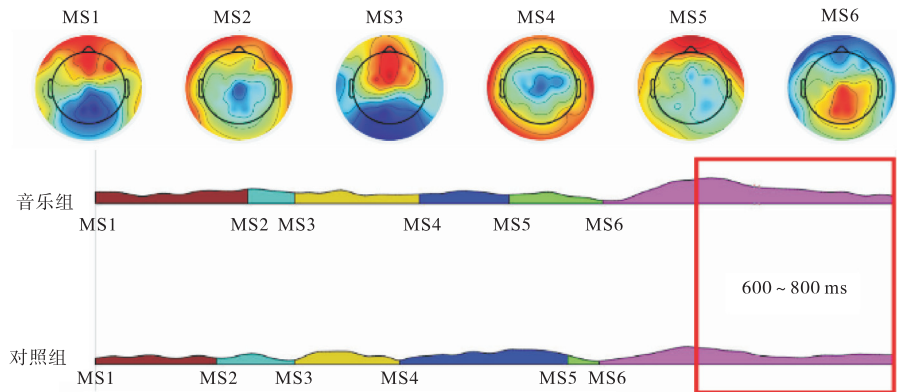


图 13 音程感知任务的微状态序列结果

Fig.13 Microstate sequence results of the interval perception task

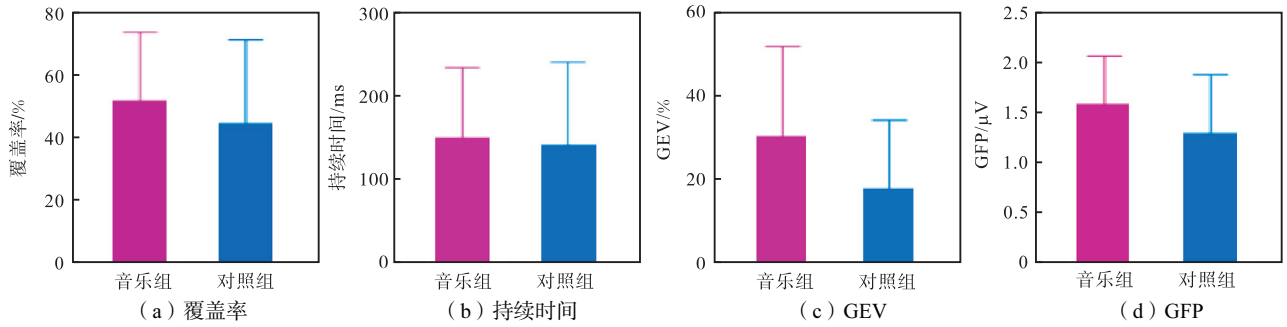


图 14 音程感知任务的 MS6 统计结果

Fig.14 MS6 statistical results of the interval perception task

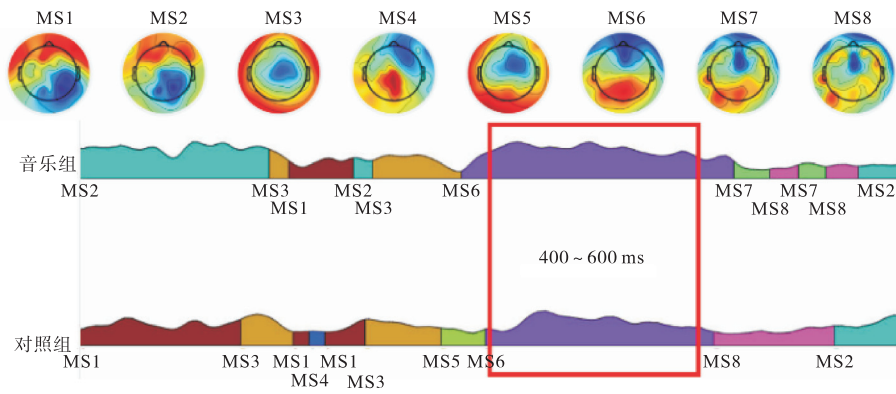


图 15 和弦感知任务的微状态序列结果

Fig.15 Microstate sequence results of the chord perception task

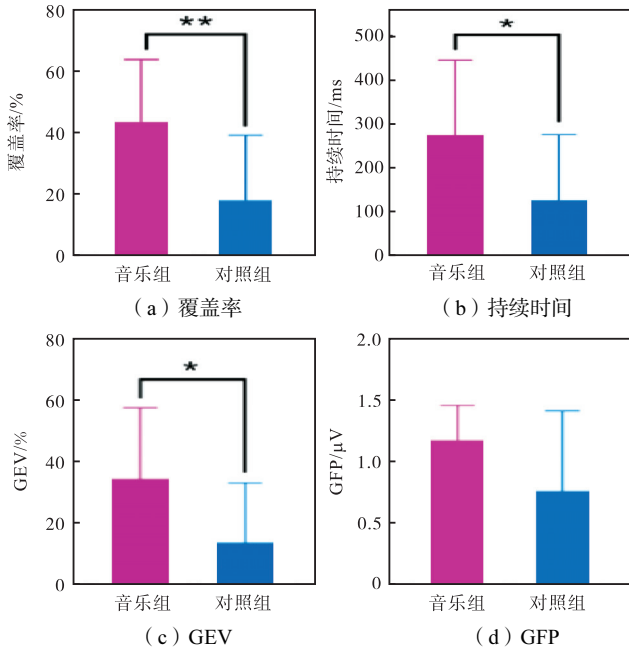


图 16 和弦感知任务的 MS6 统计结果

Fig.16 MS6 statistical results of the chord perception task

在 3 个感知任务中,音乐组的 4 个特征参数均高于对照组.这表明具有音乐经验的个体可能拥有更敏感的神经系统,对音乐信息的加工更精细,从而使得其覆盖率、GEV、GFP 增加以及持续时间延长.这些发现为音乐组和对照组在认知上的差异提供了神

经电生理学的证据.与 P3b 分析结果相吻合,音乐组在音乐感知任务中可能投入了更多的注意力和认知资源.在音高感知任务和音程感知任务中,特征参数差异未达到统计学意义,这可能是由于这些任务相对于和弦感知任务更简单,两组之间的感知差异不够明显,且有限的样本量也可能对统计学结果产生影响.更重要的是,即使在缺乏统计学差异的情况下,仍然观察到音乐组相对于对照组有更大数值的趋势.

3 讨论

本研究的主要目的是探讨音乐经验对感知频率相关音乐特征(即音高、音程和和弦)的潜在促进作用.这项研究基于对主动听觉辨别任务中的 ERPs 和行为表现的分析,结果显示音乐组和对照组可能在音乐感知的不同阶段使用了不同的处理策略.这表明,音乐经验可能会影响感知频率相关音乐元素的神经响应模式. ERPs 为了解两组不同处理策略背后的神经动态提供了宝贵的信息.与预期相反,分析结果表明两组之间在 N1 的潜伏期和幅值方面没有显著差异,这表明音乐经验对早期知觉阶段的影响可能相对有限.即便是没有音乐经验的群体,在注意状态下也容易识别明显的声音变化,这表明音乐经验可能在这

