

节律性听觉刺激促进卒中后运动功能恢复的研究进展

袁润萍 张寒阳 张阳 杨晓莉 吴鸣

摘要: 节律性听觉刺激(RAS)是使用重复的、有节律的声音感觉信号,通过诱发有节奏的运动,促进因神经功能受损而出现明显运动功能障碍患者的运动功能恢复。RAS 作为一种促进卒中患者运动功能障碍恢复的新兴干预手段,能够提高患者的步行能力,矫正异常步态,提高平衡功能,从而改善患者上下肢功能,其作用机制可能与节奏夹带运动系统、听觉-运动同步有关。此外,RAS 还可与其他多种康复技术结合,更好地促进卒中患者运动功能恢复。该文将对 RAS 在卒中后患者运动功能恢复中的研究进展进行综述,为其临床应用提供参考。

关键词: 声刺激;卒中;康复;节律性听觉刺激;综述

doi:10.3969/j.issn.1672-5921.2024.07.008

Research progress of the effects of rhythmic auditory stimulation on improving motor function recovery after stroke Yuan Runping*, Zhang Hanyang, Zhang Yang, Yang Xiaoli, Wu Ming.

* Department of Rehabilitation Medicine, the First Affiliated Hospital of University of Science and Technology of China (Anhui Provincial Hospital), Hefei 230001, China

Corresponding author: Wu Ming, Email: ahslyywm@163.com

Abstract: Rhythmic auditory stimulation (RAS) with repetitive and rhythmic sound sensory signals can improve motor functional recovery by inducing rhythmic movement for patients with motor dysfunction due to neurological impairment. As an emerging intervention for the treatment of post-stroke hemiplegic patients, RAS can improve the walking ability of post-stroke hemiplegic patients, correct abnormal gait, improve balance function, and improve patients' upper and lower limb function. Its mechanism of action may be related to the rhythmic entrainment motor system and auditory-motor synchronisation. In addition, RAS can be combined with various other rehabilitation techniques to better promote the recovery of motor function in stroke patients. This article reviewed the research progress of RAS in motor function recovery of post-stroke patients to provide guidance for clinical application.

Key words: Acoustic stimulation; Stroke; Rehabilitation; Rhythmic auditory stimulation; Review

卒中具有高病死率和致残率,约 2/3 卒中患者存在行走障碍、异常姿势且活动能力明显下降,其中仅有 40% 的患者经过适当的康复治疗后可恢复运动功能^[1-3]。近年来,节律性听觉刺激(rhythmic auditory stimulation, RAS)作为改善卒中后运动功能

障碍的一种新的康复治疗方法,在卒中患者上肢和下肢运动功能障碍的康复治疗方面取得较多进展^[4]。研究表明,高重复性、有节律的声音感觉信号,可诱导持久性的运动学习及神经重塑,能够有效改善卒中患者的上下肢运动功能^[5-6]。本文将对 RAS 在卒中后运动功能恢复中的研究进展进行综述,为其临床应用提供参考。

1 RAS 的概念和理论基础

RAS 主要是利用有节律的、重复性的听觉信息来调整和改善个体的运动功能,这种刺激方式通过外部听觉提示,为个体提供节奏上的指导,进而促进

基金项目:安徽省卫生健康科研项目(AHWJ2023A10123);中国科学技术大学附属第一医院医学人工智能联合基金(MAI2022C006)

作者单位:230001 合肥,中国科学技术大学附属第一医院(安徽省立医院)康复医学科(袁润萍、张阳、杨晓莉、吴鸣);蚌埠医科大学研究生院(张寒阳)

通信作者:吴鸣,Email:ahslyywm@163.com

神经系统的适应性变化,达到改善运动控制、促进功能恢复的目的^[7]。在 20 世纪末,受音乐、舞蹈节律的启发,使用音频改善患者认知、运动行为障碍成为研究的热点^[8]。听觉节律提示通常采用节拍器的方式,让患者尽量按规定节拍行走,即让患者的步行频率尽量与节拍器的频率一致,这种节奏在运动控制中的应用通常被称为有节奏的听觉提示、有节奏的听觉刺激或外部听觉提示,即 RAS^[9-10]。

RAS 作用于卒中后运动功能恢复的神经作用机制目前并不完全清晰,可能与节律性夹带机制和听觉-运动同步理论有关。节律性夹带机制方面的研究认为,受到 RAS 影响的听觉神经元与运动神经元的放电频率所产生的夹带效应,使节律听觉信号和运动行为之间保持稳定同步,进而提高了运动控制能力^[9]。Thaut 等^[7,11]在 20 世纪 90 年代的几项研究中第 1 次确立了节奏夹带在康复训练和学习中的作用;其关于生理、运动学和行为运动的分析表明,节奏夹带不仅可延长卒中后运动功能障碍患者的运动时间,而且在改善患者空间和力的参数及运动控制方面也具有综合作用。而听觉-运动同步理论认为,暴露于外部节律性线索能够在皮质下水平内部产生无意识知觉塑造,进而在脑干水平能够引起网状脊髓通路的听觉-运动环路介导的脊髓运动神经元的兴奋性^[12]。基于上述潜在作用机制,RAS 可能激发了听觉-运动牵连,听觉-运动牵连具有同步化和调节相位的先天倾向,因此,能够调节步态参数等运动模式的周期^[13]。此外,作为外部刺激,RAS 还会影响运动神经元的放电,减少肌肉疲劳和自发运动的反应时间,提高特定响应的延迟和质量^[11-12]。目前已有的研究结果显示,声节律信号可促进中枢神经系统中的听觉传导机制,对包括步态在内的运动活动可产生积极的影响^[14],为支持 RAS 有助于节律性夹带、听觉-运动通路启动和运动周期线索化提供了证据。

