

音乐情绪感知的神经机制研究*

杨集梅^{1,2}, 柴洁余¹, 邱天龙¹, 郑茂平^{2,3}

(1. 安顺学院教育科学学院, 安顺 561000; 2. 西南大学中国音乐心理健康研究所, 重庆 400715;

3. 贵州师范大学音乐学院, 贵阳 550001)

摘要:“音乐情绪感知”是个体经由对音乐刺激的加工, 产生对音乐刺激诱发的情绪的主观体验和意义识别的过程。目前对音乐情绪感知的研究已经深入到神经机制层面, 大量研究认为其涉及一个核心情绪网络区域的活动, 该核心网络主要包括杏仁核、海马和海马旁回、腹侧纹状体(含伏隔核)及前扣带回皮质、脑岛和眶额皮质等。未来还需要拓展研究中的音乐情绪类型、提高音乐材料的生态学效度以及综合运用各种研究手段和研究范式, 以更好地探索音乐情绪感知与大脑激活之间的关系以及不同脑结构之间的联系。

关键词: 音乐情绪; 音乐情绪感知; 神经机制

中图分类号: B842.5

文献标志码: A

文章编号: 1003-5184(2026)03-0211-09

1 引言

古人云, 韩娥之歌“余音绕梁而三日不绝”, 说的是战国时期一位美丽女子天籁之声的动人力量, 她的歌声的余音在三日后仍然在房梁间缭绕, 于是“老幼悲愁, 垂泪相对”、“喜跃抃舞, 弗能自禁”, 附近的人们随着她歌声的悲喜而悲喜; 亦有典故称孔子闻韶乐而“三月不知肉味”, 由此可见音乐的巨大魅力。音乐是声音在时间上的艺术, 按照音高、节奏以及和谐的原则组织起来(Cui et al., 2022)。它存在于每一种文化中, 在人们的日常生活中扮演着重要的角色。具体来说, 音乐有助于人们听觉和听觉技能的发展、精细运动的协调、择偶、社会凝聚力、团队合作的协调和减少冲突等(Perlovsky, 2010), 亦可用于音乐治疗(Hartmann et al., 2023)和对特殊人群的认知干预(Carpente et al., 2021; Geretsegger et al., 2022)。然而, 音乐的许多重要功能的实现, 都源于它与人类情绪之间的天然联系。或者说, 音乐对于人类的价值, 在很大程度上是因为其引发情绪的特质或能力(Su et al., 2024)。大量研究一致认为, 音乐刺激诱发的情绪比其他方式诱发的情绪更强、更普遍, 音乐在研究人类情绪加工中有重要作用(Fedotchev et al., 2021; Naser & Saha, 2021)。由此, 研究音乐与情绪之间的关系、开展对“音乐情绪”的研究成为了音乐心理学领域的重点之一。

“音乐情绪”(Musical Emotion)是指在音乐刺激作用下诱发的情绪反应(Juslin & Västfjäll, 2008)。而“音乐情绪感知”(Musical Emotion Perception)是个体的感官对音乐刺激进行反映和加工, 经由对当前刺激和头脑中过去经验的加工, 产生对音乐刺激诱发的情绪(包括基本情绪和特定音乐审美情绪)的主观体验和意义理解的过程(包括音乐情绪体验和音乐情绪识别两个方面)。由于对音乐情绪感知的研究能够为情绪调节(Sloboda & O'Neil, 2001; Juslin et al., 2008)和情绪障碍治疗等应用领域提供理论支持(Gold, Voracek, & Wigram, 2004), 因此吸引了较多研究者的目光。早期研究主要集中于行为研究层面, 近二十年来出现了较多对音乐情绪感知的神经机制的研究(Caclin et al., 2007; Koelsch & Siebel, 2005; Mizuno & Sugishita, 2007; Peretz, 2010)。通过对神经机制的探索, 能够了解音乐情绪现象深层的神经关联, 同时考察音乐情绪加工是否存在独特的神经通路, 以丰富情绪相关领域的研究。

根据个体信息加工的一般路径进行推测, 音乐情绪有可能涉及几种大脑区域: 与音乐刺激的感知有关的区域(比如初级听觉皮层)、对情绪进行体验的区域(如内侧前额叶皮质)以及加工情绪信息的区域。基于此, 本研究结合各种脑机制研究手段, 分析并总结音乐情绪感知的神经基础, 探索其与情绪

* 基金项目: 国家自然科学基金地区项目(31760283), 贵州省2024年高等学校教学内容与课程体系改革项目(GZJC2024288), 贵州省地质博物馆2025年专项委托课题, 贵州省理论创新课题(GZLZLASXY-2025-07), 安顺学院博士基金项目[asxybsjj(202406)]。

通信作者: 郑茂平, E-mail: zmpshxy@swu.edu.cn。

加工相关脑结构的联系,并从研究材料、研究内容和研究方法等方面对未来的研究进行了展望。

2 音乐情绪诱发各频段脑电波的能量活动

脑电图(electroencephalography, EEG)信号是人脑神经元活动的综合反映,包含着丰富的生理和病理信息(于悦等,2014)。脑电波一般按照频率来进行划分,不同的频率和振幅反映了大脑活动的不同状态(Zhou & Lian, 2023)。目前对音乐情绪感知的EEG研究主要考察了 α 波和 θ 波的能量值及活动情况。

Baumgartner等人(2006)进行了第一个关于视觉和音乐刺激对大脑加工的影响的研究,采用视觉刺激和听觉刺激相结合的形式。让被试听古典音乐片段和看情绪图片,以唤起快乐、悲伤和恐惧三种基本情绪,同时通过脑电图 α 功率密度(alpha power density)测量神经激活,以及通过心率、呼吸、体温、皮肤电导和自我报告量表测量音乐情绪唤醒。结果发现,当图片和古典音乐同时呈现并且表达的情绪一致时, α 功率密度最低,被试表现出最广泛的神经激活(由额叶、颞叶、顶叶和枕叶组成的分布式情绪网络)和最强烈的情绪唤醒。