一认知过程中发挥了选择性的促进作用^[9]. N1 被认为是对物理刺激敏感的标志,也是早期感觉处理的指标,但现有研究中对音乐经验对 N1 的影响仍无定论.

在 Shahin 等^[12]的研究中发现,音乐家在受到各种音调刺激时比非音乐家对照组出现更大的 N1c 反应. 相反, Itoh 等^[13]的研究发现,即使偏差刺激在偏差条件下很容易被检测到,音乐家的 N1 反应也没有明显增强. 对这些不同结果的一个合理解释是,尽管音乐组在行为层面上表现更优异,但 N1 成分作为听觉反应的初步注意和识别指标,主要与最基本的听觉敏感度相关,可能受音乐训练的影响较小. 其次,本研究中使用的刺激材料更容易识别,而且音乐组(未获得音乐专业学位)并非严格意义上的音乐家,而是更倾向于业余音乐家,这可能是导致 N1 在两组之间没有显示出显著差异的原因.

MMN 作为自动检测听觉预期偏差的指标,最初由 Näätänen 等^[14]的研究揭示,无论受试者是否有意识地注意偏差刺激都能诱发出 MMN. 尽管通常关注于 MMN 的无意识加工,但有研究发现 MMN 幅度受注意影响,尤其是在处理细微频率变化时更为显著^[15]. 然而,这并不意味注意直接调控 MMN 的产生机制,而是表明大脑自动监测机制独立于注意分配,持续监控并响应意外事件. 本研究发现,音乐组在 MMN 潜伏期方面具有明显优势,这可能是由于他们接受了音频信息处理方面的专门训练,提高了听觉系统的灵敏度和处理速度,从而缩短了反应时间. MMN 幅值越大,反映受试者对刺激之间的偏差感知越强烈,本研究中两组受试者的 MMN 幅值没有显著差异可能是由于习惯效应. 重复的标准刺激会引发习惯化,使大脑对刺激的反应降低^[16]. 同样,由于有音乐经验的人群更熟悉音乐感知的内容,习惯化效应可能会增强. 两组之间的 MMN 潜伏期存在显著差异,进一步证实了 MMN 是研究大脑如何处理和响应声音变化的重要生物标志物.

