

• 论 著 •

脑机接口技术联合音乐干预对肘关节僵硬患者术后疼痛的影响

方丹灵¹,董芳辉¹,王音¹,陆平辰²,王伟³,马桂芬⁴

摘要:目的 探讨脑机接口技术结合音乐干预对肘关节僵硬手术患者术后疼痛的影响。方法 采用便利抽样法,选取肘关节僵硬行开放性肘关节松解术患者 105 例,根据不同住院科室分为对照组、干预 1 组、干预 2 组各 35 例。对照组实施常规术后疼痛管理,在此基础上干预 1 组实施普通音乐干预、干预 2 组实施脑机接口技术联合音乐干预,比较三组术后疼痛管理质量及早期康复锻炼完成情况。结果 干预后,三组静止性疼痛评分、活动性疼痛评分及早期康复锻炼完成率比较,差异有统计学意义(均 $P < 0.05$);且干预 2 组各项评分显著优于其他两组(均 $P < 0.05$)。结论 脑机接口技术联合音乐干预可有效降低术后疼痛水平,促进早期康复锻炼,提升疼痛管理质量。

关键词:肘关节僵硬; 关节松解术; 术后疼痛; 术后静止性疼痛; 术后活动性疼痛; 康复锻炼; 脑机接口技术; 音乐干预
中图分类号:R473.6;TP **DOI:**10.3870/j.issn.1001-4152.2025.21.006

Impact of brain-computer interface technology combined with music intervention on postoperative pain in patients with elbow joint stiffness

Fang Danling, Dong Fanghui, Wang Yin, Lu Pingchen, Wang Wei, Ma Guifen. Department of Nursing, Shanghai Jiao Tong University School of Medicine Affiliated Sixth People's Hospital, Shanghai 201306, China

Abstract: **Objective** To explore the impact of brain-computer interface (BCI) technology combined with music intervention on postoperative pain in patients with Elbow Joint Stiffness. **Methods** A convenient sampling method was used to select 105 patients undergoing open elbow joint release surgery for elbow joint stiffness, who were divided into a control group, intervention group 1, and intervention group 2, each with 35 cases, according to different hospital departments. The control group received routine postoperative pain management, intervention group 1 received general music intervention, and intervention group 2 was subjected to BCI technology combined with music intervention based on the control group. The pain management quality and the completion of early rehabilitation exercises were compared among the three groups postoperatively. **Results** After the intervention, there were statistically significant differences in static pain scores, dynamic pain scores, and the completion rate of early rehabilitation exercises among the three groups (all $P < 0.05$); and the scores of intervention group 2 were significantly better than the other two groups (all $P < 0.05$). **Conclusion** The combination of BCI technology and music intervention can effectively reduce postoperative pain levels, promote early rehabilitation exercises, and improve pain management quality.

Keywords: Elbow joint stiffness; joint release surgery; postoperative pain; static postoperative pain; dynamic postoperative pain; rehabilitation exercises; Brain-computer interface technology; music intervention

肘关节僵硬指肘关节功能受限,无法满足日常生活需要,是肘部创伤后的常见并发症^[1]。开放性肘关节松解术(Open Elbow Arthroplasty, OEA)是其治疗的常见有效术式,但其远期疗效依赖术后早期及时且准确的康复锻炼,其中术后 24 h 的康复锻炼最为关键^[2-3],如因严重疼痛而被迫中断,则易引发异位骨化、关节粘连等并发症,甚至会造成肘关节再次僵硬,使得患者不得不接受二次手术^[2-3]。尽管多模式镇痛

作为 OEA 的标准镇痛方案已产生一定效果,但尚未完全满足患者对术后无痛康复的需求,对患者康复进程及远期预后产生不利影响^[4]。因此,探索更为有效的镇痛措施对改善 OEA 患者预后具有重要意义^[5]。脑机接口技术(Brain-Computer Interface, BCI)是一种新兴的神经调控技术^[6],分侵入式和非侵入式两种。其中,非侵入式脑机接口技术因具有不穿刺、无创伤、操作简单的优点而更易于临床,主要通过脑电采集头环实时检测脑电波,将用户的脑电波变化直接转化为相应的控制指令,再利用外部设备(如手机 App)实现人机交互^[6-7]。目前,脑机接口技术已应用于康复训练^[8]、疼痛调控^[9]以及音乐干预^[10]等。其中,音乐干预已广泛用于临床,如脑卒中患者情绪调节^[11]、产妇分娩镇痛^[12]等。将脑机接口技术联合音乐干预可根据患者对音乐的不同感受动态调整音乐