后来的研究也大多较为关注基本音乐情绪(如快乐、悲伤)的脑电波活动。比如 Sammler等人(2010)研究了愉快以及不愉快的音乐情绪加工,发现情绪愉快的音乐与前额中线(frontalmidline) θ 功率的增加有关,不愉快的音乐则是相反的效果。即愉快的音乐可以在前额区域引起更多的 θ 波,这种效应可能反映了音乐情绪感知与注意力功能的密切关系(卢英俊等,2012)。此外, Wu等人(2018)让被试听能够诱发悲伤、快乐、紧张等情绪的音乐片段,同时记录脑电波。结果发现,与悲伤和紧张情绪的音乐相比,舒缓与快乐的音乐和静息状态下的 α 波功率相对较高,负性音乐的 α 低频能量低于其他两种音乐。并且性别和脑区的主效应显著,女性 α 低频能量高于男性,颞叶 α 低频能量显著低于其他脑区。总体来看, α 波能量的改变与音乐情绪的效价和强度有关(王静梅,钱靓,卢英俊,2010)。对于积极情绪来说,左前额的 α 波能量比右前额低,而消极情绪则相反(陈志华,石诗余,2015)。随着音乐引发的情绪强度的下降,额叶和顶枕区的脑电 α 功率也会增加。还有研究考察了愉快和不愉快的音乐情绪中脑电一致性活动(EEG coherent activity)的潜在性别差异。结果发现,愉快的音乐情绪增加了

连接左前部和后部的 α 耦合;不愉快的音乐情绪只在男性的右半球和女性的双侧,由后中线的一致性维持。女性在前中线和右侧额区之间以低 α 频率出现右半球一致性振荡,在右后颞区和顶区之间以高 α 频率出现右半球一致性振荡(双侧的振荡),而男性在前颞电极和后颞电极之间出现右半球一致性振荡(单侧的振荡)。即在愉快和不愉快的音乐情绪中,男性和女性大脑半球的 α 一致性模式是不同的,女性的一致性网络更大(Flores - Gutiérrez et al., 2008)。

从目前的研究中可以看出,对音乐情绪感知的脑电波研究已经得出了一些模式化的结果,包括脑电波的功率发生强弱变化的情况、激活的区域和性别差异等,今后的研究应该考虑如何把这些脑电活动模式与实际应用结合起来。比如 Fung等人(2019)在关于古琴音乐治疗失眠症状的研究中就考虑到了脑电波的活动模式,通过不同的音乐调整脑电波的活动模式,进而达到音乐治疗的效果。其研究结果显示,听古琴音乐增强的 δ 波(多发生在无梦深度睡眠和无意识状态)显示出古琴音乐在促进身心恢复方面的作用。

3 音乐情绪诱发涉及情绪及注意加工的脑电成分

目前,关于音乐情绪感知的事件相关电位(Event-related potential, ERP)研究较少,且多数与其他的认知任务结合起来一起进行。

最早的音乐情绪感知ERP研究来自于对癫痫患者的个案研究(Dellacherie et al., 2009)。采用的音乐刺激是不和谐和弦、小调和弦以及大调和弦,听音乐的同时记录EEG。结果发现,从200毫秒开始,不和谐的和弦在眶额皮层(500~1000毫秒)、杏仁核和前扣带回(1200~1400毫秒)区域引起事件相关电位(ERPs)的变化,表明这些大脑结构依次参与了对不和谐音乐的内隐情绪判断。大小调式的变化只在眶额皮层(500~1000毫秒)诱发ERPs,可推测这一额叶区域在愉快音乐情绪识别中的意义。

继探索性的个案研究之后,部分研究者利用情绪启动范式,开展了音乐情绪感知的跨模态ERP研究。Logeswaran等人(2009)的研究是音乐-图片启动的第一个ERP研究,他们采用的音乐刺激为诱发快乐、悲伤情绪的音乐片段,采用的图片刺激为情绪面孔图片(分别表达了快乐、悲伤和中性三种情绪)。在实验过程中,先呈现音乐刺激,再呈现图片刺激。结果显示,无论先听哪种音乐,对后续的情绪

面孔加工都会产生促进效应,但情绪一致的音乐和面孔会诱发 ERPs 早期成分 N1 和 P2 的活动。当音乐情绪是愉悦的,增强的 N1 成分出现在所有的前额和中央电极上。这表明音乐情绪与视觉情绪在早期的加工阶段发生了相互作用(Pourtois et al., 2000; Spreckelmeyer et al., 2006)。Bakker 等人(2015)的研究采用了相似的范式,将情绪性面孔刺激(快乐、悲伤和中性)和音乐和弦刺激(大调和小调三和弦)同时呈现给被试,记录音乐情绪诱发电位 ERPs,并通过 ERP 成分振幅分析音乐情绪加工的促进作用。结果发现,当情绪面孔与音乐和弦的情绪信息一致时(快乐-大调或悲伤-小调),加工过程被易化,N2 成分的 ERP 振幅降低,而 N2 成分的振幅降低是早期加工的促进指标。也潜在的表明了被试感知到小调和大调三和弦分别具有消极和积极的情绪内涵。而 Sollberger 等人(2003)的研究将情绪面孔换成了情绪词,发现大调和弦的启动缩短了对具有积极情绪含义的词的反应时间,而小调和弦启动缩短了对具有消极情绪含义的词的反应时间。类似的词语结合音乐情绪的研究还发现,对于大调和弦与消极情绪词的不一致配对以及小调和弦与积极情绪词的不一致配对,N400 振幅更大(Steinbeis & Koelsch, 2010)。这些研究再次说明了不同音乐声学元素的组合(小调和弦与大调和弦)诱发的音乐情绪的不同脑电成分差异。

