

·临床研究·

## 基于人体皮肤电阻的不同音乐刺激下自主神经功能的变化\*

周翔<sup>1</sup> 汪琨<sup>1</sup> 董会娟<sup>1</sup> 汪后云<sup>1</sup> 谢明凤<sup>1</sup> 杨圣<sup>1,2</sup>

### 摘要

**目的:**探究不同音乐刺激下人体皮肤电阻的变化,并进一步得出交感神经对应变化的规律,从而分析自主神经功能的变化。

**方法:**选取20例受试对象,采用控制变量法对其进行分组实验,过程中分别给予不同风格、不同音色、不同响度的音乐刺激,并获取其皮肤电阻数据并利用MATLAB进行时频域分析。

**结果:**舒缓音乐刺激下,受试者的皮肤电阻均值增大17.14%,功率谱峰值增大16.50%;重金属音乐刺激下,受试者的皮肤电阻均值减小9.56%,功率谱峰值减小19.34%;同一首乐曲使用不同的乐器演奏,对皮肤电阻的影响不同,受试者在钢琴演奏乐曲的实验中在10—20min,皮肤电阻相较于0—10min便下降26.87%,而在吉他和小提琴演奏乐曲的实验中10—20min,皮肤电阻则是分别上升27.94%、39.61%;同一首乐曲使用不同响度播放,对皮肤电阻的影响也不相同,皮肤电阻的数值在70dB下出现最大变化为196.15k $\Omega$ ,变化率达15.66%。音乐刺激结束后,皮肤电阻的数据仍有持续变化。

**结论:**不同音乐对皮肤电阻的影响各异且具有滞后性,其本质是对交感神经的影响,因此音乐可以作为调控自主神经功能的一种手段。

**关键词** 音乐;皮肤电阻;功率谱;交感神经

**中图分类号:**R496 **文献标识码:**B **文章编号:**1001-1242(2023)-02-0216-06

音乐可以影响人的情绪,然而情绪的影响可以通过皮肤电阻来表征,目前,随着生活节奏的加快,人们的工作生活压力逐步增大。过度压力会导致人体自主神经系统功能异常,引起焦虑、抑郁、失眠等症状<sup>[1]</sup>。人体自主神经系统负责维持人体生理平衡,其分为交感神经系统和副交感神经系统,两大系统之间具有拮抗作用<sup>[2-4]</sup>。过度压力所引起的交感神经异常兴奋会抑制副交感神经的兴奋性,导致副交感神经主导的维护人体、静息休养等功能无法正常工作,长此以往,会引起人体神经系统调节功能紊乱,导致身体机能受损,危及生命<sup>[5-7]</sup>。因此,找到一种高效易行的自主神经功能的调控手段是十分必要的。研究发现,音乐可以起到压力缓解的作用,尤其是古典舒缓音乐<sup>[8-9]</sup>。同时,音乐可以抑制牙科手术中交感神经的兴奋性,对患者术后的焦虑起到缓解作用<sup>[10]</sup>。音乐还可以作为一种辅助治疗手段,缓解高血压、心绞痛、阿尔茨海默症等疾病患者的症状,减少痛苦<sup>[11-13]</sup>。并且,伴音乐骑自行车可以增长运动时间,提高运动效果<sup>[14]</sup>。由此可见,音乐对人体的疾病治疗和运动均有影响,但其影响的过程和作用的本质目前尚不明确,本研究便是由此出发,探寻

不同音乐对人体皮肤电阻的影响,从而分析音乐对交感神经的影响,并期望音乐可以用来调控自主神经功能。

### 1 资料与方法

#### 1.1 一般资料

音乐对人体自主神经功能的影响的研究最早可追溯到1880年,道吉尔证实音乐会影响血压和血液循环,加快心脏跳动和呼吸。自1960年起,大量科学家开展了不同音乐对自主神经功能影响的研究<sup>[15]</sup>。近代研究表明,兴奋的音乐可以降低副交感神经系统的活动,放松的音乐可以增加副交感神经系统的活动<sup>[16-17]</sup>。上述研究均是基于人体的心率变异性开展,但音乐对于自主神经的影响更直接反映在人体的交感神经系统,而交感神经直接影响人体汗腺的活动,汗腺的活动又直接反映在皮肤电或皮肤电阻上,并且皮肤电或皮肤电阻的测量方式还可以排除心律不齐等心脏疾病所引起的测量误差,因此采用皮肤电或皮肤电阻测量方法比心率变异性测量更具优势。例如Peretz Isabelle等<sup>[18]</sup>研究不同音乐片段对于人体皮肤电的影响,证明了音乐可以对皮肤电产生影