作者单位:上海交通大学医学院附属第六人民医院 1. 护理部 2. 康复科 3. 骨科(上海,201306);4. 甘肃省人民医院护理部
通信作者:董芳辉,18930177557@163.com
方丹灵:女,硕士,主管护师,fangdanl@yeah.net
科研项目:上海市第六人民医院医疗集团科研课题[LY33X-4587(LG)]
收稿:2025-05-14;修回:2025-08-08

参数(如旋律、节奏、音色),从而进行更有效干预。本研究旨在探讨脑机接口技术联合音乐干预对 OEA 患者术后疼痛的影响,报告如下。

1 资料与方法

1.1 一般资料 以便利抽样方式选取 2024 年 7—9 月上海第六人民医院骨科收治的肘关节僵硬患者作为研究对象。纳入标准:①符合肘关节僵硬的诊断标准^[12];②行 OEA,采用全身麻醉+神经阻滞麻醉;③美国麻醉协会(American Society of Anesthesiologists, ASA)体格状况分级≤Ⅱ级^[12];④沟通能力和听力均正常;⑤喜爱音乐;⑥自愿参加此次研究,并且签署知情同意书。排除标准:①年龄≤18 岁;②存在严重基础疾病,或癫痫、中重度认知功能障碍(简易精神状态量表评分<24 分)、体内有电子植入物(心脏起搏器等)、由于皮炎而导致的头皮完整性破坏;③同时参与其他相关研究。剔除、脱落标准:①手术终止;②术后转入 ICU 或者自动出院;③中途要求退出研

究;④因中途取下耳机或镇痛泵等设备问题未完成干预。本研究通过上海交通大学医学院附属第六人民医院伦理委员会批准(2024-YS-157)。以静止性疼痛评分为主要观察指标,将预试验结果[三组各 7 例,对照组、干预 1 组及干预 2 组 VAS 评分分别为(5.1±1.5)分、(4.4±1.3)分及(3.8±1.2)分]代入 PASS15.0 软件,设置检验效力 1-β 为 80%,检验水准 α 为 5%(双侧),三组样本量的比例为 1:1:1,计算每组所需样本量 24 例,考虑 20%脱落率,最终每组需要样本量 30 例。本研究为非随机对照试验,根据入住病区不同,将符合纳入标准的骨一、骨二、关节外科病区的肘关节僵硬患者 36 例、35 例、37 例分别纳入对照组、干预 1 组、干预 2 组,其中,对照组因术后 24 h 内镇痛泵堵塞剔除 1 例、干预 2 组因要求退出 2 例,最终每组各 35 例患者完成研究。三组一般资料比较,见表 1。

表 1 三组一般资料比较

组别	例数	性别(例)		年龄 (岁, $\bar{x} \pm s$)	文化程度(例)		吸烟(例)		患手(例)	
		男	女		高中及以下	大专及以上	是	否	左	右
对照组	35	18	17	44.14±3.89	14	21	15	20	17	18
干预 1 组	35	17	18	44.06±3.80	14	21	13	22	19	16
干预 2 组	35	20	15	44.17±3.57	11	24	12	23	18	17
统计量		$\chi^2=0.535$		$F=0.009$	$\chi^2=0.734$		$\chi^2=0.565$		$\chi^2=0.229$	
P		0.765		0.991	0.693		0.754		0.892	

组别	例数	病程 (月, $\bar{x} \pm s$)	慢性病(例)		BMI (kg/m ² , $\bar{x} \pm s$)	ASA 分级(例)		手术时间 (min, $\bar{x} \pm s$)	麻醉时间 (min, $\bar{x} \pm s$)	
			有	无		I 级	II 级			
对照组	35	8.03±2.27	6	29	27.09±2.30	10	25	142.46±11.64	154.11±10.41	
干预 1 组	35	8.00±2.26	8	27	27.68±2.30	9	26	142.89±10.67	153.74±9.43	
干预 2 组	35	7.97±1.72	7	28	27.64±2.38	7	28	142.60±11.41	152.71±11.86	
统计量		$F=0.006$	$\chi^2=0.357$		$F=0.694$	$\chi^2=0.716$		$F=0.013$	$F=0.163$	
P		0.994	0.836		0.502	0.699		0.987	0.849	

