

声动其心：音乐视角下脑神经环路研究综述

铁奕铭*, 赵莞歆

天津师范大学心理学部, 天津

收稿日期: 2026年3月13日; 录用日期: 2026年3月31日; 发布日期: 2026年4月16日

摘要

本文综述了音乐加工的脑神经环路机制, 围绕音乐感知、情绪诱发与神经可塑性三个核心维度整合了认知神经科学领域的实证研究。在研究问题上, 本文旨在探讨音乐情感感染力的神经生物学基础, 并探讨音乐训练所引发的大脑结构与功能适应性变化及其临床转化潜力。在研究方法上, 本文采用文献综述法, 系统梳理并整合了功能磁共振成像(fMRI)、正电子发射断层扫描(PET)、脑电图(EEG)及功能性近红外光谱(fNIRS)等多模态神经影像技术的实验证据。在研究意义上, 本文为深入理解情绪与认知的神经机制提供了理论依据, 并为节律听觉刺激疗法、旋律语调疗法等音乐干预手段在帕金森病、卒中失语及阿尔茨海默症等神经与精神疾病中的循证应用提供对潜在神经机制的探讨, 同时指出跨文化研究与多模态整合分析是未来研究的重要方向。

关键词

音乐神经科学, 神经可塑性, 音乐干预, 音乐情绪

How Music Shapes the Mind: A Review of Neural Circuits in Music Cognition

Yiming Tie*, Wanxin Zhao

Faculty of Psychology, Tianjin Normal University, Tianjin

Received: March 13, 2026; accepted: March 31, 2026; published: April 16, 2026

Abstract

This article reviews the neural circuit mechanisms underlying music processing, integrating empirical studies from cognitive neuroscience around three core dimensions: music perception, emotion

*通讯作者。

induction, and neural plasticity. Regarding the research questions, this article aims to explore the neurobiological basis of musical emotional contagion and to investigate the brain structural and functional adaptations induced by musical training, as well as their clinical translation potential. Regarding the methods, this article adopts a literature review approach, systematically organizing and integrating experimental evidence from multimodal neuroimaging techniques, including functional magnetic resonance imaging (fMRI), positron emission tomography (PET), electroencephalography (EEG), and functional near-infrared spectroscopy (fNIRS). Regarding the significance, this article provides a theoretical foundation for a deeper understanding of the neural mechanisms underlying emotion and cognition, and offers a discussion of the potential neural mechanisms underlying evidence-based applications of musical intervention approaches such as rhythmic auditory stimulation therapy and melodic intonation therapy in neurological and psychiatric disorders including Parkinson's disease, post-stroke aphasia, and Alzheimer's disease. Additionally, this article highlights cross-cultural research and multimodal integrative analysis as important directions for future investigation.

Keywords

Music Neuroscience, Neural Plasticity, Music-Based Intervention, Musical Emotion

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 研究背景

音乐是人类社会普遍的文化现象之一,其跨越语言、地域与民族的情感感染力令人着迷。从史前骨笛到现代交响乐,音乐始终扮演着情感表达与社会联结的核心角色(Zatorre & Salimpoor, 2013)。然而,究竟是什么神经机制赋予了音乐如此强大的情感力量?这一问题近年来已成为认知神经科学与心理学领域活跃的研究前沿之一。随着功能磁共振成像(fMRI)、正电子发射断层扫描(PET)、脑电图(EEG)以及功能性近红外光谱(fNIRS)等神经影像技术的迅速发展,研究者得以以前所未有地深入探究音乐加工的脑神经基础,并积累了大量翔实的实验证据(Curzel et al., 2024)。

早期的音乐神经科学研究多聚焦于听觉皮层对音高、节奏和音色等基本声学特征的编码机制,试图厘清音乐知觉的初级神经表征(Koelsch, 2018)。进入 21 世纪以来,随着研究视野的拓展,学界逐渐认识到音乐加工并非局限于听觉通路,而是动员了涵盖感知、认知、情绪和运动等多个系统的广泛神经网络。具体而言,音乐能够激活边缘系统与奖赏环路,引发多巴胺的释放,产生强烈的愉悦感;同时,音乐还与记忆、注意、语言等高级认知功能密切相关,其神经基础在一定程度上与语言加工网络存在显著交叠(Lui, 2024)。此外,长期的音乐训练可导致大脑结构与功能的可塑性变化,为神经康复领域的临床应用提供了重要依据(Zaatar et al., 2024)。