DOI:10.3969/j.issn.1001-1242.2023.02.013

\*基金项目:中国科学技术大学纵向预研项目(YZ2091600009)

1 中国科学技术大学,安徽省合肥市,230027; 2 通讯作者  
第一作者简介:周翔,男,硕士研究生; 收稿日期:2021-10-26

响。但是其研究中使用的音乐片段仅为7s,对自主神经功能的影响有限。随后,Chen-Gia Tsai等<sup>[19]</sup>延长了音乐的影响时间,将其增加为30s,其研究证明了音乐可以影响人体的交感神经系统。但其研究的音乐片段过多,且恢复时间较短,很难排除之前音乐的影响。在此基础上,提出假设:不同音乐对于人体皮肤电阻的影响不同,且影响具有滞后性。

### 1.2 实验方法

**1.2.1 实验对象:**20例志愿者参与此次实验,所有实验对象均为在校非音乐系学生,其中男生16例,女生4例。年龄在25—27岁之间,平均年龄26.3岁,他们没有神经、精神或听力方面的问题,每位参与者均提交知情同意书,并得到了中国科学技术大学道德伦理委员会的批准。被试对象的基本情况见表1。

**1.2.2 实验环境:**实验地点为中国科学技术大学精仪电子实验室,各项环境指标见表2。

**1.2.3 实验步骤与分组:**本次实验用于测试的音乐主要是:“canon in D major”(代表舒缓音乐)和“heavy metal universe”(代表重金属音乐)<sup>[20]</sup>。志愿者在穿戴好皮肤电阻检测设备,带好耳机后,开始试验。实验过程:①要求受试者静息10min;②进行音乐刺激10min;③休息30min。

实验开始前,先利用抽签将20例志愿者分为A、B两组,每组10例。每组实验都定在早上9:00开始,并要求受试者在实验开始前的24h内不得饮酒。

根据第二阶段的音乐刺激不同,实验分组见表3。

**1.2.4 实验数据获取与分析:**本实验所采用的皮肤电阻检测

设备为自主研发的皮肤电阻检测系统,其中包括硬件部分和软件数据处理部分。硬件部分通过运放电路采集人体的皮肤电阻数据并将其转化为电压,经过模拟滤波,将电压信号输入16位ADC,由其将模拟信号转化为数字信号,再将数字信号传输至PC端。软件数据处理部分主要是将硬件部分传输的数据进行存储并实时绘图来展示皮肤电阻的变化情况,方便观测者实时观测。并且,数据处理部分会将存储的数据导入MATLAB,利用其对数据进行时域和频域分析,并采用Origin工具软件绘图,方便观测。其中,皮肤电阻的频谱分析是将连续采集到的人体皮肤电阻阻值进行基于FFT的经典谱估计或者基于回归模型法的现代谱估计,获得的功率谱作为评价皮肤电阻频率能量分布的定量指标。

## 2 结果

本研究通过多组实验给予被试者不同音乐的刺激,并观察其皮肤电阻的变化情况,旨在探寻音乐对皮肤电阻的影响,从而分析音乐对交感神经的影响,进而去判定音乐是否可以作为自主神经功能的调控手段。

### 2.1 实验一各阶段皮肤电阻均值

图1是实验一中10例志愿者在实验各个阶段的皮肤电阻均值所绘制而成的带散点柱状图。从图中可以看出,相较于静息阶段,舒缓音乐(小提琴版“Canon in D Major”)刺激及之后的0—20min,皮肤电阻的均值上升,相较于静息阶段上升17.15%,音乐刺激后的20—30min下降。

### 2.2 实验二各阶段皮肤电阻均值

图2是实验二中10例志愿者在实验各个阶段的皮肤电阻均值所绘制而成的带散点柱状图。从图中可以明显看出,相较于静息阶段,重金属音乐(heavy metal universe)刺激及之

表1 被试对象情况 (n=20)