Halpern 等人(2008)没有结合其他的认知任务,直接考察了音乐中的大调式和小调式诱发的脑电活动。区分大调和小调的关键音符是大调的第一个音符或小调的第三或第六个音符,在这些音符处进行 ERP 的锁时和记录。被试分类为音乐家和非音乐家,他们分别对每一首音乐片段进行判断,评定音乐是“快乐的”还是“悲伤的”。ERP 波形分析表明,音乐家只在小调片段的关键音符处有反应,在颞顶叶电极部位诱发了一个强大的晚期正成分 LPC,在 400~700 毫秒的潜伏期范围内达到最大值;对于大调片段,无论是音乐家还是非音乐家,都没有诱发 LPC 反应;N1 和 P2 成分在前额电极位置上最为稳定,且这两个成分在音乐家和非音乐家之间没有明显的区别。说明对积极和消极音乐情绪识别在部分脑电成分反应存在较大差异,同时也还需考察个体差异因素(如被试的音乐经验)。另一项研究考察了音乐和弦情绪识别的 ERP 反应(Ellison et al., 2015)。音乐刺激为以大调和小调结尾的和弦序

列,同时和弦分为和谐与不和谐两种。被试完成情绪识别或判断任务(情绪类型为“悲伤”和“快乐”)。结果表明,在音乐刺激出现后 300 毫秒,被评定为“悲伤”的和弦引发了负性成分 ERAN,该成分似乎与音乐和弦中悲伤或消极情绪的识别有关。

综上,虽然音乐情绪日渐成为研究热点,但近年来关于音乐加工的事件相关电位研究仍然主要集中于音高辨别(Tervaniemi et al., 2005)、音乐期待(Boh et al., 2011)、音乐结构和规则(Yu, Liu, & Gao, 2015)、音乐意义(Cai et al., 2015)等认知层面,对音乐情绪感知的探索还远远不够。未来的研究中需要从实验范式、实验对象和音乐材料方面进行更多的突破和思考。

4 音乐情绪引发脑血流量变化情况

Blood 等人(1999)利用正电子发射断层扫描技术(Positron emission tomography, PET)研究了与音乐家的音乐情绪反应相关的脑血流变化。实验刺激是 6 个版本的和谐程度不同的音乐片段,体现了愉快和不愉快两种情绪反应。结果发现,在被认为与奖励、动机、情绪和觉醒有关的大脑区域,包括腹侧纹状体、中脑、杏仁核、眶额皮层和腹侧前额叶皮层,可以观察到脑血流量的增加和减少。愉快或不愉快的音乐情绪可能引发了类似情绪研究中的相关的神经机制,但不同于音乐知觉的神经机制。该研究只选择了音乐家被试,在结论的推广性上受到了一定的限制。Brown 等人(2004)的一项 PET 研究则表明,与休息状态相比,个体在听两个不熟悉的、令人愉快的作品时,腹侧纹状体被激活。而 Blood 和 Zatorre(2001)的研究发现被试在听自己喜欢的音乐时出现了“寒颤”体验,“寒颤”强度的增加与杏仁核和海马前结构的脑血流量减少相关,与腹侧纹状体、中脑、前岛叶、前扣带皮层和眶额皮层脑血流量的增加相关。然而,由于 PET 研究需要注入放射性示踪剂,而每个人的注射次数是有限的,因此想要进行重复测试会比较麻烦;加之 PET 扫描仪在研究机构的普及率还不够高,分辨率相对较低,研究者们相对较少采用这种手段研究音乐情绪,而是更多采用其他的脑机制研究技术。

5 音乐情绪引发大脑结构的激活状况

与 ERP 和 PET 相比,功能性磁共振成像(functional magnetic resonance imaging, fMRI)的空间分辨率更高,能够进行更好的脑区定位,这对于研究心理现象的大脑活动具有较大的优势。在对音乐情绪的

脑机制进行的过程中, fMRI 是较常采用的一种手段, 也积累了许多有价值的研究成果。

关于音乐情绪的脑功能神经成像的研究表明, 音乐确实可以调节与情绪有关的脑区的活动, 主要是边缘系统(如杏仁核、海马)和旁边缘结构(如海马旁回和颞极), 它们被认为是情绪产生的基础, 是情绪加工的核心结构, 它们的损伤可能会导致情绪障碍(Singer et al., 2016)。这些结构形成了皮层下情绪通路, 随着研究的进展, 情绪通路包括了更多的皮层和皮层下区域, 主要有下丘脑、丘脑、扣带回和腹侧纹状体(包括伏隔核)等。外界的刺激信息通过听觉皮层投射到皮层下情绪通路, 进行进一步的加工。Koelsch 等人(2014)通过对大量脑功能成像研究的梳理, 将影响音乐情绪的大脑结构进行模型化的处理, 也认为音乐情绪的体验和识别涉及一个核心情绪网络区域, 不同的脑区之间有不同的投射关系。关于音乐情绪感知的核心脑网络区域及各脑区之间的关系见图 1(Koelsch, 2014)。