从心理学视角来看,音乐神经环路的研究具有多重理论与实践意义。第一,在情绪心理学层面,音乐是能够可控、可重复地诱发强烈情绪反应的实验刺激,因而成为研究情绪神经机制的理想工具(Koelsch, 2014)。研究表明,音乐诱发的情绪能够调节杏仁核、伏隔核、海马、岛叶、扣带回皮层及眶额皮层等情绪核心脑区的活动,为情绪的脑神经基础提供了直接证据(Koelsch, 2020)。第二,在认知神经科学层面,音乐加工涉及工作记忆和注意资源分配等认知过程,有助于深化对人类认知架构的理解(Salimpoor et al., 2015)。第三,从转化医学的角度,系统阐明音乐—脑神经环路的作用机制,是推动音乐干预在阿尔茨海默症、帕金森病、抑郁症及卒中康复等临床情境中科学化应用的关键前提(Zaatar et al., 2024)。

2. 音乐感知的神经基础

音乐感知是脑神经系统对复杂声学信号进行多层次解析的过程, 其核心在于听觉皮层的层级加工, 并延伸至涵盖运动、视觉和认知系统的多感觉整合网络。听觉皮层位于颞叶上回, 按照“核心-带-周带”的层级架构对声音信息进行由简至繁的加工。初级听觉皮层(位于 Heschl 回)实现音调拓扑映射, 即不同频率的声音在皮层空间上呈现有序排列, 而音调拓扑映射的组织在最新的 fMRI 研究中已得到系统性梳理(Saenz & Langers, 2014)。在初级皮层以外, 次级和高级听觉区域对旋律轮廓、节奏结构和和声关系进行更为抽象的编码。Zatorre & Salimpoor (2013)提出, 沿颞叶向前延伸的“腹侧流”(Ventral Stream)主要负责音高模式与旋律识别, 而“背侧流”(Dorsal Stream)则整合空间与时序信息(Zatorre & Salimpoor, 2013), 支持节奏加工与运动规划, 这一双流模型为音乐感知提供了系统性的神经解剖学框架。

在具体的声学维度编码方面, 不同的听觉特征对应着相互区分的皮层加工机制。关于音乐与语音的皮层分离问题, Norman-Haignere 等(2015)对人类听觉皮层的 fMRI 反应进行了无假设的体素分解分析, 发现音乐和语音分别被编码在非初级听觉皮层的两个独立区域(Norman-Haignere et al., 2015), 二者的选择性响应并不能仅凭标准声学特征加以解释, 提示听觉皮层中存在专门处理音乐整体性特征的神经群体。在节奏加工方面, 大脑对音乐节拍的神经追踪机制已在脑电图(EEG)研究中得到直接验证: Nozaradan 等(2011)记录了被试在聆听音乐节拍并想象二拍子或三拍子时的 EEG, 发现节拍频率诱发了与之精确调谐的持续性周期性 EEG 响应, 节拍意象还在相应拍子频率处产生了额外响应, 为神经振荡对节拍与节拍型的锁相提供了证据(Nozaradan et al., 2011)。基底神经节和小脑在聆听音乐时同样被激活, 提示节拍感知与运动系统之间存在天然的神经耦合, 这也是音乐引发律动感的重要神经基础(Koelsch, 2014)。

音乐感知并非孤立于听觉通路之内, 而是与视觉、运动和认知系统深度整合。Curzel 等(2024)对 59 项以音乐为主要刺激的 fNIRS 研究进行的系统综述指出, 前额叶皮层在音乐认知过程中持续被激活, 提示工作记忆与注意资源的自上而下调控在音乐感知中不可或缺(Curzel et al., 2024)。观看演奏者肢体动作可显著增强听众对音乐情绪的感知, 这一现象涉及颞-顶联合区和镜像神经元系统的参与。此外, 音乐节拍诱发的自发律动体验激活了补充运动区(SMA)和基底神经节, 揭示了听觉-运动耦合在音乐感知愉悦中的核心地位(Koelsch, 2014)。综上, 音乐感知的神经加工是一个跨越初级听觉皮层、联合皮层与皮层下结构的多层次整合过程, 为后续情绪加工与认知高级加工奠定了神经解剖学基础。