2 RAS 对卒中后上肢运动功能恢复的影响

关于 RAS 对卒中后上肢功能障碍恢复效果的研究相对较少,且 RAS 在改善卒中后上肢功能效果方面结论尚不一致^[15-20]。Tian 等^[15]将 30 例卒中患者随机分为 RAS 组(15 例)和对照组(15 例),两组患者均接受常规康复治疗,其中 RAS 组接受额外的 RAS 训练,30 min/d,5 d/周,连续治疗 4 周后进行评估,结果显示,治疗 4 周后 RAS 组患者的 Wolf 运动功能评分高于对照组[(49.53 ± 10.56) 分比(42.67 ±

10.20) 分, $P = 0.041$; 效应量为 0.72], 肱三头肌的表面肌电低于对照组[(26.70 ± 13.59) μV 比(51.58 ± 21.46) μV , $P = 0.022$; 效应量为 0.64], 差异均有统计学意义,表明使用 RAS 作为辅助康复治疗在卒中患者上肢运动功能恢复方面具有潜在益处。然而一项随机对照试验比较了改良约束诱导运动疗法(22 例)、改良双侧上肢节律性听觉刺激(modified bilateral arm training rhythmic auditory cueing, mBATRAC; 19 例)与同等强度的常规康复训练(19 例)对恢复期(发病后 2 周~6 个月)卒中患者的治疗效果,所有患者均接受 60 min/d 的治疗,3 d/周,连续 6 周。结果显示,改良约束诱导运动疗法和 mBATRAC 对双侧手臂训练的康复效果(卒中影响量表、运动活动日志、行动研究手臂测试的评估结果)并不优于同等强度的常规康复训练(均 $P > 0.05$)^[16]。Dispa 等^[17]纳入 10 例患者测试高强度的握力训练计划是否可以改善后遗症期(发病 6 个月以上)卒中患者的手部功能,所有卒中患者先进行连续 4 周双侧运动疗法,休息 4 周后进行 4 周的单侧运动疗法+节律性听觉提示,10 例卒中患者均完成了 2 次为期 4 周(1 h/d, 3 d/周)的治疗,结果显示,同每次的治疗前相比,训练 4 周后 10 例患者的测量变量(包括手的握力、灵活性等)均未见任何改善(均 $P > 0.05$),但该研究样本量过小,需要进一步的更大样本量和更长治疗时间的研究来证实 RAS 在卒中后上肢功能障碍恢复中的疗效。

3 RAS 对卒中后日常生活活动能力的影响

目前,RAS 在改善卒中后患者日常生活活动能力方面的研究相对较少。Tian 等^[15]研究显示,RAS 在应用于卒中患者上肢功能障碍治疗后,RAS 组(15 例;常规康复治疗+RAS)的日常生活活动能力评定量表评分高于对照组(15 例;常规康复治疗),组间差异有统计学意义[(80.33 ± 8.96) 分比(69.67 ± 7.19) 分, $P = 0.001$; 效应量为 0.91], 提示 RAS 在改善卒中患者日常生活活动能力方面具有一定的疗效。分析原因,RAS 可能有助于刺激前庭系统中的节律感知,随后将节律感知信号传递至小脑和运动前区,最终传递至内部的“节拍保持”通路,包括基底节和辅助运动区,从而促进高质量的运动产生^[21]。Whitall 等^[22]纳入 14 例后遗症期(卒中后中位时间 30 个月)卒中患者,观察 BATRAC(1 h/d, 3 次/周,连续 6 周)对上肢功能的影响,采用马里兰大学卒中手臂问卷评估干预前、干预 6 周后患者的

偏瘫侧上肢使用能力,结果显示,干预 6 周时患者偏瘫侧上肢使用能力较干预前改善,差异有统计学意义 ($P < 0.002$)。此外, Richards 等^[18] 研究中将 Whitall 等^[22] 的训练方案进行了改良,采用的是 2.25 h/d, 4 d/周,连续 2 周的训练方案,同样纳入 14 例后遗症期卒中上肢功能障碍患者,采用运动活动日志评估患者上肢使用情况,采用 Fugl-Meyer 运动功能评定量表 (Fugl-Meyer assessment scale, FMAS) 上肢部分及 Wolf 运动功能测试量表于训练前和治疗完成后评估患者的上肢功能,结果显示,改良的 RAS 训练方案仅增加了患侧上肢的使用[运动活动日志:(1.21 ± 0.89) 分比 (1.70 ± 1.38) 分; $F(1,13) = 6.47, P = 0.025$],并未改善 14 例患者的运动功能[FMAS 上肢部分评分:(42.43 ± 13.07) 分比 (44.07 ± 11.97) 分; $F(1,13) = 2.85, P > 0.12$; Wolf 运动功能测试量表评分:(25.51 ± 32.94) 分比 (24.33 ± 32.70) 分; $F(1,13) = 1.01, P > 0.30$],该研究认为,RAS 对双侧上肢训练可能能够增加肢体的协调性,进而促进了患侧上肢的使用。但目前关于 RAS 对卒中后日常生活活动能力的研究相对较少,因此,RAS 在改善上肢日常生活活动能力方面疗效还有待继续深入研究。