1.2 干预方法

三组由同一组医生行开放性肘关节松解术,同一麻醉师行全身麻醉复合臂丛神经阻滞麻醉(术前 1 h 完成神经阻滞)。手术结束后,待患者神志清楚、自主呼吸恢复良好(呼吸频率及潮气量达标),且能遵医嘱进行简单动作后,即拔除气管插管,将其转入复苏室,由麻醉护士持续观察 1.5 h,观察期间如患者生命体征平稳、意识清楚、伤口无渗血渗液且引流管通畅,则由工勤人员及另一麻醉护士将其护送回病房。

1.2.1 对照组 由研究小组的医生、康复师、护士共同完成干预。入院时病房护士完成宣教,术前 1 d 手术室护士进行访视;术后第 1 天起,病房护士与康复师联合指导患者开展主动-辅助-被动康复锻炼(每日 3 次,每次 30 min),具体包括:①握拳伸指运动(仰卧位,握拳保持 5 s→充分伸指保持 5 s 为 1 组,共 10 组);②肘关节屈伸训练(仰卧位,缓慢屈曲至最大角度保持 5 s→缓慢伸直保持 5 s 为 1 次,共 10 次);③

角度锁定训练(通过铰链式外固定支架设定当前可承受的屈曲角度,维持锁定 5 min,每日递增 5°);④前臂旋转训练(拆除支架远端组件后,前臂旋前保持 5 s→旋后保持 5 s 为 1 个动作,共 10 个)。若锻炼中出现剧烈疼痛(VAS≥7 分),立即暂停并冰敷 5~10 min,未缓解则由研究小组调整方案。疼痛管理采用舒芬太尼 100 μg+昂丹司琼 8 mg 配置的镇痛泵(背景输注 2 mL/h,自控 0.5 mL/次,锁定 15 min),术后第 1 天起口服塞来西布(1 粒/次,2 次/d),术后 24 h 内 VAS≥7 分由护士遵医嘱调整镇痛泵参数,同时记录疼痛相关信息。

1.2.2 干预 1 组 在对照组基础上,由研究小组康复师、护士及持有中国音乐治疗学会中级认证的音乐治疗护士协同完成干预。干预前由音乐治疗护士基于循证医学,参考权威音乐治疗文献、临床康复案例,建立标准音乐曲库,见表 2 和表 3。术前 1 d,手术室护士告知患者音乐干预目的、注意事项、配合要点。

术日,患者转入复苏室 30 min 内,麻醉护士为其进行标准化音乐干预,包括协助患者戴主动降噪耳机(索尼 WH-1000XM4),耳机外套一次性防过敏耳机罩;将耳机通过蓝牙与 MP3(索尼 NW-A306)相连;设置音量 40~50 dB、播放模式为自然声景过渡→舒缓曲目循环播放 30 min→自然声景收尾。注意事项:告知患者聆听音乐期间不得摘下耳机。音乐干预结束后,待患者观察期满返回病房。耳机及 MP3 由手术室护士按 WS/T367-2012《医疗机构消毒技术规范》消毒后通过医院轨道式动力传输装置返回病区护士台。术后 1 d,患者进行第 1 次康复锻炼时,康复师使用校准后的节拍器,在多媒体示教室一对一指导患者进行康复锻炼(与对照组动作相同)。在锻炼过程中,病房护士为患者再次实施音乐护理,使用蓝牙射频器让康复师佩戴耳机同时聆听同首曲目,以便康复师根据患者对节奏的适应情况、动作完成质量及身体耐受度,动态调整节拍器节奏。若康复锻炼中患者出现剧烈疼痛,处理方法同对照组。

1.2.3 干预 2 组 在对照组基础上,由脑机接口操作师、软件维护人员和研究小组共同进行干预。在干预开始之前,由研究小组负责订制“NeuroElbow 复位”App(医院局域网专用)、创建统一账号、密码,同时在手术室和病房手机上安装、调试好 App,由软件维护人员检测软件是否能正常运行。该 App 包括患