3. 音乐情绪的神经环路

音乐具有强大的情绪唤起能力, 能够诱发从宁到强烈的情感状态。边缘系统是音乐情绪加工的核心神经基础, 杏仁核、海马、扣带回与伏隔核均在音乐诱发情绪时被显著激活。神经影像研究表明, 音乐能够调节杏仁核、伏隔核、下丘脑、海马、岛叶、扣带回皮层及眶额皮层等脑区的活动。Koelsch (2014)将音乐情绪诱发的神经机制概括为三条并行路径: 经由丘脑-杏仁核通路的情绪评估; 经由皮层-海马回路的记忆与情境评价; 以及经由前额叶-眶额皮层的认知调控, 三条通路共同决定了个体对特定音乐情绪反应的性质与强度(Koelsch, 2014)。

奖赏环路在音乐愉悦体验中发挥关键作用。Salimpoor 等(2011)采用 PET 结合放射性配体示踪技术, 发现音乐聆听在情绪高度唤起时诱发了纹状体区域的内源性多巴胺释放; 同时, 利用 fMRI 对多巴胺释放的时间动态进行追踪, 发现了功能性分离: 尾状核在高峰情绪反应的预期阶段更为活跃, 而伏隔核则在高峰情绪体验阶段参与更多(Salimpoor et al., 2011)。这种“预期-兑现”的双相多巴胺模式表明, 音乐对奖赏回路的激活与其诱发的预期和预期违反密切相关, 从神经化学层面揭示了音乐作为抽象奖赏刺激的生物学地位。

Salimpoor 等(2013)进一步运用 fMRI 探究了音乐首次被聆听时, 产生奖赏的神经过程, 发现中脑边缘纹状体区域的活跃程度是预测听众是否愿意为从未听过的音乐付费的最佳指标; 而听觉皮层、杏仁核和腹内侧前额叶等区域的活动虽在价值评估时增强, 但奖赏价值的预测关键在于这些区域与伏隔核的功能连接随奖赏价值增加而增强(Salimpoor et al., 2013)。这一结果表明, 音乐的情感力量源于听觉皮层对音乐结构特征的精细编码与纹状体奖赏评估系统之间的协同激活, 二者之间的功能连接是音乐奖赏产生的神经基础。

在音乐情绪的个体差异方面, 音乐快感缺乏症提供了理解音乐奖赏神经机制的独特视角。Mas-Herrero 等(2014)基于巴塞罗那音乐奖赏问卷(BMRQ)对大样本人群的研究发现, 约 5.6%的健康个体对音乐奖赏表现出特异性低敏感, 但其对金钱等其他奖赏的反应完全正常, 听觉感知能力也未受损, 表明存在音乐奖赏的特异性快感缺乏现象。Mas-Herrero 等(2014)进一步通过神经影像验证, 在无抑郁或无广泛性快感缺乏的健康个体中发现了一组对愉悦音乐的行为评分减低、自主神经反应缺失但听觉感知能力正常的人群, 其对金钱奖赏的行为与生理反应均被保留, 表明对音乐的低敏感性并非源于奖赏网络的整体功能低下(Mas-Herrero et al., 2014)。后续的神经影像研究进一步证实, 音乐快感缺乏者在聆听音乐时伏隔核激活显著减弱, 提供了听觉-纹状体功能连接断裂是音乐情绪反应个体差异的神经基础这一证据。综合来看, 音乐情绪的神经环路是一个以边缘系统和奖赏回路为核心、由个体神经解剖学差异调控的多层次系统。

4. 音乐的神经可塑性与应用

神经可塑性是指大脑在经验与学习驱动下发生结构与功能适应性改变的能力。音乐训练因涉及长期、感觉、精细化的神经加工要求, 被视为研究经验依赖性神经可塑性的模型。在大脑结构层面, Schlaug 等(1995)对职业音乐家与非音乐家的研究发现, 早期接受音乐训练的音乐家的胼胝体前部体积显著更大, 且差异在 7 岁前开始训练的音乐家中尤为突出, 表明早期音乐教育具有关键期, 对大脑双侧半球运动整合回路的结构发育具有不可替代的影响(Schlaug et al., 1995)。此外, 音乐家的初级听觉皮层灰质体积更大, 右侧颞平面不对称性增强, 反映了长期音高辨别训练导致的听觉皮层特异性扩展(Schneider et al., 2002)。小脑与前运动皮层的灰质增加, 在音乐家群体中与长期精细运动技能训练密切相关。