4 RAS 对卒中后下肢运动功能的影响

4.1 步行能力

2016 年美国心脏协会/美国卒中协会发布的卒中康复治疗指南指出,使用 RAS 可能会提高卒中后运动功能障碍患者的步行能力(临床证据等级: B 级)^[23]。多项研究表明,RAS 可以改善卒中后运动功能障碍患者下肢运动功能^[24-32]。于利国等^[24] 研究 RAS 引导下的上肢摆动训练对卒中患者步行能力的影响,结果显示,与对照组(40 例,行常规康复治疗;1 次/d,20 min/次,5 d/周,连续 6 周)比较,RAS 组(40 例,常规康复治疗 + RAS)患者的 Berg 平衡量表 (Berg balance scale, BBS) 评分[(52.14 ± 2.33) 分比 (47.62 ± 2.14) 分]、10 m 步行速度[(26.56 ± 6.98) m/s 比 (31.36 ± 7.23) m/s]、稳定极限维持范围时间[($3\ 767.83 \pm 765.27$) s 比 ($2\ 839.27 \pm 487.55$) s]及范围[(6.82 ± 1.06) mm² 比 (5.60 ± 1.25) mm²]均明显改善(均 $P < 0.05$),提示 RAS 引导下的上肢摆动训练可以改善卒中患者的步行能力,提高步行稳定性、步速及平衡功能。聂大奥等^[25] 观察音乐节奏刺激对缺血性卒中偏瘫恢复期患者下肢运动功能康复的影响,将所有患者随

机分成试验组(常规康复治疗 + RAS)和对照组(常规康复治疗),每组 20 例,每天行走 10 min,休息 3 min,反复 3 次,连续干预 30 d,分别在治疗后第 1、15、30 天评估,治疗第 30 天时评估结果显示,试验组患侧跨步长[(29.3 ± 2.9) cm 比 (25.6 ± 1.4) cm]、最大步行速度[(42.7 ± 2.6) m/s 比 (38.5 ± 2.6) m/s]均大于对照组(均 $P < 0.05$),并且患健两侧步长差缩短更明显[(5.3 ± 2.6) cm 比 (6.9 ± 2.2) cm, $P < 0.05$],表明音乐节奏刺激对缺血性卒中偏瘫恢复期患者下肢运动功能康复可能有较好的治疗效果。刘世文等^[26] 分析 RAS 对恢复期及后遗症期卒中患者运动功能障碍的影响,对照组(75 例)采用常规康复训练,试验组(55 例)在常规康复训练的基础上进行 RAS 训练(1 次/d,5 次/周),两组均训练 8 周,结果显示,训练结束后试验组患者的 FMAS 评分(11 分比 23 分)、功能性步行量表 (functional ambulation category scale, FAC) 分级(3 级比 4 级)较对照组显著改善(均 $P < 0.01$)。但 Elsner 等^[27] 纳入 12 例后遗症期卒中患者并随机分为常规治疗组(6 例)和 RAS 组(6 例),常规治疗组进行常规步态训练,RAS 组在常规治疗组的基础上增加 RAS,每组为 30 min/d,3 次/周,持续 4 周,两组持续时间和强度相同,结果显示,训练结束后两组在步行速度[(0.48 ± 0.38) m/s 比 (0.95 ± 0.60) m/s, $P = 0.17$]和步行能力[(151 ± 126) m 比 (315 ± 202) m, $P = 0.23$]的改善方面差异均无统计学意义,提示后遗症期卒中运动功能障碍患者在有节奏的听觉刺激下行走较无 RAS 康复训练并未产生有益的影响,分析原因可能是与其他研究相比,该研究干预周期较短,干预次数也较少,且纳入的卒中患者病程在 6 个月以上,恢复较慢。

4.2 步态参数

卒中后下肢运动功能障碍主要指在运动过程中出现不对称的运动学和时空模式,表现为费力和不稳定的肢体运动,且下肢在支撑相中保持稳定和承受重量以及在摆动相中肢体向前移动存在困难^[33-34]。研究表明,RAS 可以改善卒中后运动功能障碍患者步态的对称性、步长和步速^[12,35-37]。Cha 等^[33] 纳入 41 例后遗症期卒中患者,观察 RAS 的节奏变化对卒中患者步态即刻效应的影响,要求所有患者在以下 5 种不同的条件下按随机顺序行走:(1) 无 RAS(基线);(2) 基线节奏 RAS;(3) 较基线 RAS 节奏减慢 10% (RAS - 10%);(4) 较基线