者信息管理、操作教程、数据监测(实时显示脑机接口采集到的脑电信号波形以及相关参数,如频率、幅值)、音乐干预(内置表 2、表 3 的音乐曲目和调节功能)4 个板块。术前 1 d 由手术室护士术前访视时告知患者的脑机接口音乐干预要点,嘱其佩戴头环并适应 5 min,同时确认设备处于备用状态。手术日转复苏室后 30 min 内由脑机接口操作师主持、麻醉护士配合完成干预:①用 75%乙醇擦拭患者额部皮肤;②按国际 10~20 电极定位法安放 Fp1(左侧额极)、Fp2(右侧额极)、Fz(额区中线)位点电极片并佩戴头环;③蓝牙配对,登录统一账号选择患者;④播放舒缓音乐 30 min,初始音量控制为 40~50 dB,以脑电波为依据调整 App 参数,见表 4,曲目同干预 1 组;⑤佩戴弹性无纺布均匀式头部固定带(拉伸至约 56 cm)。麻醉护士全程监护患者的生命体征和主诉直至观察期结束将患者送入病房。耳机、头环处理方法同干预 1 组。术后第 1 天康复锻炼时,由康复师通过多媒体示教室进行一对一指导(康复锻炼同对照组)。脑机接口操作师联合病房护士开展音乐干预,包括操作师完成设备运转并记录脑电波特征(α/β 波占比、时序变化等),护士关注患者反应,若患者出现剧痛(VAS \geq 7 分),护士按照对照组方案处理。音乐干预过程中若出现 App 运行故障,软件维护人员在 10 min 内到现场调试修复。

表 2 苏醒室音乐曲目及播放顺序

顺序	环节	曲目	类型	时长	累计时长	选曲依据及干预目标
1	自然声景过渡	《溪流鸟鸣声》	环境音效	1 min 30 s	1 min 30 s	进入 30 s 清水的河流声音+30 s 树林里的鸟鸣声环境音效,像森林的早晨一样地放松心情,并通过听觉系统接受带有 2Hz/s 的低频低谷噪声
2	主体放松 1	《雪梦》	经典舒缓 (纯音乐)	4 min 53 s	6 min 23 s	融合轻柔风声的钢琴旋律,激活副交感神经,减弱骨骼肌张力,降低血压和心率,延续自然声景放松基调
3	主体安抚 1	《卡农》	经典舒缓 (经典)	4 min 29 s	10 min 52 s	是曲调悠扬、具淡然之美的弦乐演奏乐音,其在重复迭进中荡漾出的宁心安神气息十分强烈。稳定患者呼吸频率,营造安神放松的听觉氛围,使其身心得到慰藉
4	主体分散 1	《雨的印记》	经典舒缓 (钢琴)	4 min 43 s	15 min 35 s	钢琴的重复旋律模仿雨点律动,利用规律性音符分散注意力,分散患者对伤口疼痛的关注点,造成一种“安静雨天”的心理图景,舒缓手术创伤引起的焦虑情绪
5	主体激活 1	《森林狂想曲》	自然融合 (音效+乐器)	4 min 32 s	20 min 07 s	鸟鸣流水加木吉他合奏,在鸟鸣流水中穿梭,用“生物声景疗法”激活大脑前额叶皮层,在轻松氛围里愉悦身心,使患者转出苏醒室时情绪愉快
6	主体放松 2 (重复)	《雪梦》	经典舒缓 (纯音乐)	4 min 53 s	25 min 00 s	立体自然声景人声安抚疼痛,分散注意力,自然激活听觉系统,加强放松的记忆点,保持长期处于低应激状态中
7	补充片段循环	《雨的印记》(舒缓片段)	经典舒缓 (钢琴节选)	3 min 30 s	28 min 30 s	截取前奏部分最舒缓的 3 min 作为循环点,运用规则重复的方法反复奏响同一旋律使听众可以暂时转移注意力,并能给后面自然声景的结束做过渡,利于新曲目的引入避免听感上的突然转变,保证了听觉连续性的表达效果
8	自然声景收尾	《海浪轻拍声》	环境音效	1 min 30 s	30 min 00 s	海浪轻拍沙滩声+30 s 海鸥叫声;低频声音(1~2Hz),与人体自主神经节律发生共振,使得听觉从内心平滑过渡到外部现实,从而减轻因音乐瞬间收尾而引起的“放松-唤醒”