项目	平均值±标准差
年龄(岁)	26.3±2.78
身高(cm)	167.9±8.35
体重(kg)	60.9±13.96
体质指数	21.33±3.07

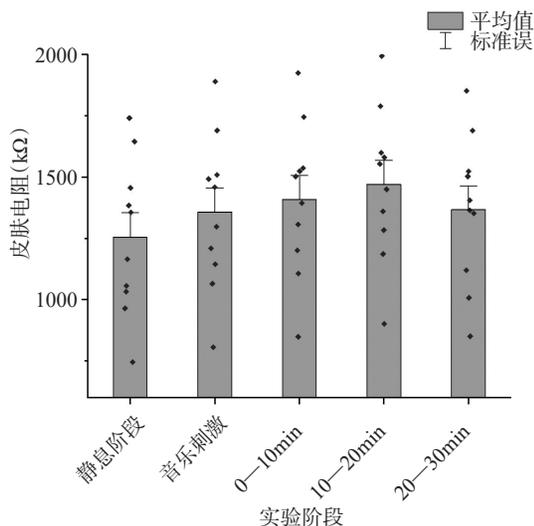
表2 环境参数

环境指标	数值
温度(°C)	24—28
湿度(%)	45—65
PM2.5浓度(μg/m <sup>3</sup> )	29—31
甲醛含量(mg/m <sup>3</sup> )	0.017—0.02
CO <sub>2</sub> 含量(ppm)	500—525
TVOC含量(mg/m <sup>3</sup> )	<0.001
环境噪音(dB)	40

表3 实验步骤与分组情况

实验组别	实验变量		实验参与者
	乐曲	响度(dB)	
实验一	小提琴版“Canon in D Major”	70	A组10例志愿者
实验二	“Heavy Metal Universe”	70	B组10例志愿者
实验三	钢琴版“Canon in D Major”	70	A组10例志愿者
实验四	吉他版“Canon in D Major”	70	A组10例志愿者
实验五	“Heavy Metal Universe”	60	B组10例志愿者
实验六	“Heavy Metal Universe”	50	B组10例志愿者

图1 实验一(舒缓音乐刺激下)各阶段皮肤电阻均值



后的0—10min,皮肤电阻的均值在下降,相较于静息阶段下降9.56%,10—20min出现明显上升,20—30min发生下降。

### 2.3 音乐刺激阶段功率谱

选取某位志愿者在音乐刺激阶段的皮肤电阻数据,结合Welch加窗平均法和小波变换对其进行频域分析,获得如下频域图像,见图3。

通过随机选取实验一、实验二中各三位志愿者的皮肤电阻数据进行功率谱分析,可以得到不同峰值的功率谱图,但其峰值所对应的横坐标基本与图3一致。功率谱的峰值表示能量的大小,峰值越高则表明能量越大,代表其在总能量中的占比越大,因此选取最高峰,即3.6Hz附近的谱线的峰值(以下简称功率谱峰值),对其进行分析便可以直观反映音乐对皮肤电阻在频谱的影响情况。

### 2.4 实验一中三例志愿者的功率谱峰值

图4是实验一中随机选取的3例志愿者在各个阶段皮肤电阻的功率谱峰值所绘制而成的3D柱状图。从图中可以看

图2 实验二(重金属音乐刺激下)各阶段皮肤电阻均值

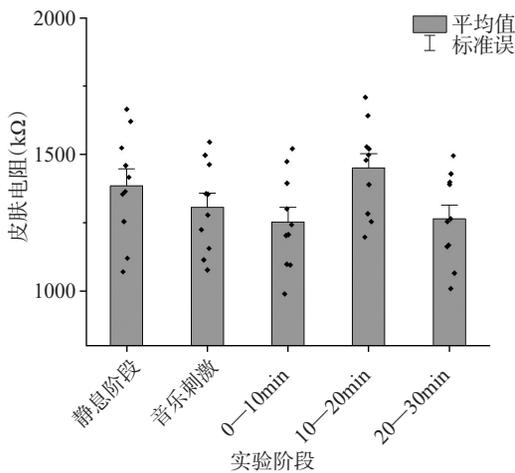
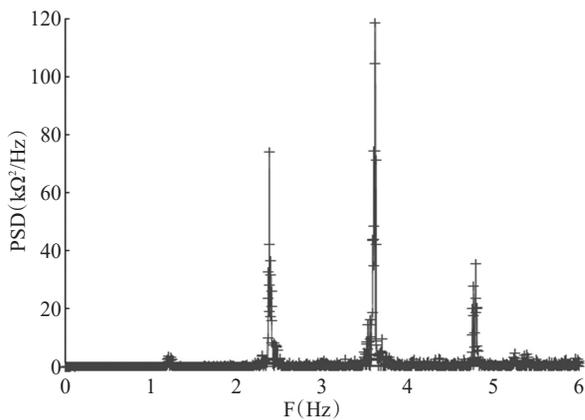