RAS 节奏加快 10% (RAS + 10%); (5) 较基线 RAS 节奏加快 + 20% (RAS + 20%); 当使用 RAS - 10% 时, 患侧下肢步速、步频和跨步长显著降低, 支撑时间显著增加; 在 RAS + 10% 条件下, 步速和步频显著增加, 步态对称性显著下降; 应用 RAS + 20% 时, 步速和步频增加, 双下肢支撑时间和步态对称性降低 (均 $P < 0.05$)。上述结果表明, 应用较快的 RAS 节奏速度可以增加卒中后下肢运动功能障碍患者的步速, 较慢节奏的 RAS 可以改善卒中患者步态对称性。Shin 等^[34] 纳入 11 例卒中患者探讨 RAS 步态训练对卒中患者运动学和时空步态模式的影响, 治疗 30 min/d, 3 次/周, 连续治疗 4 周, 结果表明, 与治疗前相比, 卒中患者在摆动中期最大膝关节屈曲显著改善 [(55.31 ± 3.90)° 比 (48.88 ± 4.31)°, $P = 0.021$], 末端站立时最大踝关节背屈角度升高 [(16.15 ± 1.42)° 比 (13.79 ± 1.27)°, $P = 0.026$], 表明行 RAS 步态训练后, 卒中患者在摆动中期膝关节屈曲度增加, 进而可能会减少足趾拖拽和代偿性骨盆上提, 从而在步态的摆动阶段诱导相对充足的肢体推进。

5 RAS 对卒中后平衡功能的影响

多项研究表明, RAS 对改善卒中后运动功能障碍患者的平衡能力有较好的治疗效果^[25, 29, 38-42]。Kim 等^[29] 纳入恢复期卒中后运动功能障碍患者 20 例, 随机分为 RAS 组 (10 例) 和常规组 (10 例), 常规组进行常规步态训练, RAS 组患者在常规步态训练的基础上使用智能手机节拍器应用程序进行 RAS 步态训练, 训练周期为 30 min/d, 3 d/周, 连续治疗 5 周后采用特定平衡信心量表评估卒中患者的平衡能力, 结果显示, 治疗 5 周后 RAS 组的特定平衡信心量表评分高于与对照组 [(12.52 ± 10.35) 分比 (3.26 ± 7.10) 分, $P < 0.05$], 提示 RAS 可以改善卒中患者的平衡能力。Shin 和 Chung^[35] 将 32 例恢复期卒中患者随机分为视觉反馈 (visual feedback, VF) + RAS 组 (16 例) 和对照组 (16 例), VF + RAS 组进行含 VF 和 RAS 的跑台训练, 对照组进行无任何视觉和听觉刺激的跑台训练, 均为 30 min/d, 3 d/周, 干预 8 周后采用 BBS 评价所有患者的平衡功能, 结果显示, VF + RAS 组的 BBS 评分高于对照组, 差异有统计学意义 [(48.25 ± 4.86) 分比 (42.19 ± 7.43) 分, $P < 0.05$]。杨卓霖等^[38] 探讨分析 RAS 对后遗症期卒中患者步态和平衡的干预作用, RAS 组 (常规康复训练 + RAS) 和对照组 (行常规康复训练) 各纳入

35 例患者, 进行 15 min/d, 连续训练 3 个月的康复治疗, 结果显示, 训练结束后 RAS 组 BBS 评分高于对照组 [(42.52 ± 7.54) 分比 (36.85 ± 6.18) 分, $P < 0.05$]。Cho 和 Kim^[39] 探讨动作观察训练结合 RAS 对卒中后运动功能障碍患者平衡能力的影响, 共纳入 30 例后遗症期卒中患者, 接受 30 min/d, 3 d/周的康复训练, 持续干预 8 周, 训练结束后使用 Biodex 平衡系统 (动态平衡仪器) 评估患者平衡能力, 结果显示, 接受节律性训练的动作观察组 (15 例) 较单纯动作观察组 (15 例) 在步态平衡方面改善更显著 (总体平衡指数: -1.42 ± 0.48 比 -0.75 ± 0.09, $P = 0.01$), 该研究认为应用音乐节律可能增加了站立阶段患侧下肢的单腿支撑, 从而改善了患者平衡和步态模式。RAS 改善平衡可能与前庭系统有关, Horak^[43] 的研究认为, 与前庭系统相关的内侧-内侧膝状体核在耳部主要影响站立平衡, 当听觉刺激到达 Corti 器时, 信号传递至内侧-内侧膝状体核, 随后, 信号到达颞叶的听觉皮质, 可激活前庭系统来改善站立平衡, RAS 可能通过这种方式改善平衡。对此, Juntunen 等^[44] 纳入 60 例有不同程度的噪音引起的听力损失者及 115 名健康对照者进行比较, 使用平衡仪评估所有人的姿势稳定性, 结果显示, 听觉能力丧失更严重者 (由高频声音导致的听力损失) 姿势更不稳定, 提示听觉能力和站立平衡在大脑脑区解剖和功能方面存在联系, RAS 可以潜在地改善站立平衡。