表 3 康复锻炼时音乐曲目及播放顺序

顺序	环节	曲目	类型	时长	累计时长	选曲依据及干预目标
1	自然声景过渡	《晨光鸟鸣声》	环境音效 (唤醒类)	1 min 00 s	1 min 00 s	高频鸟鸣(8~10 kHz)用来模拟早晨自然环境的声 音,可激活人的听觉皮质、中枢神经,并传递出“新一 天康复开始”,达到一种积极的心理暗示作用,避免或 减少对康复训练产生畏难心理及抵触情绪
2	康复激活期	《安妮的仙境》	积极激励 (轻音乐)	3 min 30 s	4 min 30 s	激活运动皮层、提高肘关节屈伸训练时的动作协调 性、用节奏统合减少辅助代偿动作,建立“主动运动= 愉悦”的神经通路,适合从下床开始的各类轻微活动
3	康复引导期	《夜宴》	动态引导 (电子+传统 乐器)	4 min 53 s	9 min 23 s	复合节奏(电子音效+古筝/笛子)与肘关节被动活动 (CPM 机训练)频率(1.2~1.5 次/s),根据节拍引导 增加关节活动的规整性,帮助康复师精准掌握关节活 动的幅度和范围
4	康复间歇期	《River Flows in You》	现代舒缓 (钢琴弦乐)	4 min 18 s	13 min 41 s	缓解训练后出现的肌肉酸痛感,留出充足的静力性拉 伸的时间与体力以供下一次训练之用,符合中青年患 者群体所喜欢的现代风格音乐的形式
5	康复静息期	《风居住的街 道》	正念引导 (东西方融合)	4 min 37 s	18 min 18 s	采取引导静态拉伸(手臂肘关节伸直后尽可能地大于 90°,掌心向上或向下的静态拉伸)方式来提高筋膜的 延展度,增加对心理压力的耐受度
6	康复深度放松	《月光奏鸣曲》 (前半段)	深度放松 (古典钢琴)	3 min 50 s	22 min 08 s	可激活内源性镇痛通道,促进脑啡肽等内源性镇痛物 质分泌,缓解静息时疼痛
7	文化适配	《渔舟唱晚》(古 筝版后半段)	传统民乐 (古典独奏)	5 min 12 s	27 min 20 s	以模拟水流波动为主,符合偏好传统音乐的中老年群 体的文化趣味,满足患者听觉需求;用作附加曲目并 增加听力材料的丰富度;另外,又因为古筝声音清脆 响亮的特点具有减轻患者因关节僵硬带来的内心烦 躁的功效
8	收尾过渡	《神秘园之歌》 (舒缓段落)	冥想治愈 (提琴钢琴)	1 min 40 s	28 min 20 s	截取小提琴与钢琴合奏的前 1 min 40 s(最舒缓段 落),做自然声景的过渡,并且将重复的抒情旋律和映 射意识与回归、沉静内心的氛围相融合,强化“康复放 松”的条件反射
9	自然声景收尾	《细雨沙沙声》	环境音效 (安抚类)	1 min 00 s	30 min 00 s	1 min 轻柔细雨声(40~50 dB),强化“康复锻炼自然 放松”的闭环体验,避免突然停放音乐的失落感

表 4 音乐特征调节方法

项目	调节方法
节奏	如果脑电波显示大脑紧张(β 脑电波活跃),将速度放缓(比如原来的速度减慢 10%~20%)。如果脑电波显示 是放松的状态(主要是 α 脑电波),则保持乐曲原有的速度或略快一些(不要超过原速的 10%)
音调与音色	患者紧张时,在 App 上加大钢琴、大提琴等低频乐器的音色;放松时,可以在一些地方加少量竖琴等柔性的音 色,以丰富听觉层次
音量	初始音量 40~50 dB,若脑电波识别患者疲劳,将音量波动范围缩小(如控制在 ± 2 dB);若状态稳定,允许音量 有 $\pm (3\sim 5)$ dB 的自然波动,如远处的海浪轻轻地摇荡一样,更能给用户带来一种身临其境的感受
旋律	患者紧张或疲劳时,简化曲目旋律(例如把复杂的乐章改成单音循环或者简单乐句重复);相反当心情放松时 可以在原有的曲目上增添一些很短的节拍变化、过门或和弦等使其过于单一

1.3 评价方法 ①疼痛。由研究小组麻醉护士评估患者干预前和干预后的静止性疼痛、活动性疼痛程度,采用视觉模拟评分量表(VAS)评分,0 分(无痛)~10 分(剧痛)。静止性疼痛分别于术前(即干预前)和手术结束后患者拔除气管插管、并在复苏室 Steward 苏醒评分 ≥ 4 分(具备指令性动作+自主呼吸+循环稳定)时(即干预后)评估;活动性疼痛于术前(即干预前)和术后第 1 天康复锻炼时(即干预后)评估。干预前后活动性疼痛评估方法:护士让患者静息 5 min,再