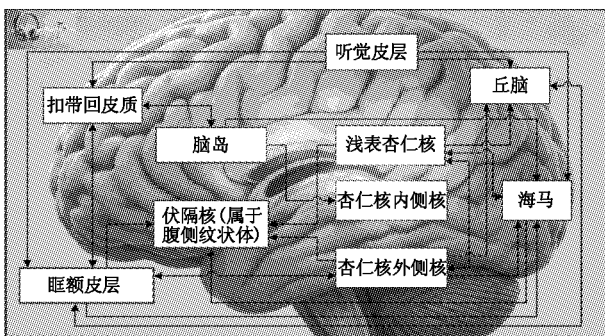


图 1 音乐情绪感知的核心大脑网络示意图

5.1 杏仁核对正负效价音乐情绪的加工

杏仁核是一个与情绪的产生、维持和终止有关的大脑结构(Price, 2005)。从传统的情绪研究中可知, 杏仁核与积极情绪和消极情绪的加工有关, 尤其是对消极情绪的反应更大, 对传递不愉快情绪的音乐表现得更加活跃(Goldin et al., 2005)。杏仁核不是一个解剖学上的整体, 它由浅表杏仁核和外侧杏仁核(包括外侧核、基底外侧核、基底内侧核)等不同的结构组成, 外侧杏仁核是接收信息输入的主要结构。这些结构可以调节不同情绪脑区的活动, 比如浅表杏仁核(杏仁核上部)与腹侧纹状体和眶额皮层存在功能连接, 会对涉及奖励或愉悦的刺激有反应(Koelsch, Fritz, & Schlaug, 2009)。

Ball 等人(2007)研究了杏仁核不同子结构对带有不同情绪内涵的音乐刺激(愉快-和谐或不愉快-不和谐的钢琴片段)的反应, 发现对于两种情绪

的音乐, 均在杏仁核的基底外侧核中观察到血氧水平依赖(blood-oxygen-level-dependent, BOLD)信号增加, 在杏仁核的上部区域 BOLD 信号减少。而 Koelsch(2010)使用类似音乐材料的研究表明, 杏仁核中央部分的 BOLD 信号随音乐情绪效价的增加而减少, 杏仁核上部(包括黑质)的 BOLD 信号随音乐情绪效价的增加而增加。还有一些研究发现了杏仁核外侧对快乐音乐和对悲伤音乐有反应(Mueller et al., 2011; Salimpoor et al., 2011), 该区域的激活反映了对音乐情绪的不同效价(正性或负性)的编码。因此, 杏仁核在音乐情绪效价感知中有较为重要的作用。

5.2 海马和海马旁回对不愉悦情绪的敏感

海马是边缘系统的非常重要的一个结构, 它与调节生存行为的结构(如杏仁核、下丘脑等)有紧密的联系。在以往研究中, 海马与学习和记忆之间的关系得到了广泛的认同, 但海马对音乐情绪的反应也受到了部分研究者的关注(Eldar et al., 2007)。部分研究表明, 海马的活动与音乐诱发的平静、快乐、悲伤的情绪或音乐诱发的“寒颤感”有关(Koelsch, Fritz, & Schlaug, 2009; Mitterschiffthaler et al., 2007; Mueller et al., 2011)。例如, 在 Mitterschiffthaler 等人(2007)的研究中, 与中性音乐相比, 悲伤的音乐引起了海马前部的变化。除了认知功能外, 海马在情绪感知中也发挥了重要的作用。

脑损伤研究证实了海马旁回在识别不愉快的不和谐音乐情绪中的重要作用。大量切除左侧或右侧海马旁皮质的个体, 会认为听不和谐的音乐是令人愉快的, 但正常聆听者则会感觉到不愉快(Gosselin et al., 2007)。

5.3 腹侧纹状体和伏隔核对愉悦情绪的响应

部分研究结果表明, 当个体聆听令人情绪愉悦的音乐时, 腹侧纹状体的反应增强(Brown et al., 2004; Koelsch et al., 2006; Menon & Levitin, 2005), 腹侧纹状体的激活与腹侧被盖区和下丘脑的活动有关, 是大脑“奖赏回路”的一部分。

伏隔核属于腹侧纹状体, 是一个对奖赏和激励比较敏感的结构(Breiter et al., 2001; Knutson et al., 2001)。可以预测, 该结构对快乐的音乐情绪有较为强烈的反应。研究表明, 个体(非音乐专业)在听到令人愉悦的音乐时, 出现了伏隔核激活的情况(Koelsch et al., 2006; Mitterschiffthaler et al., 2007; Suzuki et al., 2008; Wiebke et al., 2011)。还有一些

研究发现,当对音乐感受到强烈的愉悦情绪时,伏隔核激活所伴随的生理唤醒是一种“寒颤感”(Blood & Zatorre, 2001; Salimpoor et al., 2011),这种类似于起鸡皮疙瘩的感觉代表了个体感受到听音乐的一种极致的快乐体验。由此可知,伏隔核的激活可以作为特殊音乐情绪的主观感受的观察指标之一,也从大脑层面解释了为什么人们喜欢听音乐,觉得听音乐是一种快乐的体验(Menon & Levitin, 2005)。

5.4 其他与音乐情绪感知相关的重要脑结构

除了居于核心地位的杏仁核、海马和腹侧纹状体(含伏隔核)之外,还有一些结构也对音乐情绪的感知有重要的影响,包括前扣带回皮质(Anterior cingulate cortex, ACC)、脑岛(Insula)、眶额皮质(Orbitofrontal cortex, OFC)和“镜像神经元”系统。

研究表明,在积极情绪和消极情绪体验期间,ACC都有可能被激活(Green et al., 2008; Mitterschiffthaler et al., 2007)。Blood等人(2001)发现,ACC激活与音乐带来的高度奖励感的生理体验强度之间呈正相关关系。而脑岛与自主神经系统的活动变化有关,在快乐或悲伤的音乐情绪引发生理唤醒时,也可以观察到脑岛的活动变化(Baumgartner et al., 2006)。

眶额皮质参与控制情绪行为和无意识评估,是情绪皮层通路的关键结构,并因违反预期而被激活(Koelsch, 2014)。研究表明,眶额皮质与音乐情绪的感知有关(Khalfa et al., 2005; Menon & Levitin, 2005)。此外,眶额皮质与杏仁核之间有着紧密的联系,二者形成了一个整合感觉信息的功能回路。