6 与其他康复技术结合的联合康复治疗

RAS 还可以与其他康复技术相结合使用。王腾^[28] 的研究表明, BATRAC 和功能性电刺激 (functional electrical stimulation, FES) 结合的治疗方案对亚急性期重度上肢功能障碍 (Brunnstrom 分期 I ~ II 期) 卒中患者上肢运动功能的恢复优于单纯 FES 治疗, 该研究将所有患者随机分为常规治疗组 (15 例)、常规治疗 + FES 组 (15 例)、常规治疗 + FES + BATRAC 组 (15 组), 3 组均给予 105 min/d, 1 次/d, 5 次/周, 连续 4 周的康复治疗方案, 并于治疗前及治疗 2、4 周后评估, 结果显示, 干预 2 周后常规治疗 + FES + BATRAC 组 FMA 上肢部分评分并不优于常规治疗 + FES 组 [(11.07 ± 1.62) 分比 (9.80 ± 1.78) 分, $P > 0.05$], 干预 4 周后常规治疗 + FES + BATRAC 组 FMA 上肢部分评分高于常规治疗 + FES 组 [(15.53 ± 1.46) 分比 (12.13 ± 2.59) 分, $P < 0.05$], 表明 FES + BATRAC 连续治疗 4 周的康复治疗方案在改善亚急性期卒中严重偏瘫上肢运动障碍

方面是可行和有效的。RAS 与 VF 相结合的康复治疗可以改善卒中患者的时空对称性以及步态参数^[35]。王强等^[45]纳入 68 例卒中患者(患侧下肢 Brunnstrom 分期 \geq IV 期)并随机分为对照组和观察组(各 34 例),对照组采用常规康复治疗以及动作观察,观察组在对照组的基础上增加 RAS,共计 15 min,重复进行 2 组,1 次/d,5 d/周,两组均连续治疗 8 周,结果显示,与对照组比较,观察组患者下肢步态、平衡功能改善程度更高[10 m 步行速度:(27.26 \pm 7.64) m/s 比(33.29 \pm 9.09) m/s;BBS 评分:(38.29 \pm 3.98) 分比(36.03 \pm 4.33) 分,均 $P < 0.01$]。王娟等^[46]将 FES 与 RAS 结合应用于卒中后下肢功能障碍患者的康复治疗,该研究纳入 40 例恢复期卒中后运动功能障碍患者,并随机分为对照组和试验组(各 20 例),两组患者均予常规康复治疗,其中对照组予以 FES 行步行训练,RAS 组则予以 FES 同步 RAS 行步行训练,采用 BBS 于训练前及训练后 2、4 周评定患者的平衡功能,结果显示,仅治疗 4 周后 RAS 组 BBS 评分高于对照组[(42.40 \pm 5.47) 分比(39.25 \pm 3.86) 分, $P < 0.05$],该研究认为,通过规律、持续的外部听觉刺激,患侧足跟离地得到规律性提示,使双下肢产生节奏性运动,配合 FES 可以改善患侧下肢运动模式,经过反复训练,可提高步速、改善健侧和患侧负重比。

综上所述,RAS 可以和多种治疗结合,且能达到较好的治疗效果,未来还可以将 RAS 与机器人、非侵入性脑刺激、脑-机接口等其他康复技术联合使用,发挥协同作用。

7 小结与展望

卒中后上下肢运动功能障碍的恢复一直是临床治疗关注的重点,RAS 作为一种新兴的治疗手段,在促进卒中患者运动功能恢复方面具有优势。通过促进神经可塑性和改善运动控制等方式,RAS 能够为患者带来更好的康复效果。但目前关于 RAS 的研究相对比较少,且治疗方法、治疗频率等均未得到统一,这也是今后研究的方向和重点。同时,现有的临床研究样本量相对较少,随机对照试验数量有限,其循证质量和临床科学性不足。另外,现有研究评估指标多采用量表评估功能,而针对脑功能方面的评估如头部功能磁共振、脑电和近红外等的应用研究较为缺乏,在探索脑功能机制方面具有一定局限性。未来,随着对 RAS 作用机制的深入研究以及技术参数的不断完善,或可开发出更加高效、个性化的治疗

方案来帮助卒中患者恢复运动功能。

利益冲突 所有作者声明无利益冲突

作者贡献声明 袁润萍:数据分析,文章撰写;张寒阳:查阅文献,文章审核;张阳:对文章知识性内容作批评性审阅;杨晓莉:查阅文献;吴鸣:对文章知识性内容作批评性审阅,指导文章修改,支持性贡献