图3 某位志愿者音乐刺激阶段的功率谱



出,相较于静息阶段,舒缓音乐(小提琴版“Canon in D Major”)刺激及之后的0—10min,功率谱峰值上升16.50%,音乐刺激后的10—30min下降。

### 2.5 实验二中三例志愿者的功率谱峰值

图5是实验二中随机选取的三例志愿者在各个阶段皮肤电阻的功率谱峰值所绘制而成的3D柱状图。从图中可以看出,相较于静息阶段,重金属音乐刺激及之后的0—10min,功率谱峰值下降19.34%,10—20min上升,20—30min下降。

### 2.6 不同乐器下皮肤电阻的均值变化情况

图6是A组10例志愿者在实验一、实验三、实验四中各个阶段的皮肤电阻均值所绘制而成的柱状图,为了方便观察和对比,将静息阶段的皮肤电阻设为基准。从图中可以看出,舒缓音乐刺激及之后的0—10min,皮肤电阻均值在上升,音乐刺激后的10—20min,只有实验三(钢琴版“Canon in D Major”)所对应的皮肤电阻相较于0—10min下降

图4 实验一中3例志愿者的功率谱峰值

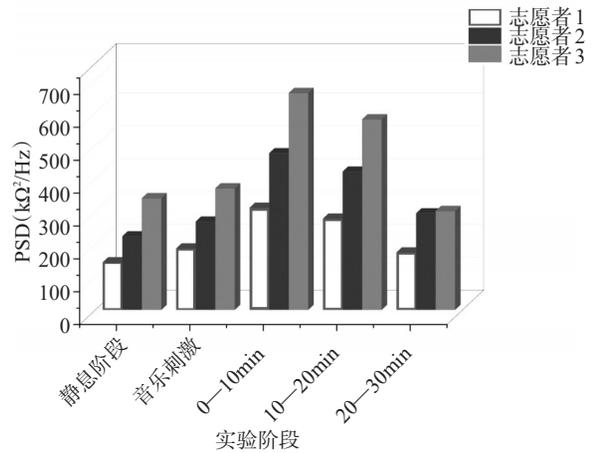
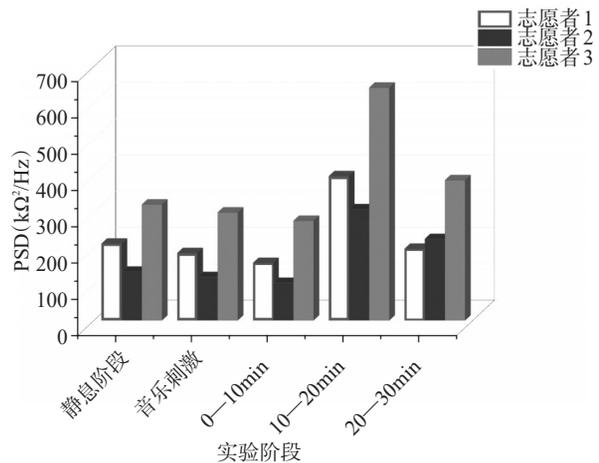


图5 实验二中3例志愿者的功率谱峰值



26.87%,其他两种乐器对应的皮肤电阻分别上升27.94%(吉他)、39.61%(小提琴),随后在20—30min均发生下降。

### 2.7 不同响度下皮肤电阻的均值变化情况

图7是B组10例志愿者在实验二、实验五、实验六中各个阶段的皮肤电阻均值所绘制而成的柱状图,为了方便观察和对比,将静息阶段的皮肤电阻设为基准。从图中可以看出,随着响度的增加,重金属音乐刺激所引起的皮肤电阻变化越来越剧烈,皮肤电阻的数值最大变化达196.15kΩ,变化率达15.66%。