与预期一致的结果是音乐组显示出更强的 P3b 成分,表明该组对偏差刺激分配了更强的注意和认知资源. 本研究集中于 oddball 范式中的注意定向, P3b 在大脑对偏差刺激的策略性反应中能够反映受试者的注意力资源和工作记忆水平^[17]. P3b 峰值处的脑地形与对应时间窗中的微状态地形图一致,表明顶叶在此阶段被激活. 与对照组相比,音乐组的 P3b 分布更靠近顶叶,范围更广,这表明有音乐经验的个体倾向于更早展现出在信息处理和记忆力方面更为优秀的的能力.

音乐组在处理不同频率的音高时 ERP 幅值变化范围更大^[18],音乐家在辨别和弦时 MMN 的潜伏期更短^[10]等,与本文的研究相一致. 然而,本研究通过微状态分析进一步发现,音乐经验在不同复杂程度的音乐感知任务中的影响表现出差异性. 结果显示,音乐组在音高和音程感知任务上呈现出一定的优势,尽管并未达到统计学显著水平. 这一发现可能表明,在处理较为简单的音乐感知任务时,音乐经验的影响相对有限. 然而,在处理和弦感知任务时,发现有音乐经验的群体在 GEV、持续时间和覆盖率上显著高于无音乐经验的群体,表明音乐经验增强了复杂任务处理的效率、认知控制及持续注意力. 此外,音乐经验与中央顶区微状态的持久激活及增大的 P3b 幅值相关,反映出有音乐经验的群体进行自上而下的认知加工,在将以前的知觉输入与内部模型进行比较时更有效、更精细,同时伴有更强的执行功能、注意力控制能力以及知觉决策制定能力^[19]. 结合行为结果分析,音乐经验的促进作用并未体现在简单任务的准确率上,但显著提升了信息处理的速度.

本研究中发现音乐经验并不会改变早期感知层面的偏差辨别,但是有助于强化在听觉处理后期阶段的辨别,说明音乐经验可能促使个体在注意到差异后进一步思考具体的差异是什么,而不是仅仅停留在确定是否存在差异的阶段. 未来的研究可以与其他神经影像技术手段相结合,从而更进一步探究音乐与大脑认知之间的神经机制. 除此之外,由于人工耳蜗受到其电极数量和精度的限制,无法像正常听力一样为人工耳蜗用户提供完整的频率范围,使得佩戴人工耳蜗的群体在感知这些音乐元素时表现相对较差. 同时,本研究的实验任务设计得相对简单,实验时长也相对较短,更适合儿童参与. 因此,未来研究可以进一步探究接受音乐训练后的人工耳蜗儿童在频率相关音乐特征感知能力上的变化,并为听障患者提供一种评估音乐康复训练效果的方案.

4 结 语

现有研究侧重于单一音乐特征及专业音乐家,导致对音乐经验影响的普遍性和多样性理解不足. 因此,本研究设计了音高、音程及和弦多种音乐特征感知任务,发现音乐经验在较难的和弦感知任务中表现出更显著的促进作用. 研究结果表明,音乐经验能增强个体感知频率相关音乐特征的能力. 在主动辨别任务中,与对照组相比,有音乐经验的音乐组在准确

性和反应时间方面展现出更优秀的行为表现. 音乐组和对照组之间的 N1 特征和 MMN 的幅值无显著差异; 两组间的 MMN 的潜伏期有显著性差异. 音乐组比对照组显示出更大的 P3b 幅值, 且和弦感知任务的微状态分析结果显示音乐组中存在更高的 GEV、覆盖率、持续时间. 因此, 研究结果揭示了音乐经验对个体感知频率相关音乐特征的促进作用, 且这一促进作用可能更多地体现在认知资源的高效配置和对音乐特征的深度加工上, 而非基础感知阈限的提升. 此外, 本研究以具有音乐经验但无专业学位的非专业音乐实践者为受试对象, 进一步扩展了不同水平音乐经验对音乐感知的影响研究, 同时揭示了音乐经验对普通人群的潜在益处.