参考文献

- [1] Feigin VL. Anthology of stroke epidemiology in the 20th and 21st centuries: assessing the past, the present, and envisioning the future[J]. *Int J Stroke*, 2019, 14(3): 223-237. DOI:10.1177/1747493019832996.
- [2] Gorelick PB. The global burden of stroke: persistent and disabling[J]. *Lancet Neurol*, 2019, 18(5): 417-418. DOI: 10.1016/S1474-4422(19)30030-4.
- [3] Wafa HA, Wolfe CDA, Emmett E, et al. Burden of stroke in Europe: thirty-year projections of incidence, prevalence, deaths, and disability-adjusted life years[J]. *Stroke*, 2020, 51(8): 2418-2427. DOI: 10.1161/STROKEAHA.120.029606.
- [4] Thaut MH. The discovery of human auditory-motor entrainment and its role in the development of neurologic music therapy[J]. *Prog Brain Res*, 2015, 217: 253-266. DOI:10.1016/bs.pbr.2014.11.030.
- [5] Lotze M, Ladda AM, Stephan KM. Cerebral plasticity as the basis for upper limb recovery following brain damage[J]. *Neurosci Biobehav Rev*, 2019, 99: 49-58. DOI:10.1016/j.neubiorev.2019.01.027.
- [6] Mojtabavi H, Shaka Z, Momtazmanesh S, et al. Circulating brain-derived neurotrophic factor as a potential biomarker in stroke: a systematic review and Meta-analysis[J]. *J Transl Med*, 2022, 20(1): 126. DOI:10.21203/rs.3.rs-1022990/v1.
- [7] Thaut MH, McIntosh GC, Rice RR, et al. Rhythmic auditory stimulation in gait training for Parkinson's disease patients[J]. *Movement Disorders*, 1996, 11(2): 193-200. DOI:10.1002/mds.870110213.
- [8] Xu C, He Z, Shen Z, et al. Potential benefits of music therapy on stroke rehabilitation[J]. *Oxid Med Cell Longev*, 2022, 2022: 9386095. DOI:10.1155/2022/9386095.
- [9] Lezama-Espinosa C, Hernandez-Montiel HL. Neuroscience of the auditory-motor system: how does sound interact with movement? [J]. *Behav Brain Res*, 2020, 384: 112535. DOI:10.1016/j.bbr.2020.112535.
- [10] Emmerly L, Hackney ME, Kesar T, et al. An integrated review of music cognition and rhythmic stimuli in sensorimotor neurocognition and neurorehabilitation[J]. *Ann N Y Acad Sci*, 2023, 1530(1): 74-86. DOI:10.1111/nyas.15079.
- [11] Thaut MH, Kenyon GP, Schauer ML, et al. The connection between rhythmicity and brain function [J]. *IEEE Eng Med Biol Mag*, 1999, 18(2): 101-108. DOI: 10.1109/