### 3 讨论

早在1888年,C. Féré和A.d Arsonvol合作制作了一个测量皮肤电反应的仪器,发现外界刺激可以引起皮肤电阻的变化<sup>[21]</sup>。1966年,Martin和Venable提出假说:皮肤电阻主要取决于汗腺的活动情况,汗腺的活动受到交感神经的支配。

1980年,我国现代生理心理学家汪敬熙博士试验时发现切除交感节或麻醉外周神经后皮肤电阻变化消失,该现象证明了皮肤电阻变化受到交感神经调节<sup>[22]</sup>。

从实验结果中可以看出,音乐的确可以对人体的皮肤电阻产生影响,并且通过皮肤电阻数据的时域、频域处理,可以分析交感神经的活跃性,由此便可评估人体自主神经功能。自主神经作为人体神经系统的一部分,承担着调控人体生理状态的重要作用。自主神经功能的紊乱会使人体出现很多生理心理问题,严重会导致人体出现生命危险。因此,找寻一种可以调节自主神经功能的方法可以帮助人体减少焦虑,保护人体健康,并做到疾病早发现早治疗。

从实验一得出的结果中可以看出舒缓音乐会使得皮肤电阻的均值上升,其原因可能是舒缓音乐使人体交感神经的活跃性受到了抑制,因此人体处在一个放松自在的状态。Nakamura等<sup>[23]</sup>的研究表明舒缓音乐刺激会诱导机体产生组胺等化学物质并结合组胺H3受体来抑制交感神经的兴奋性,由此便解释了音乐刺激后皮肤电阻的持续变化正是来自此类化学物质的影响。随着化学物质的逐步分解,交感神经的活跃性提高,从而使得皮肤电阻下降,但整体的皮肤电阻仍高于静息阶段,这说明舒缓音乐的刺激可以让人体长时间保持放松状态,有研究表明,长期听舒缓音乐,会对心血管具有积极影响<sup>[24]</sup>。由此可以得出:舒缓音乐可以抑制交感神经的兴奋性,使人体更加放松,并且长期听舒缓音乐可以对心血管有积极影响。

从实验二的结果中可以看出重金属音乐会使得皮肤电阻的均值下降,其可能的原因是重金属音乐的刺激提高了交感神经的兴奋性,早前有研究表明重金属音乐刺激会使人体的皮质醇、去甲肾上腺素等激素水平提高<sup>[25-26]</sup>,由此可认为重金属音乐通过影响人体内部激素水平的变化,使人体交感神经的活动性迅速增加,从而影响了人体的自主神经功能,让人体处在兴奋状态。音乐刺激后皮肤电阻均值明显升高,可能是由于此时副交感神经的活跃性快速增强,但其变化存在一定的滞后性,由此可以认为此状态副交感神经占主导作用。随后,交感神经系统和副交感神经系统逐步恢复平衡状态,人体也逐步恢复到自然状态。由此可以得出:重金属音乐可以使人体交感神经的活跃性增加,使人体更加兴奋。

皮肤电阻频域图中功率谱峰值的变化表明音乐刺激在交感神经的各种影响因素中是否占据主导作用,当舒缓音乐刺激时,功率谱峰值变高,可以认为是在此情况下,舒缓音乐的刺激占主导作用,进而抑制了其他因素对交感神经的影响,从而减少了交感神经的兴奋性,其特征为皮肤电阻均值上升;当重金属音乐刺激时,功率谱峰值变低,表明重金属音乐的刺激激发了更多的因素对交感神经的影响,从而加强了交感神经的兴奋性,表现在时域上则是皮肤电阻均值下降。