在功能可塑性方面, Kraus & Chandrasekaran (2010)系统综述了音乐训练对整个听觉系统的影响, 表明音乐家的脑干听觉诱发电位(ABR)对音高变化、声音起始时间及谐波复合体的皮下编码显著优于非音乐家, 优势在噪声环境下稳定(Kraus & Chandrasekaran, 2010), 说明音乐训练对听觉信号准确度的改善不局限于大脑皮层, 而是贯穿从外周到中枢的整个听觉系统。此外, 音乐训练还与认知功能的提升相关: 具有音乐训练背景的儿童在语音、阅读流畅性和工作记忆方面均表现更优, 神经层面体现为颞叶语言区对语音刺激的更强反应, 揭示了音乐训练对语言加工网络的“转化效应”(Strait & Kraus, 2014)。

在临床应用方面, 音乐干预的神经机制已在部分神经与精神疾病中得到验证。在帕金森病(PD)领域, Thaut 等(1996)在随机对照试验中系统验证了节律听觉刺激疗法(Rhythmic Auditory Stimulation, RAS)的临床效果: 以与患者步频相近的节拍音乐作为外部节律, 可显著改善 PD 患者的步速、步幅和步频(Thaut et al., 1996)。

在卒中康复领域, 旋律语调疗法(Melodic Intonation Therapy, MIT)是治疗非流利性失语的重要方法。Norton 等(2009)的研究证实, 经过 MIT 训练后, 非流利性失语患者右侧弓状束的白质纤维重组(Norton et al., 2009), 表明 MIT 通过强化右半球语言网络的功能代偿来帮助患者恢复语言表达能力, 为音乐干预促进卒中后神经重塑提供了直接的神经影像学证据。

在阿尔茨海默症(AD)领域, Jacobsen 等(2015)研究证实, 旋律记忆依赖的内侧前额叶皮层(mPFC)是 AD 发病进程中受损相对较晚的区域, 对熟悉歌曲的旋律记忆往往仍保持相对完整(Jacobsen et al., 2015)。

基于此, 音乐聆听被引入 AD 的非药物干预体系, 研究显示其能够缓解过激行为并短暂改善情绪与认知表现(Koelsch, 2014)。综合上述证据, 系统阐明音乐神经可塑性的层次机制, 为未来个体化精准音乐治疗方案的研发指明了方向。

5. 局限与展望

现有音乐神经科学研究在方法与内容层面均存在值得正视的局限。现有研究的被试群体高度同质化, 多以西方文化背景的成年人为主, 跨文化、跨年龄段的比较研究仍较为匮乏。在样本量方面, 许多神经影像研究样本偏小, 可重复性问题近年来也引发了学界的反思。

展望未来, 多模态神经成像技术的整合、大样本跨文化研究的开展以及人工智能辅助分析方法的引入, 将为深化音乐神经科学研究提供新的方法论支撑。在临床层面, 结合个体神经表型的音乐干预研究, 以及音乐与神经反馈技术的交叉应用。在音乐奖赏机制方面, 现有模型主要依托多巴胺系统对愉悦性音乐体验的神经基础作出解释, 然而由悲伤音乐所诱发的复杂审美体验——即个体在感知到负性情绪内容的同时仍获得审美愉悦——是否能够纳入同一理论框架之内, 目前尚无充分的证据。在方法层面, 多模态神经成像技术的整合与大样本跨文化数据的积累, 将为上述问题的深入探讨提供更为可靠的方法论基础; 人工智能辅助分析方法的引入, 亦有助于从复杂神经信号中提取更具个体差异敏感性的特征。在临床转化层面, 结合个体神经表型的精准化音乐干预研究以及音乐与神经反馈技术的交叉应用, 有望逐步充实音乐治疗的循证依据, 推动其在干预体系中获得更为严格的科学评估, 但这一过程必然是渐进的, 仍面临从实验室证据到临床应用之间的多重转化挑战。