51. 752991.
- [12] Suh JH, Han SJ, Jeon SY, et al. Effect of rhythmic auditory stimulation on gait and balance in hemiplegic stroke patients[J]. *NeuroRehabilitation*, 2014, 34(1): 193-199. DOI: 10. 3233/NRE-131008.
- [13] Shumway-Cook A, Anson D, Haller S. Postural sway biofeedback: its effect on reestablishing stance stability in hemiplegic patients [J]. *Arch Phys Med Rehabil*, 1988, 69(6): 395-400. DOI: 10. 1097/0002060-19880600-00009.
- [14] Prassas S, Thaut M, McIntosh G, et al. Effect of auditory rhythmic cuing on gait kinematic parameters of stroke patients[J]. *Gait Posture*, 1997, 6: 218-223. DOI: 10. 1016/S0966-6362(97)00010-6.
- [15] Tian R, Zhang B, Zhu Y. Rhythmic auditory stimulation as an adjuvant therapy improved post-stroke motor functions of the upper extremity: a randomized controlled pilot study[J]. *Front Neurosci*, 2020, 14: 649. DOI: 10. 3389/fnins. 2020. 00649.
- [16] van Delden AL, Peper CL, Nienhuys KN, et al. Unilateral versus bilateral upper limb training after stroke: the upper limb training after stroke clinical trial [J]. *Stroke*, 2013, 44(9): 2613-2616. DOI: 10. 1161/STROKEAHA. 113.001969.
- [17] Dispa D, Lejeune T, Thonnard JL. The effect of repetitive rhythmic precision grip task-oriented rehabilitation in chronic stroke patients: a pilot study [J]. *Int J Rehabil Res*, 2013, 36(1): 81-87. DOI: 10. 1097/MRR. 0b013e32835acfd5.
- [18] Richards LG, Senesac CR, Davis SB, et al. Bilateral arm training with rhythmic auditory cueing in chronic stroke: not always efficacious [J]. *Neurorehabil Neural Repair*, 2008, 22(2): 180-184. DOI: 10. 1177/1545968307305355.
- [19] Malcolm MP, Massie C, Thaut M. Rhythmic auditory-motor entrainment improves hemiparetic arm kinematics during reaching movements: a pilot study[J]. *Top Stroke Rehabil*, 2009, 16(1): 69-79. DOI: 10. 1310/tsr1601-69.
- [20] Kim JR, Jung MY, Yoo EY, et al. Effects of rhythmic auditory stimulation during hemiplegic arm reaching in individuals with stroke: an exploratory study [J]. *Hong Kong J Occup Th*, 2014, 24(2): 1-8. DOI: 10. 1016/j. hkjot. 2014. 11. 002.
- [21] Todd NP, Lee CS. The sensory-motor theory of rhythm and beat induction 20 years on: a new synthesis and future perspectives [J]. *Front Hum Neurosci*, 2015, 9: 444. DOI: 10. 3389/fnhum. 2015. 00444.
- [22] Whittall J, McCombe Waller S, Silver KH, et al. Repetitive bilateral arm training with rhythmic auditory cueing improves motor function in chronic hemiparetic stroke [J]. *Stroke*, 2000, 31(10): 2390-2395. DOI: 10. 1161/01. STR. 31. 10. 2390.
- [23] Winstein CJ, Stein J, Arena R, et al. Guidelines for adult stroke rehabilitation and recovery: a guideline for healthcare professionals from the American Heart Association/American Stroke Association [J]. *Stroke*, 2016, 47(6): e98-e169. DOI: 10. 1161/STR. 0000000000000098.
- [24] 于利国, 章志超, 王博, 等. 节律性听觉刺激引导下的上肢摆动训练对脑卒中患者步行能力的影响 [J]. *中华物理医学与康复杂志*, 2023, 45(3): 205-209. DOI: 10. 3760/cma. j. issn. 0254-1424. 2023. 03. 003.
- [25] 聂大奥, 陈俊抛, 邢一兰, 等. 音乐节奏刺激对缺血性卒中偏瘫患者下肢运动功能康复的影响 [J]. *中国脑血管病杂志*, 2014, 11(2): 80-83. DOI: 10. 3969/j. issn. 1672-5921. 2014. 02. 005.
- [26] 刘世文, 刘全丰, 杨知博, 等. 节律性听觉刺激干预脑卒中患者非急性期的运动障碍 [J]. *中国组织工程研究*, 2023, 27(35): 5583-5588. DOI: 10. 12307/2023. 952.
- [27] Elsner B, Schöler A, Kon T, et al. Walking with rhythmic auditory stimulation in chronic patients after stroke: a pilot randomized controlled trial [J]. *Physiother Res Int*, 2020, 25(1): e1800. DOI: 10. 1002/pri. 1800.
- [28] 王腾. BATRAC 结合 FES 对脑卒中亚急性期偏瘫患者上肢功能的影响 [D]. 西安: 西安体育学院, 2023. DOI: 10. 27401/d. cnki. gxate. 2023. 000233.
- [29] Kim JH, Park SG, Lim HJ, et al. Effects of the combination of rhythmic auditory stimulation and task-oriented training on functional recovery of subacute stroke patients [J]. *J Phys Ther Sci*, 2012, 24: 1307-1313. DOI: 10. 1589/jpts. 24. 1307.
- [30] Shaw L, McCue P, Brown P, et al. Auditory rhythmical cueing to improve gait in community-dwelling stroke survivors (ACTIVATE): a pilot randomised controlled trial [J]. *Pilot Feasibility Stud*, 2022, 8(1): 239. DOI: 10. 1186/s40814-022-01193-y.
- [31] Wang L, Peng JL, Xiang W, et al. Effects of rhythmic auditory stimulation on motor function and balance ability in stroke: a systematic review and Meta-analysis of clinical randomized controlled studies [J]. *Front Neurosci*, 2022, 16: 1043575. DOI: 10. 3389/fneur. 2022. 818559.
- [32] Thaut MH, McIntosh GC, Rice RR. Rhythmic facilitation of gait training in hemiparetic stroke rehabilitation [J]. *J Neurol Sci*, 1997, 151(2): 207-212. DOI: 10. 1016/S0022-510X(97)00146-9.
- [33] Cha Y, Kim Y, Chung Y. Immediate effects of rhythmic auditory stimulation with tempo changes on gait in stroke patients [J]. *J Phys Ther Sci*, 2014, 26(4): 479-482. DOI: 10. 1589/jpts. 26. 479. Epub 2014 Apr 23.
- [34] Shin YK, Chong HJ, Kim SJ, et al. Effect of rhythmic auditory stimulation on hemiplegic gait patterns [J]. *Yonsei Med J*, 2015, 56(6): 1703-1713. DOI: 10. 3349/ymj. 2015. 56. 6. 1703.
- [35] Shin J, Chung Y. The effects of treadmill training with visual feedback and rhythmic auditory cue on gait and balance in chronic stroke patients: a randomized controlled trial [J]. *NeuroRehabilitation*, 2022, 51(3): 443-453.