图6 不同乐器下皮肤电阻的均值变化情况

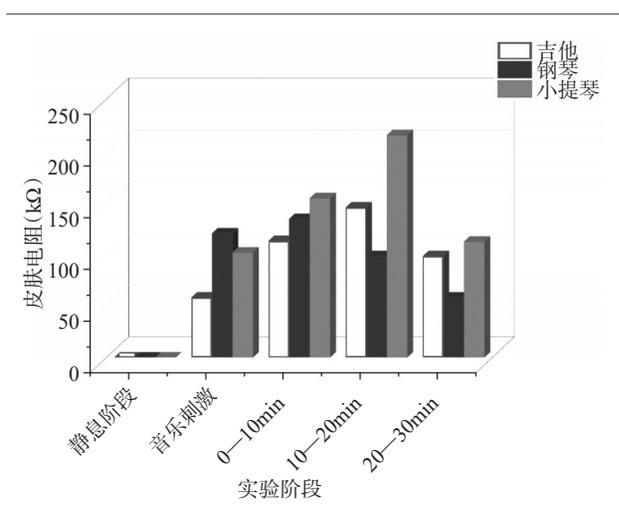
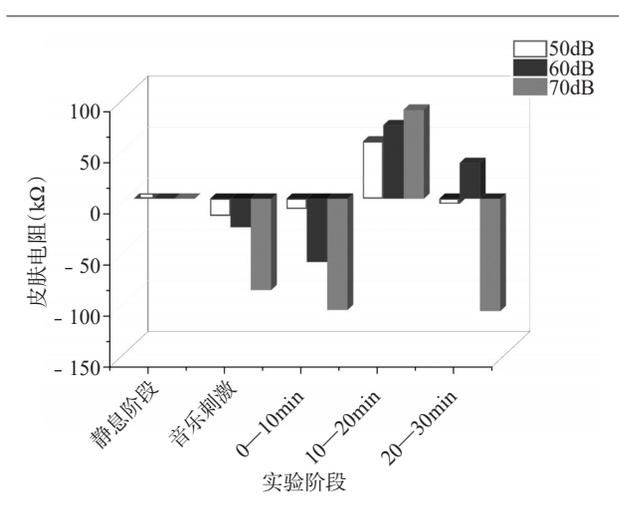


图7 不同响度下皮肤电阻的均值变化情况



从图6中可以看出,不同乐器演奏的相同音乐对人体皮肤电阻的影响不尽相同,其可能的原因是不同乐器的不同音色对交感神经的影响不同。结果表明,钢琴相较于小提琴和吉他,其对交感神经影响的持续时间较短,可能是钢琴所对应的音色更为轻快,让人体的交感神经在抑制后会更快地恢复到活跃状态,因此在10—20min交感神经重新活跃,使得皮肤电阻在此阶段下降,而小提琴和吉他对交感神经的抑制时间更长,因此在20—30min时,交感神经重新活跃,皮肤电阻发生下降。由此可以得出:不同音色的音乐对交感神经的影响不同,钢琴的影响时间相对较短。

从图7可以看出,不同响度的音乐对人体皮肤电阻的影响不同,其可能的原因是不同的响度对人体交感神经的影响不同。实验结果表明,音乐刺激的响度和音乐对交感神经的影响具有正相关,当音乐的响度逐步增大时,对交感神经的影响逐步增强,这体现在皮肤电阻的数值变化更加剧烈。由此可以得出:响度和音乐对交感神经的影响呈正向关。

本研究不足之处:本研究的实验对象中包含男性和女性,有研究表明,静息状态下男性的皮肤电阻阻值平均高于女性,本研究中性别及性别比例的因素可能会对实验结果产生一定的影响。在本研究中主要观察人体皮肤电阻在一定刺激下的变化情况,皮肤电阻在静息状态下的阻值并不是关注的重点,但性别因素确实会对皮肤电阻产生影响,后续将继续增加样本量,进一步研究性别等因素对皮肤电阻实验所产生的影响。

综上所述,不同风格、不同音色、不同响度的音乐对皮肤电阻的影响都不相同,其本质是音乐刺激对交感神经的影响。舒缓音乐可以抑制交感神经的兴奋性,使人体更加放松,重金属音乐增强了交感神经的兴奋性,使人体更加兴奋。不同音色的音乐对交感神经的影响不同,因而在皮肤电阻上会有不同的表征。音乐刺激的响度和音乐对交感神经的影响具有正相关性,响度越大,影响越大,其表征为皮肤电阻的变化越剧烈。研究还表明,音乐对于人体的影响具有滞后性,长期听舒缓音乐对人体有益。因此,得出结论:不同音乐对皮肤电阻的影响不同,且影响具有滞后性,同时音乐的确可以作为调控自主神经功能的一种手段。

#### 参考文献

[1] 董会娟. WiFi物联网+皮肤电阻检测及其在交感神经功能评估中的应用[D]. 中国科学技术大学, 2020.  
[2] 唐银佩. 调肝理脾方治疗胃食管反流病患者的临床疗效观察及其心理和生活质量影响的研究 [D]; 北京中医药大学, 2018.  
[3] 宋巧武. 液化石油气对作业工人白细胞吞噬、自主神经和神经行为功能影响的研究[D]. 浙江大学, 2007.  
[4] 朱可宁. 基于HRV的高速公路隧道环境对驾驶行为影响研究 [D]. 长安大学, 2018.