近年来,有研究提出音乐情绪的加工与“镜像神经元”系统有关,认为音乐中的情绪可以通过镜像过程来感知,这种过程类似于对音乐中相关特征的内部模仿(Chapin et al., 2010)。Koelsch等人(2006)对愉悦和不愉悦音乐情绪的脑成像研究表明,在感知愉快音乐情绪的过程中,罗兰迪克区(Rolandic region)的激活可能反映了镜像神经系统的激活,该区域与前上岛叶(Anterior superior insula)和腹侧纹状体形成一个运动相关的环路,在感知愉快的听觉信息的过程中,形成(运动前)的发声表现。目前这方面的支持证据还不多。

6 总结与展望

综上所述,近二十年来的研究证据表明,几乎每一个已知的情绪加工结构都与音乐情绪感知的加工有关。杏仁核可能对音乐的声学特征(如和谐与不

和谐)敏感(Koelsch et al., 2006),而海马、腹侧纹状体、杏仁核、脑岛和眶额皮层等结构被认为对音乐情绪的效价敏感(Blood & Zatorre, 2001; Frühholz, Trost, & Grandjean, 2014; Koelsch, 2014)。随着研究的深入,音乐情绪加工的脑网络会越来越清晰,可以更好地分析因为某个脑区的功能障碍带来的情绪体验问题,为音乐治疗及干预提供可参考的路径。然而,在初步定位了参与音乐情绪感知的不同脑结构之后,不同脑结构之间的相互作用和联系情况仍然不够清楚,部分研究的结论也还存在矛盾或不一致的情况。在未来的研究中,还需要作出以下几方面的努力:

首先,应拓展研究中感知的音乐情绪类型。音乐情绪包含的种类比较多,除了为数不多的对音乐审美情绪的脑机制的研究外(Wiebke et al., 2011),多数集中于基本情绪(快乐、悲伤、恐惧等)的研究。比如Khalfa等人(2006)在研究中考察了快乐和悲伤两种音乐情绪,发现与大调-快乐的音乐相比,小调-悲伤的音乐在左侧额叶内侧回和相邻的额叶上回产生了激活。Mitterschiffthaler等人(2007)增加了一个中性音乐情绪的条件,延长了音乐片段的持续时间(每段音乐持续30秒)。结果显示,快乐音乐片段与悲伤音乐片段直接对比时,左侧颞上回获得显著的大脑激活;快乐音乐与中性音乐的反应进行对比,出现了海马旁回、楔前叶、腹侧纹状体和尾状核的激活;而悲伤音乐与中性音乐的反应进行对比,激活了杏仁核、海马和小脑。而Koelsch(2013)等对恐惧音乐情绪的大脑机制进行了探索,发现与中性状态相比,听恐惧音乐时双侧听觉皮层(AC)和双侧浅表杏仁核(SF)的BOLD信号强度降低;在个体聆听引起恐惧的音乐时,右侧初级体感皮层中的BOLD信号强度增加。这些研究均揭示了杏仁核、额叶、海马等结构与情绪体验之间的联系,但这并不能反映音乐情绪感知脑机制的全貌。研究者们似乎认为,人们最容易从音乐中感受到的就是基本情绪,所以对这些情绪进行研究能够在较大层面上探寻音乐情绪感知时的大脑活动特征。但不能忽略的是,音乐情绪可能是具有领域特殊性的,Zentner等人(2008)提出了“音乐审美情绪模型”,通过因素分析确定了9种音乐情绪,包括惊奇、超越、柔情、怀旧、平和、力量等,认为这些情绪更符合听众在音乐中感知到的情绪。在今后的研究中可尝试增加对此类音乐情绪感知的脑机制研究,以更进一步地探讨音乐

情绪的领域特殊性和一般性,音乐情绪与日常生活中情绪感知的区别以及更完整的音乐情绪感知的大脑功能回路。

其次,应提高研究中音乐材料的生态学效度。音乐材料由各种复杂的声学元素构成,如节奏、速度、调式、和声等,这些元素的不同组合会有不同的音乐音响效果,从而诱发听者不同的情绪效果。原则上,对音乐情绪的体验和识别应该是针对完整的乐曲,这样才能更好地考察各种声学元素相互组合所带来的不同情绪感受。然而,在实验室实验中,出于对材料进行标准化控制、实验范式对呈现时间的限制及被试的动机和疲劳等因素的考虑,大多数的研究均将一首完整的乐曲截取为几秒至几十秒不等的片段,让被试体验和识别音乐情绪(Bakker & Martin, 2015; Ball et al., 2007; Baumgartner, Esslen, & Jäncke, 2006),还有些研究直接采用软件生成各种音乐(Bowman & Yamauchi, 2016)。这样一来,可能会造成一些研究局限性。例如:一首乐曲有可能会引发混合情绪(既有悲伤又有快乐),但由于人为的截取,只能感知到悲伤或快乐中的某一种,无法明晰混合情绪背后的机制;又如,音乐是动态的关于时间的艺术,个体在听乐曲的前面部分和后面部分可能会出现不同的情绪强度和唤醒度,片段的展示无法研究音乐情绪的动态性。此外,从日常生活中感受音乐情绪的视角来看,实验室中对音乐片段的情绪感知在多大程度上能够推论到现实生活,仍然值得商榷。因此,只有让音乐材料更接近常态,所得出的结论才更容易解释日常情境中的音乐情绪。

最后,可综合运用各种研究手段和研究范式。如前所述,对音乐情绪脑机制的研究主要采用了脑电图(EEG)、事件相关电位技术(ERP)、正电子发射断层扫描技术(PET)和功能性磁共振成像技术(fMRI),通过这些手段初步探测了音乐情绪感知时的大脑活动的时间进程以及脑区定位等。这些技术手段具有各自不同的特点和优势,EEG能够提供全脑活动的连续性记录,记录的信号与不同的行为或情绪状态有联系,具有重要的临床应用价值。ERP技术依托高时间分辨率,实现了对大脑神经活动的实时监测;作为一种“事件相关”信号,能够从背景脑中分离出与特定任务或刺激序列严格对应的电生理反应,从而精确解析信息在大脑中加工的时间进程与成分构成。PET能够测量与心理活动相关的局部脑血流变化。fMRI技术则依托血氧水平依赖