引导患者缓慢匀速完成 1 次肘关节主动屈伸动作后让患者评估最疼痛时的评分。②术后 24 h 镇痛泵残余药量。该指标以手术结束时间(以麻醉记录单时间为准)开始计时至术后 24 h,由责任护士及麻醉护士共同查看并记录镇痛泵剩余药量。③早期康复锻炼顺利完成率。患者在康复锻炼中未因疼痛导致中途暂停的锻炼例数占总例数的比例。

1.4 统计学方法 采用 SPSS27.0 软件进行数据分析。对于服从正态分布的计量资料使用($\bar{x}\pm s$)描述,

采用方差分析进行比较,组间比较如有显著差异则进行 Least-Significant Difference(LSD)进行多重比较。计数资料使用频数、百分率描述,采用 χ^2 检验进行比较,如有显著差异则在 Bonferroni 校正后使用 χ^2 检验进行两两比较。检验水准 $\alpha=0.05,0.017$ 。

2 结果

2.1 三组干预前后疼痛评分比较 见表 5、表 6。

表 5 三组干预前后静止性疼痛评分比较 分, $\bar{x} \pm s$					
组别	例数	干预前	干预后	<i>t</i>	<i>P</i>
对照组	35	5.06±0.24	5.14±1.44	1.139	0.263
干预 1 组	35	5.03±0.25	4.82±1.44	3.174	0.003
干预 2 组	35	5.09±0.26	3.91±1.60	9.809	<0.001
<i>F</i>		0.013	6.378		
<i>P</i>		0.987	0.002		

注:干预后对照组与干预 1 组比较, $t=0.879,P=0.381$;与干预 2 组比较, $t=3.438,P<0.001$ 。干预 1 组与干预 2 组比较, $t=2.558,P=0.012$ 。

表 6 三组干预前后活动性疼痛评分比较 分, $\bar{x} \pm s$					
组别	例数	干预前	干预后	<i>t</i>	<i>P</i>
对照组	35	6.06±1.41	6.94±1.41	2.568	0.015
干预 1 组	35	6.14±1.44	6.20±1.41	0.164	0.870
干预 2 组	35	6.05±1.35	5.26±1.50	2.158	0.038
<i>F</i>		0.044	12.009		
<i>P</i>		0.957	<0.001		

注:干预后对照组与干预 1 组比较, $t=2.202,P=0.034$;与干预 2 组比较, $t=4.836,P<0.001$ 。干预 1 组与干预 2 组比较, $t=2.708,P=0.007$ 。

2.2 三组镇痛泵残余药量和早期锻炼完成率比较 见表 7。

表 7 三组镇痛泵残余药量和早期锻炼完成率比较			
组别	例数	镇痛泵残余药量 (mL, $\bar{x} \pm s$)	早期锻炼完成 [例(%)]
对照组	35	20.66±5.69	13(37.14)
干预 1 组	35	20.82±5.06	18(51.43)
干预 2 组	35	20.91±5.50	29(82.86)
统计量		$F=0.020$	$\chi^2=15.633$
<i>P</i>		0.980	<0.001

注:早期锻炼完成率两两比较,对照组与干预 1 组比较, $\chi^2=1.447,P=0.229$;与干预 2 组比较, $\chi^2=15.238,P<0.017$ 。干预 1 组与干预 2 组比较, $\chi^2=7.835,P=0.005$ 。

3 讨论

3.1 脑机接口技术联合音乐干预对术后疼痛的影响

本研究结果显示,干预后干预 2 组术后静止性疼痛评分、活动性疼痛评分以及早期康复锻炼完成率显著优于干预 1 组和对照组(均 $P<0.05$)。原因在于:首先,音乐可通过听觉皮层传递至皮质-丘脑回路诱导镇痛,其作用为抑制痛觉传递、提高痛阈,其效果受音乐体验影响,即音乐体验越好、对音乐越专注、情绪越积极,大脑的“奖赏系统”越活跃,越能释放内啡肽等