基金项目

天津市级大学生创新创业训练计划项目资助(项目编号: 202510065180)。

参考文献

- Curzel, F., Tillmann, B., & Ferreri, L. (2024). Lights on Music Cognition: A Systematic and Critical Review of fNIRS Applications and Future Perspectives. *Brain and Cognition*, 180, Article ID: 106200. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2024.106200>
- Jacobsen, J., 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. <https://doi.org/10.1093/brain/awv135>
- Koelsch, S. (2014). Brain Correlates of Music-Evoked Emotions. *Nature Reviews Neuroscience*, 15, 170-180. <https://doi.org/10.1038/nrn3666>
- Koelsch, S. (2018). Investigating the Neural Encoding of Emotion with Music. *Neuron*, 98, 1075-1079. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2018.04.029>
- Koelsch, S. (2020). A Coordinate-Based Meta-Analysis of Music-Evoked Emotions. *NeuroImage*, 223, 117350. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2020.117350>
- Kraus, N., & Chandrasekaran, B. (2010). Music Training for the Development of Auditory Skills. *Nature Reviews Neuroscience*, 11, 599-605. <https://doi.org/10.1038/nrn2882>
- Lui, T. K. (2024). Cognitive Neuroscience: The Brain's Symphony in Hearing Speech and Music. *Communications Psychology*, 2, Article No. 85. <https://doi.org/10.1038/s44271-024-00136-y>
- Mas-Herrero, E., Zatorre, R. J., Rodriguez-Fornells, A., & Marco-Pallarés, J. (2014). Dissociation between Musical and Monetary Reward Responses in Specific Musical Anhedonia. *Current Biology*, 24, 699-704. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2014.01.068>
- Norman-Haignere, S., Kanwisher, N. G., & McDermott, J. H. (2015). Distinct Cortical Pathways for Music and Speech Revealed by Hypothesis-Free Voxel Decomposition. *Neuron*, 88, 1281-1296. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2015.11.035>
- Norton, A., Zipse, L., Marchina, S., & Schlaug, G. (2009). Melodic Intonation Therapy: Shared Insights on How It Is Done and Why It Might Help. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1169, 431-436. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2009.04859.x>

- Nozaradan, S., Peretz, I., Missal, M., & Mouraux, A. (2011). Tagging the Neuronal Entrainment to Beat and Meter. *Journal of Neuroscience*, *31*, 10234-10240. <https://doi.org/10.1523/jneurosci.0411-11.2011>
- Saenz, M., & Langers, D. R. M. (2014). Tonotopic Mapping of Human Auditory Cortex. *Hearing Research*, *307*, 42-52. <https://doi.org/10.1016/j.heares.2013.07.016>
- Salimpoor, V. N., Benovoy, M., Larcher, K., Dagher, A., & Zatorre, R. J. (2011). Anatomically Distinct Dopamine Release during Anticipation and Experience of Peak Emotion to Music. *Nature Neuroscience*, *14*, 257-262. <https://doi.org/10.1038/nn.2726>
- Salimpoor, V. N., van den Bosch, I., Kovacevic, N., McIntosh, A. R., Dagher, A., & Zatorre, R. J. (2013). Interactions between the Nucleus Accumbens and Auditory Cortices Predict Music Reward Value. *Science*, *340*, 216-219. <https://doi.org/10.1126/science.1231059>
- Salimpoor, V. N., Zald, D. H., Zatorre, R. J., Dagher, A., & McIntosh, A. R. (2015). Predictions and the Brain: How Musical Sounds Become Rewarding. *Trends in Cognitive Sciences*, *19*, 86-91. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2014.12.001>
- Schlaug, G., Jäncke, L., Huang, Y., Staiger, J. F., & Steinmetz, H. (1995). Increased Corpus Callosum Size in Musicians. *Neuropsychologia*, *33*, 1047-1055. [https://doi.org/10.1016/0028-3932\(95\)00045-5](https://doi.org/10.1016/0028-3932(95)00045-5)
- Schneider, P., Scherg, M., Dosch, H. G., Specht, H. J., Gutschalk, A., & Rupp, A. (2002). Morphology of Heschl's Gyrus Reflects Enhanced Activation in the Auditory Cortex of Musicians. *Nature Neuroscience*, *5*, 688-694. <https://doi.org/10.1038/nn871>
- Strait, D. L., & Kraus, N. (2014). Biological Impact of Auditory Expertise across the Life Span: Musicians as a Model of Auditory Learning. *Hearing Research*, *308*, 109-121. <https://doi.org/10.1016/j.heares.2013.08.004>
- Thaut, M. H., McIntosh, G. C., Rice, R. R., Miller, R. A., Rathbun, J., & Brault, J. M. (1996). Rhythmic Auditory Stimulation in Gait Training for Parkinson's Disease Patients. *Movement Disorders*, *11*, 193-200. <https://doi.org/10.1002/mds.870110213>
- Zaatar, M. T., Alhakim, K., Enayeh, M., & Tamer, R. (2024). The Transformative Power of Music: Insights into Neuroplasticity, Health, and Disease. *Brain, Behavior, & Immunity—Health*, *35*, Article ID: 100716. <https://doi.org/10.1016/j.bbih.2023.100716>
- 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. <https://doi.org/10.1073/pnas.1301228110>