(BOLD)效应,利用神经活动伴随的局部脑血流量及血氧水平变化来间接映射脑功能,具有较高的空间分辨率。如果能够在研究中将不同的技术手段相结合,比如ERP与fMRI相结合,或者采用脑磁图技术,以同时获得较高时间分辨率和空间分辨率的结果,对音乐情绪感知的脑机制的认知会更为全面。此外,研究范式的改进和更新同样是推进该领域研究的关键。音乐情绪感知的ERP研究长期依赖情绪启动范式,研究视角与观测维度相对固化,难以全面捕捉音乐情绪加工的复杂神经过程。未来研究可开发更具针对性的实验范式,以获取差异化的ERP成分数据,为揭示音乐情绪感知的特异性脑机制提供新的证据。

总体来说,关于音乐情绪的神经机制的研究最近二十年才刚刚开始,但大量研究表明,基于脑成像的测量,能够区分不同类型音乐情绪感知的大脑活动情况(Murphy, Nimmo-Smith, & Lawrence, 2003; Phan et al., 2002),只是由于音乐情绪本身的复杂性和领域特殊性,要建立其与大脑激活之间的清晰一致的关系,难度仍然较大,所以音乐情绪感知的脑机制研究在未来仍会有较大的探索空间。

参考文献

- 陈志华,石诗余.(2015).脑电数据情感变化的主成分分析. *大连交通大学学报*,36(5),96-103.
- 卢英俊,戴丽丽,吴海珍,秦金亮.(2012).不同类型音乐对悲伤情绪舒缓作用的EEG研究. *心理学探新*,32(4),369-375.
- 王静梅,钱靓,卢英俊.(2010).音乐对情绪影响的脑电机制初探. *中国医药导报*,7(32),11-13.
- 于悦,姜媛,方平,贺琼,张琨.(2014).音乐诱发情绪测量及其影响因素. *心理与行为研究*,12(5),695-700.
- Bakker, D. R., & Martin, F. H. (2015). Musical chords and emotion: Major and minor triads are processed for emotion. *Cognitive Affective & Behavioral Neuroscience*, 15, 15-31.
- Ball, T., Rahm, B., Eickhoff, S., Schulze-Bonhage, A., Speck, O., & Collins, I. (2007). Response properties of human amygdala subregions: Evidence based on functional MRI combined with probabilistic anatomical maps. *Plos One*, 2, e307.
- Baumgartner, T., Esslen, M., & Jäncke, L. (2006). From emotion perception to emotion experience: Emotions evoked by pictures and classical music. *International Journal of Psychophysiology*, 60, 34-43.
- Baumgartner, T., Lutz, K., Waschkes, C., & Jäncke, L. (2006). The emotional power of music: How music enhances the feeling of affective pictures. *Brain Research*, 1075, 151-

- 164.
- 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*, *98*, 11818 – 11823.
- 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 Neuroence*, *2*(4), 382 – 387.
- Boh, B. , Herholz, S. , Lappe, C. , & Pantev, C. (2011). Processing of complex auditory patterns in musicians and nonmusicians. *Plos One*, *6*, e21458.
- Bowman, C. , & Yamauchi, T. (2016). Perceiving categorical emotion in sound: The role of timbre. *Psychomusicology*, *26*(1), 1 – 11.
- Breiter, H. C. , Aharon, I. , Kahneman, D. , Dale, A. , & Shizgal, P. (2001). Functional imaging of neural responses to expectancy and experience of monetary gains and losses. *Neuron*, *30*(2), 619 – 639.
- Brown, S. , Martinez, M. , & Parsons, L. (2004). Passive music listening spontaneously engages limbic and paralimbic areas. *Neuroreport*, *15*, 2033 – 2037.
- Caclin, A. , Brattico, E. , Tervaniemi, M. , Näätänen, R. , Morlet, D. , Giard, M. - H. , & McAdams, S. (2007). Separate neural processing of timbre dimensions in auditory sensory memory. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *18*, 1959 – 1972.
- Cai, L. , Huang, P. , Luo, Q. , Huang, H. , & Mo, L. (2015). Iconic meaning in music: An event - related potential study. *Plos One*, *10*(7), e0132169.
- Carpente, J. , Casenhiser, D. , Kelliher, M. , Mulholland, J. , Sluder, H. , Crean, A. , & Cerruto, A. (2021). The impact of imitation on engagement in minimally verbal children with autism during improvisational music therapy. *Nordic Journal of Music Therapy*, *31*, 1 – 19.
- Chapin, H. , Jantzen, K. , Kelso, S. , Steinberg, F. , & Large, E. (2010). Dynamic emotional and neural responses to music depend on performance expression and listener experience. *Plos One*, *5*, e13812.
- Cui, X. , Wu, Y. R. , Wu, J. P. , You, Z. Y. , Xiahou, J. , & Ouyang, M. L. (2022). A review: Music - emotion recognition and analysis based on EEG signals. *Frontiers in Neuroinformatics*, *16*, 997282.
- Dellacherie, D. , Pfeuty, M. , Hasboun, D. , Lefèvre, J. , Hugueville, L. , Schwartz, D. , ... Samson, S. (2009). The birth of musical emotion a depth electrode case study in a human subject with epilepsy. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *1169*, 336 – 341.
- Eldar, E. , Ganor, O. , Admon, R. , Bleich, A. , & Hendler, T. (2007). Feeling the real world: Limbic response to music depends on related content. *Cerebral Cortex*, *17*(12), 2828 – 2840.
- Ellison, D. , Moisseinen, N. , Fachner, J. , & Brattico, E. (2015). Affective versus cognitive responses to musical chords: An ERP and behavioral study. *Psychomusicology: Music, Mind, and Brain*, *25*, 423 – 434.
- Fedotchev, A. , Parin, S. , Polevaia, S. , & Zemlianaia, A. (2021). EEG - based musical neurointerfaces in the correction of stress - induced states. *Brain - Computer Interfaces*, *9*, 1 – 6.
- Flores - Gutiérrez, E. O. , Díaz, J. - L. , Barrios, F. , Guevara, M. , Río - Portilla, Y. , & Corsi - Cabrera, M. (2008). Differential alpha coherence hemispheric patterns in men and women during pleasant and unpleasant musical emotions. *International Journal of Psychophysiology*, *71*, 43 – 49.
- Frühholz, S. , Trost, W. , & Grandjean, D. (2014). The role of the medial temporal limbic system in processing emotions in voice and music. *Progress in Neurobiology*, *123*, 1 – 17.
- Fung, M. , Kao, H. , Lam, S. , & Kao, T. (2019). Chinese guqin music and calligraphy for treating symptoms of primary insomnia. *Chinese Medicine and Culture*, *2*, 48 – 52.
- Gold, C. , Voracek, M. , & Wigram, T. (2004). Effects of music therapy for children and adolescents with psychopathology: A meta - analysis. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, *45*, 1054 – 1063.
- Geretsegger, M. , Fusar - Poli, L. , Elefant, C. , Mössler, K. , Vitale, G. , & Gold, C. (2022). Music therapy for autistic people. *Cochrane Database of Systematic Reviews*, *22*, CD004381.
- Goldin, P. , Hutcherson, C. , Ochsner, K. , Glover, G. , Gabrieli, J. , & Gross, J. (2005). The neural bases of amusement and sadness: A comparison of block contrast and subject - specific emotion intensity regression approaches. *Neuroimage*, *27*, 26 – 36.
- Gosselin, N. , Peretz, I. , Johnsen, E. , & Adolphs, R. (2007). Amygdala damage impairs emotion recognition from music. *Neuropsychologia*, *45*, 236 – 244.
- Green, A. , Bærentsen, K. , Stødkilde - Jørgensen, H. , Wallentin, M. , Roepstorff, A. , & Vuust, P. (2008). Music in minor activates limbic structures: A relationship with dissonance? *Neuroreport*, *19*, 711 – 715.
- Hartmann, M. , Mavrolampados, A. , Toiviainen, P. , Saarikallio, S. , Foubert, K. , Brabant, O. , ... Erkkilä, J. (2023). Musical interaction in music therapy for depression treatment. *Psychology of Music*, *51*, 33 – 50.
- Halpern, A. R. , Martin, J. S. , & Reed, T. D. (2008). An ERP study of major - minor classification in melodies. *Music Perception*, *25*(3), 181 – 191.