参考文献:

- [1] Hansen N C, Højlund A, Møller C, et al. Musicians show more integrated neural processing of contextually relevant acoustic features[J]. *Frontiers in Neuroscience*, 2022, 16: 907540.
- [2] Mishra S K, Saxena U, Rodrigo H. Extended high-frequency hearing impairment despite a normal audiogram: Relation to early aging, speech-in-noise perception, cochlear function, and routine earphone use[J]. *Ear and Hearing*, 2022, 43(3): 822-835.
- [3] Neves L, Correia A I, Castro S L, et al. Does music training enhance auditory and linguistic processing? A systematic review and meta-analysis of behavioral and brain evidence[J]. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 2022, 140: 104777.
- [4] Mankel K, Shrestha U, Tipirneni-Sajja A, et al. Functional plasticity coupled with structural predispositions in auditory cortex shape successful music category learning[J]. *Frontiers in Neuroscience*, 2022, 16: 897239.
- [5] Burkhard A, Elmer S, Jäncke L. Early tone categorization in absolute pitch musicians is subserved by the right-sided perisylvian brain[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 1419.
- [6] Maslennikova A, Varlamov A, Strelets V. Event-related brain activity changes to consonant and dissonant chords in musicians and non-musicians[J]. *Zhurnal Vysshei Nervnoi Deiatelnosti Imeni I P Pavlova*, 2013, 63(5): 571-578.
- [7] Arndt C, Schlemmer K, van der Meer E. Same or different pitch? Effects of musical expertise, pitch difference, and auditory task on the pitch discrimination ability of musicians and non-musicians[J]. *Experimental Brain Research*, 2020, 238(1): 247-258.
- [8] Tervaniemi M, Just V, Koelsch S, et al. Pitch discrimination accuracy in musicians vs nonmusicians: An event-related potential and behavioral study[J]. *Experimental Brain Research*, 2005, 161(1): 1-10.
- [9] Virtala P, Huottilainen M, Lilja E, et al. Distortion and western music chord processing: An ERP study of musicians and nonmusicians[J]. *Music Perception: An Interdisciplinary Journal*, 2018, 35(3): 315-331.
- [10] Bullock T, Cecotti H, Giesbrecht B. Multiple stages of information processing are modulated during acute bouts of exercise[J]. *Neuroscience*, 2015, 307: 138-150.
- [11] Michel C M, Koenig T. EEG microstates as a tool for studying the temporal dynamics of whole-brain neuronal networks: A review[J]. *Neuroimage*, 2018, 180: 577-593.
- [12] Shahin A, Bosnyak D J, Trainor L J, et al. Enhancement of neuroplastic P2 and N1c auditory evoked potentials in musicians[J]. *Journal of Neuroscience*, 2003, 23(13): 5545-5552.
- [13] Itoh K, Okumiya-Kanke Y, Nakayama Y, et al. Effects of musical training on the early auditory cortical representation of pitch transitions as indexed by change-N1[J]. *European Journal of Neuroscience*, 2012, 36(11): 3580-3592.
- [14] Näätänen R, Gaillard A W, Mäntysalo S. Early selective-attention effect on evoked potential reinterpreted[J]. *Acta Psychologica*, 1978, 42(4): 313-329.
- [15] Alho K, Woods D L, Algazi A, et al. Intermodal selective attention. II. Effects of attentional load on processing of auditory and visual stimuli in central space [J]. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 1992, 82(5): 356-368.
- [16] Charlebois-Poirier A R, Lalancette E, Agbogba K, et al. Working memory and processing speed abilities are related to habituation and change detection in school-aged children: An ERP study[J]. *Neuropsychologia*, 2023, 187: 108616.
- [17] 沈丽丽, 邢阳. 基于脑电的水平运动立体影像视疲劳评估[J]. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2020, 53(3): 259-264.
Shen Lili, Xing Yang. Visual fatigue assessment of stereoscopic images in lateral motion based on EEG[J]. *Journal of Tianjin University(Science and Technology)*, 2020, 53(3): 259-264 (in Chinese).
- [18] Kim T, Chung M, Jeong E, et al. Cortical representation of musical pitch in event-related potentials [J]. *Biomedical Engineering Letters*, 2023, 13(3): 441-454.
- [19] 张政华, 韩梅, 张放, 等. 音乐训练促进诗句韵律整合加工的神经过程[J]. *心理学报*, 2020, 52(7): 847-860.
Zhang Zhenghua, Han Mei, Zhang Fang, et al. Music training promotes the neural process of verse rhyme integration processing[J]. *Psychological Journal*, 2020, 52(7): 847-860 (in Chinese).

(责任编辑: 王晓燕)