内源性阿片类物质^[14],而这均与音乐类型密切相关。音乐由旋律、节奏、和声变化构成了不同类型的曲目,可引起不同的听觉刺激^[15]。其中,患者偏好音乐能显著增加积极音乐体验^[16]。本研究中,干预 2 组可依据脑电信号的变化,利用机器算法,实时调整音乐元素,将干预 1 组固定的曲目特征变成最能契合患者偏好的音乐,从而提升音乐体验,最终更好发挥镇痛效应^[17]。其次,神经振荡机制认为, θ 波(4~7Hz)具有提升专注力、调整情绪作用,且可加强前额叶和边缘系统的连接(如杏仁核、伏隔核等),进而间接激活脑部的奖励回路^[18]。音乐传递至皮质-丘脑回路后,激活前额叶皮层,从而诱发 θ 波振荡。其中,慢节奏、自然音色、患者偏好音乐可使 θ 波振荡更活跃^[19]。干预 2 组调节后的音乐更符合 θ 波活跃的声学特征;此外干预 2 组可通过激活参与运动控制的大脑区,使运动皮层的 μ 波、 β 波规律波动,以此优化患者运动协调性,避免因运动不协调导致 μ 波、 β 波异常波动而使疼痛加剧(如中枢敏化)^[20]。最后,干预 2 组由脑机接口操作师和护士共同干预,不仅帮助患者掌握了疼痛应对方法,而且通过监测脑电信号调整音乐抑制杏仁核相关恐惧神经活动^[21],有助于重构患者对疼痛的主观认知感受,即从认为“疼痛是一种不可控的有害信号”转变为“疼痛是可以得到控制的”,有利于控制疼痛,从而提升早期康复锻炼完成率。

3.2 脑机接口技术联合音乐干预的重点及注意事项

①乐曲的选择应当遵循科学原理:古典音乐的旋律较为简单,节奏也比较规律,可提升注意力,自然声音可以促进身体的放松,减轻压力所带来的不良情绪,轻音乐的节奏舒缓,和声柔和,能让人心情愉悦^[16]。本研究所选用的音乐有上述这些特性,符合“疼痛门控理论”,即疼痛信号主要依赖脊髓水平的 A β 纤维、C 纤维向中枢传递,而合适的音乐可通过激活脊髓中传递触压觉的 A β 纤维,促使抑制性中间神经元兴奋,进而抑制 A β 、C 纤维介导的疼痛信号向中枢的传导^[22]。避免选择摇滚音乐,因为这类音乐的高强度节奏会干扰大脑节律,降低注意力水平,产生反镇痛效果;避免长期播放同一曲目,因为个体对同一曲目的偏好呈现抛物线型^[15],也就是在初次接触后先逐渐上升至峰值,随后逐渐减退,这会使大脑对音乐的敏感度随之发生变化。②干预时机:术后早期进行音乐干预可让大脑产生神经可塑性改变,激活负责情感反应的杏仁核以及主管记忆的海马体,使聆听者对音乐产生记忆,可使听觉皮层持续活动,产生持久的镇痛效果^[23]。术后复苏室属于疼痛管理的最早阶段,此时疼痛信号尚未完全累积,而术后 24 h 是急性疼痛的峰值期,又是康复锻炼的黄金期,以上这些阶段实施早期音乐干预,会达到事半功倍的镇痛效果。应注意的是,患者在复苏室达到干预标准后要立即进行干预,术后 24 h 干预时要保证环境安静舒适。③护

理要点:统一培训操作人员,保证全部通过考核;定期检查脑机接口头环及软件的运行效能;干预时,密切观察患者的生命体征、精神状态、脑电波变化以及康复锻炼情况,如有异常及时告知研究小组内医生进行处理。本研究使用的网络来源于内网地址,所有数据使用加密 U 盘储存。④异常处理:电极片移位导致 App 上脑电消失或线条凌乱,应立即清洁皮肤表面,更换电极片;如头带过紧,需在距离电极片一定距离处调整头带松紧;锻炼过程中如患者发生头晕,应取平卧位并监测生命体征直至症状缓解。

4 结论

本研究结果表明,脑机接口技术联合音乐干预对于 OEA 术后疼痛有着积极作用,可提高患者康复锻炼完成率。然而本研究存在一定局限性:其一,本研究因单中心、小样本量的特性致使普遍适用性欠佳,无法很好地体现出除本研究之外其他地域、不同年龄段以及身体状况各异的患者的实际成效;其二,受成本因素的制约,此次研究的干预时机仅限于早期康复锻炼的最佳起始时间,未观察这种护理模式对远期疼痛与康复效果的影响。未来的研究可开展多中心、大样本量试验,延长干预时间,并可扩展到不同类型手术来验证脑机接口技术联合音乐干预的镇痛效果。

参考文献:

[1] Sun Z Y, Cui H M, Liang J M, et al. Determining the effective timing of an open arthrolysis for post-traumatic elbow stiffness: a retrospective cohort study[J]. BMC Musculoskelet Disord, 2019, 20(122):1-9.