- Juslin, P., & Västfjäll, D. (2008). Emotional responses to music: The need to consider underlying mechanisms. *The Behavioral and Brain Sciences*, *31*, 559 – 575.
- Juslin, P., Liljeström, S., Västfjäll, D., Barradas, G., & Silva, A. (2008). An experience sampling study of emotional reactions to music: Listener, music, and situation. *Emotion*, *8*, 668 – 683.
- Khalfa, S., Schön, D., Anton, J.-L., & Liégeois-Chauvel, C. (2005). Brain regions involved in the recognition of happiness and sadness in music. *Neuroreport*, *16*, 1981 – 1984.
- Knutson, B., Adams, C. M., Fong, G. W., & Hommer, D. (2001). Anticipation of increasing monetary reward selectively recruits nucleus accumbens. *The Journal of Neuroscience*, *21*, RC159.
- Koelsch, S. (2010). Towards a neural basis of music-evoked emotions. *Trends in Cognitive Sciences*, *14*(3), 131 – 137.
- Koelsch, S. (2014). Brain correlates of music-evoked emotions. *Neuroscience*, *15*(3), 170 – 180.
- Koelsch, S., & Siebel, W. A. (2005). Towards a neural basis of music perception. *Trends in Cognitive Sciences*, *9*(12), 578 – 584.
- Koelsch, S., Fritz, T., & Schlaug, G. (2009). Amygdala activity can be modulated by unexpected chord. *Neuroreport*, *19*, 1815 – 1819.
- Koelsch, S., Fritz, T., Cramon, D. Y. V., Hller, K. M., & Friederici, A. D. (2006). Investigating emotion with music: An fMRI study. *Human Brain Mapping*, *27*, 239 – 250.
- Koelsch, S., Skouras, S., Fritz, T., Herrera, P., Bonhage, C., Küssner, M. B., & Jacobsa, A. M. (2013). The roles of superficial amygdala and auditory cortex in music-evoked fear and joy. *Neuroimage*, *81*, 49 – 60.
- Logeswaran, N., & Bhattacharya, J. (2009). Crossmodal transfer of emotion by music. *Neuroscience Letters*, *455*, 129 – 133.
- Menon, V., & Levitin, D. J. (2005). The rewards of music listening: Response and physiological connectivity of the mesolimbic system. *Neuroimage*, *28*, 175 – 184.
- Mitterschiffthaler, M. T., Fu, C. H. Y., Dalton, J. A., Andrew, C. M., & Williams, S. C. R. (2007). A functional MRI study of happy and sad affective states induced by classical music. *Human Brain Mapping*, *28*(11), 1150 – 1162.
- Mizuno, T., & Sugishita, M. (2007). Neural correlates underlying perception of tonality-related emotional contents. *Neuroreport*, *18*, 1651 – 1655.
- Mueller, K., Mildner, T., Fritz, T., Lepsien, J., Schwarzbauer, C., Schroeter, M., & Möller, H. (2011). Investigating brain response to music: A comparison of different fMRI acquisition schemes. *Neuroimage*, *54*, 337 – 343.
- Murphy, F. C., Nimmo-Smith, I., & Lawrence, A. D. (2003). Functional neuroanatomy of emotions: A meta-analysis. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, *3*(3), 207 – 233.
- Naser, D. S., & Saha, G. (2021). Influence of music liking on EEG based emotion recognition. *Biomedical Signal Processing and Control*, *64*, 102251.
- Peretz, I. (2010). “Towards a neurobiology of musical emotion”. In P. Juslin & J. Sloboda (Eds.), *Handbook of music and emotion: Theory, research, and applications* (pp. 99 – 126). Oxford: Oxford University Press.
- Perlovsky, L. (2010). Musical emotions: Functions, origins, evolution. *Physics of Life Reviews*, *7*, 2 – 27.
- Phan, K. L., Wager, T., Taylor, S., & Liberzon, I. (2002). Functional neuroanatomy of emotion: A meta-analysis of emotion activation studies in PET and fMRI. *Neuroimage*, *16*, 331 – 348.
- Pourtois, G., Gelder, B., Vroomen, J., Rossion, B., & Crommelinck, M. (2000). The time-course of intermodal binding between seeing and hearing affective information. *Neuroreport*, *11*, 1329 – 1333.
- Price, J. (2005). Free will versus survival: Brain systems that underlie intrinsic constraints on behavior. *The Journal of Comparative Neurology*, *493*, 132 – 139.
- Salimpoor, V., Benovoy, M., Larcher, K., Dagher, A., & Zatorre, R. (2011). Anatomically distinct dopamine release during anticipation and experience of peak emotion to music. *Nature Neuroscience*, *14*, 257 – 262.
- Sammler, D., Grigutsch, M., Fritz, T., & Koelsch, S. (2010). Music and emotion: Electrophysiological correlates of the processing of pleasant and unpleasant music. *Psychophysiology*, *44*(2), 293 – 304.
- Singer, N., Jacoby, N., Lin, T., Raz, G., Shpigelman, L., Gilam, G., & Hendler, T. (2016). Common modulation of limbic network activation underlies musical emotions as they unfold. *Neuroimage*, *141*, 517 – 529.
- Sloboda, J. A., & O'Neill, S. A. (2001). Emotions in everyday listening to music. In P. N. Juslin & J. A. Sloboda (Eds.), *Music and emotion: Theory and research* (pp. 415 – 429). New York: Oxford University Press.
- Sollberge, B., Reber, R., & Eckstein, D. (2003). Musical chords as affective priming context in a word-evaluation task. *Music Perception*, *20*, 263 – 282.
- Spreckelmeyer, K. N., Kutas, M., Urbach, T., Altenmüller, E., & Münte, T. (2006). Combined perception of emotion in picture and musical sounds. *Brain Research*, *1070*, 160 – 170.
- Steinbeis, N., & Koelsch, S. (2010). Affective priming effects of musical sounds on the processing of word meaning. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *23*, 604 – 621.
- Su, Y., Liu, Y., Xiao, Y., Ma, J. Q., & Li, D. Z. (2024). A re-