- DOI:10.3233/NRE-220099.
- [36] Ghai S, Ghai I. Effects of (music-based) rhythmic auditory cueing training on gait and posture post-stroke: a systematic review & dose-response Meta-analysis[J]. *Sci Rep*, 2019, 9(1):2183. DOI:10.1038/s41598-019-38723-3.
- [37] Crosby LD, Wong JS, Chen JL, et al. An initial investigation of the responsiveness of temporal gait asymmetry to rhythmic auditory stimulation and the relationship to rhythm ability following stroke[J]. *Front Neurol*, 2020, 11:517028. DOI:10.3389/fneur.2020.517028. eCollection 2020.
- [38] 杨卓霖, 王丽菊, 陈立早, 等. 探讨分析节律性听觉刺激对脑卒中偏瘫患者步态和平衡的干预作用[J]. *哈尔滨医药*, 2023, 43(1):88-89. DOI:10.3969/j.issn.1001-8131.2023.01.035.
- [39] Cho H, Kim K. Effects of action observation training with auditory stimulation on static and dynamic balance in chronic stroke patients[J]. *J Stroke Cerebrovasc Dis*, 2020, 29(5):104775. DOI:10.1016/j.jstrokecerebrovasdis.2020.104775.
- [40] Gonzalez-Hoelling S, Bertran-Noguer C, Reig-Garcia G, et al. Effects of a music-based rhythmic auditory stimulation on gait and balance in subacute stroke[J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2021, 18(4):2032. DOI:10.3390/ijerph18042032.
- [41] Lee Y, Shin S. Improvement of gait in patients with stroke using rhythmic sensory stimulation: a case-control study[J]. *J Clin Med*, 2022, 11(2):425. DOI:10.3390/jcm11020425.
- [42] Thaut MH, Leins AK, Rice RR, et al. Rhythmic auditory stimulation improves gait more than NDT/Bobath training in near-ambulatory[J]. *Neurorehabil Neural Repair*, 2007, 21(5):455-459. DOI:10.1177/1545968307300523.
- [43] Horak FB. Clinical measurement of postural control in adults[J]. *Phys Ther*, 1987, 67(12):1881-1885. DOI:10.2307/1510756.
- [44] Juntunen J, Matikainen E, Ylikoski J, et al. Postural body sway and exposure to high-energy impulse noise[J]. *Lancet*, 1987, 2(8553):261-264. DOI:10.1016/S0140-6736(87)90840-3.
- [45] 王强, 李新通, 李楠, 等. 动作观察疗法联合节律性听觉刺激对脑卒中恢复期患者步行功能的影响[J]. *中国康复*, 2021, 36(3):140-143. DOI:10.3870/zgkf.2021.03.003.
- [46] 王娟, 赵凯, 徐梅. 功能性电刺激同步节律性听觉刺激对脑卒中患者下肢运动功能的影响[J]. *中国康复医学杂志*, 2019, 34(5):566-569. DOI:10.3969/j.issn.1001-1242.2019.05.013.

(收稿日期:2024-06-19)

(本文编辑:肖倩倩)

(上接第 479 页)

- [5] 张红伟, 王丹, 刘良进, 等. 颈动脉多普勒超声联合经颅彩色多普勒超声评估颈内动脉-椎基底动脉吻合血流动力学的临床价值[J]. *实用医学杂志*, 2020, 36(10):1366-1370. DOI:10.3969/j.issn.1006-5725.2020.10.019.
- [6] 杨洁, 华扬, 李秋萍, 等. 血管超声评估永存颈内动脉-椎基底动脉吻合的血流动力学特征[J]. *中国脑血管病杂志*, 2019, 16(9):471-477. DOI:10.3969/j.issn.1672-5921.2019.09.005.
- [7] 安立渐, 邢英琦. 永存动脉的超声诊断思路与进展[J]. *中国卒中杂志*, 2023, 18(7):837-843. DOI:10.3969/j.issn.1673-5765.2023.07.015.
- [8] Caldemeyer KS, Carrico JB, Mathews VP. The radiology and embryology of anomalous arteries of the head and neck[J]. *AJR Am J Roentgenol*, 1998, 170(1):197-203. DOI:10.2214/ajr.170.1.9423632.
- [9] 中国医师协会神经介入专业委员会, 中国颅内动脉瘤计划研究组. 中国颅内破裂动脉瘤诊疗指南 2021[J]. *中国脑血管病杂志*, 2021, 18(8):546-574. DOI:10.3969/j.issn.1672-5921.2021.08.007.
- [10] Pritz MB. Cerebral aneurysm classification based on angioarchitecture[J]. *J Stroke Cerebrovasc Dis*, 2011, 20(2):162-167. DOI:10.1016/j.jstrokecerebrovasdis.2009.11.018.
- [11] Frösen J, Tulamo R, Paetau A, et al. Saccular intracranial aneurysm: pathology and mechanisms[J]. *Acta Neuropathol*, 2012, 123(6):773-786. DOI:10.1007/s00401-011-0939-3.
- [12] Wang YL, Ma YQ, Hui PQ, et al. Evaluation of application value of transcranial Doppler (TCD) in the inspection of cerebral vasospasm after the treatment of intracranial aneurysm[J]. *Curr Med Imaging Rev*, 2018, 14(1):143-146. DOI:10.2174/1573405613666170504150537.
- [13] Hutchison K, Weir B. Transcranial Doppler studies in aneurysm patients[J]. *Can J Neurol Sci*, 1989, 16(4):411-416. DOI:10.1017/S0317167100029486.
- [14] 米东华, 杨中华, 杨波, 等. 床旁经颅多普勒在重症脑血管病监护中的应用[J]. *中国卒中杂志*, 2018, 13(5):521-526. DOI:10.3969/j.issn.1673-5765.2018.05.024.
- [15] White PM, Wardlaw JM, Teasdale E, et al. Power transcranial Doppler ultrasound in the detection of intracranial aneurysms[J]. *Stroke*, 2001, 32(6):1291-1297. DOI:10.1161/01.str.32.6.1291.

(收稿日期:2024-07-02)

(本文编辑:吕莉)