[2] 孙子洋. 肘关节僵硬新分型和功能评分的建立及远期松解疗效的探究[D]. 上海:上海交通大学, 2020.

[3] Cui H, Sun Z, Ruan J, et al. Effect of enhanced recovery after surgery (ERAS) pathway on the postoperative outcomes of elbow arthrolysis: a randomized controlled trial[J]. Int J Surg, 2019, 68(5):78-84.

[4] Sun Z, Luo G, Li J, et al. How effective is periarticular multimodal drug injection in open elbow arthrolysis? A prospective double-blind randomized controlled trial[J]. J Shoulder Elbow Surg, 2021, 30(4):884-893.

[5] Venkatesh S, Miranda E R, Braund E. SSVEP-based brain-computer interface for music using a low-density EEG system[J]. Assist Technol, 2023, 35(5):378-388.

[6] Karikari E, Koshechkin K A. Review on brain-computer interface technologies in healthcare[J]. Biophys Rev, 2023, 15(5):1351-1358.

[7] 许敏鹏, 王有良, 梅杰, 等. 非侵入式异步脑机接口技术研究综述[J]. 信号处理, 2023, 39(8):1386-1398.

[8] 梁天佳, 龙耀斌, 陆丽燕, 等. 绳带辅助本体感觉神经肌肉促进技术训练联合绳带辅助脑机接口训练对脑卒中

偏瘫上肢康复效果的随机对照试验[J]. 中国康复理论与实践, 2024, 30(8):972-978.

[9] Aurucci G V, Preatoni G, Damiani A, et al. Brain-computer interface to deliver individualized multisensory intervention for neuropathic pain[J]. Neurotherapeutics, 2023, 20(5):1316-1329.

[10] 田凯茜, 王子豪. 多脑协同的脑机接口在音乐治疗上的应用[J]. 技术与市场, 2019, 26(8):80-81.

[11] 王健, 刘丽, 朱雯燕, 等. 五音调神法对缺血性脑卒中后抑郁患者心理和睡眠的影响[J]. 护理学杂志, 2022, 37(6):46-49, 57.

[12] 史明春, 樊雪梅, 侯静静, 等. 中医适宜技术在产妇产后疼痛管理中的应用进展[J]. 护理学杂志, 2024, 39(12):20-24.

[13] 中国医师协会骨科医师分会 上肢创伤专业委员会, 中国研究型医院学会 关节外科专业委员会 肘关节外科研究学组. 肘关节僵硬诊断及治疗的专家共识[J]. 中华创伤骨科杂志, 2019, 21(9):737-742.

[14] Vuust P, Heggli O A, Friston K J, et al. Music in the brain[J]. Nat Rev Neurosci, 2022, 23(5):287-305.

[15] Chen W G, Iversen J R, Kao M H, et al. Music and brain circuitry: strategies for strengthening evidence-based research for music-based interventions[J]. J Neurosci, 2022, 42(45):8498-8507.

[16] Forrester N. Sounds of science: how music at work can fine-tune your research[J]. Nature, 2023, 616(7956):399-401.

[17] Hildt E. Affective brain-computer music interfaces: drivers and implications[J]. Front Hum Neurosci, 2021, 15:711407.

[18] Tseng K C. Electrophysiological correlation underlying the effects of music preference on the prefrontal cortex using a brain-computer interface[J]. Sensors (Basel), 2021, 21(6):2161-2172.

[19] Adamos D A, Laskaris N A, Micheloyannis S. Harnessing functional segregation across brain rhythms as a means to detect EEG oscillatory multiplexing during music listening[J]. J Neural Eng, 2018, 15(3):036012.

[20] Ulloa J L. The control of movements via motor gamma oscillations[J]. Front Hum Neurosci, 2022, 15:787157.

[21] 鲁萍萍. 人类恐惧习得和消退中杏仁核与内侧前额叶的 theta 活动表征[D]. 北京:中国科学院大学, 2022.

[22] Katz J, Rosenbloom B N. The golden anniversary of Melzack and Wall's gate control theory of pain: celebrating 50 years of pain research and management[J]. Pain Res Manag, 2015, 20(6):285-286.

[23] Thorp H H. Music and the mind[J]. Science, 2024, 383(6689):1271.

(本文编辑 钱媛)