- view of artificial intelligence methods enabled music – evoked EEG emotion recognition and their applications. *Frontiers in Neuroscience*, 18, 1400444.
- Suzuki, M., Okamura, N., Kawachi, Y., Tashiro, M., Arao, H., Hoshishiba, T., . . . Yanai, K. (2008). Discrete cortical regions associated with the musical beauty of major and minor chords. *Cognitive Affective & Behavioral Neuroscience*, 8(2), 126 – 131.
- Tervaniemi, M., Just, V., Koelsch, S., Widmann, A., & Schröger, E. (2005). Pitch discrimination accuracy in musicians vs nonmusicians: An event – related potential and behavioral study. *Experimental Brain Research*, 161, 1 – 10.
- Wiebke, T., Thomas, E., Marcel, Z., & Patrik, V. (2011). Mapping aesthetic musical emotions in the brain. *Cerebral Cortex*, 22(12), 2769 – 2783.
- Wu, X., & Sun, G. (2018). Music – induced emotions and musical regulation and emotion improvement based on eeg technology. *Neuroquantology*, 16, 379 – 384.
- Yu, X., Liu, T., & Gao, D. (2015). The mismatch negativity: An indicator of perception of regularities in music. *Behavioural Neurology*, 2015, 469508.
- Zentner, M., Grandjean, D., & Scherer, K. R. (2008). Emotions evoked by the sound of music: Characterization, classification, and measurement. *Emotion*, 8(4), 494 – 521.
- Zhou, Y. A., & Lian, J. (2023). Identification of emotions evoked by music via spatial – temporal transformer in multi – channel EEG signals. *Frontiers in Neuroscience*, 17, 1188696.

Research on the Neural Mechanism of Musical Emotion Perception

Yang Jimei^{1,2}, Chai Jieyu¹, Qiu Tianlong¹, Zheng Maoping^{2,3}

(1. School of Education Science, Anshun University, Anshun 561000;

2. Mental Health Institute of Chinese Music, Southwest University, Chongqing 400715;

3. Faculty of Music, Guizhou Normal University, Guiyang 550001)

Abstract: “Musical emotion perception” is a process in which individuals have subjective experiences and recognize the meaning of emotions induced by musical stimuli. Current research on musical emotion perception has delved into neural mechanisms, and a number of studies have confirmed that it involves the activity of a core emotional network. This core network mainly includes the amygdala, hippocampus, parahippocampal gyrus, ventral striatum (including the nucleus accumbens), anterior cingulate cortex, insula, orbitofrontal cortex, and so on. In the future, it will be necessary to expand the types of musical emotions studied, improve the ecological validity of musical materials, and comprehensively apply various research methods and paradigms, in order to better explore the relationship between musical emotion perception and brain activation, as well as the relationships among different brain structures.

Key words: music emotion; music emotion perception; neural mechanism