[5] 周秀娟. 飞腾八法结合常规针刺治疗原发性失眠的临床疗效观察[D]. 成都中医药大学, 2016.  
[6] Arias JA, Williams C, Raghvani R, et al. The neuroscience of sadness: A multidisciplinary synthesis and collaborative review [J]. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 2020, 111: 199—228.  
[7] Marafioti V, Benfari G. Takotsubo syndrome: a neurocardiac syndrome inside the autonomic nervous system [J]. *Heart Failure Reviews*, 2019, 24(2): 227.  
[8] Burns JL, Elise L, Brooke A, et al. The effects of different types of music on perceived and physiological measures of stress [J]. *Journal of Music Therapy*, 2002(2)2.  
[9] Labbe E, Schmidt N, Babin J, et al. Coping with stress: The effectiveness of different types of music[J]. *Applied Psychophysiology and Biofeedback*, 2007, 32(3—4): 163—168.  
[10] Yamashita K, Kibe T, Ohno S, et al. The effects of music listening during extraction of the impacted mandibular third molar on the autonomic nervous system and psychological state [J]. *Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, 2019, 77(6): 1153.e1—e8.  
[11] Kunikullaya KU, Goturu J, Muradi V, et al. Music versus lifestyle on the autonomic nervous system of prehypertensives and hypertensives- a randomized control trial [J]. *Complementary Therapies in Medicine*, 2015, 23 (5) : 733—740.  
[12] Mitrovic P, Paladin A, Radovanovic M, et al. Music therapy in patients with hypertension and early post-infarction angina: 17-year experience of the music study [J]. *Journal of the American College of Cardiology*, 2020, 75(11, Supplement 2): 15.  
[13] Peck KJ, Girard TA, Russo FA, et al. Music and memory in Alzheimer's disease and the potential underlying mechanisms [J]. *Journal of Alzheimer's Disease*, 2016, 51(4): 949—959.  
[14] Lin HT, Tseng KL, Liu BY. Effect of music in cardiopulmonary system and heart rate variability during cycling [J]. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 2010, 42 (5): 558.  
[15] 解鸿雁, 王健英, 魏育林. 不同音乐作用下人的自主神经生理反应的研究:中国音乐治疗学会二十周年会庆暨第九届学术年会[C]. 中国湖北武汉, 2009.  
[16] Iwanaga M, Kobayashi A, Kawasaki C. Heart rate variability with repetitive exposure to music [J]. *Biological Psychology*, 2005, 70(1): 61—66.  
[17] Zhou P, Sui FF, Zhang AQ, et al. Music therapy on heart rate variability; 2010 3rd International Conference on Biomedical Engineering and Informatics (BMEI 2010)[C]. Yantai PRC, 2010.  
[18] Khalfa S, Isabelle P, Jean-Pierre B, et al. Event-related skin conductance responses to musical emotions in humans [J]. *Neuroscience Letters*, 2002, 328(2): 145—149.  
[19] Tsai CG, Yang CM, Chen CC, et al. Relaxation and execu-

- utive control processes in listeners: an exploratory study of music-induced transient suppression of skin conductance responses [J]. *Empirical Studies of the Arts*, 2015, 33(2): 125—143.
- [20] Ferreira LL, Vanderlei LCM, Guida HL, et al. Response of cardiac autonomic modulation after a single exposure to musical auditory stimulation [J]. *Noise & Health*, 2015, 17(75): 108—115.
- [21] 张旭. 皮肤电信号在社交焦虑情感识别中的应用研究[D]. 西南大学, 2016.
- [22] GarguilO JJ, Martinez S, Cherkaoui M. Medical device interoperability a standards-based testing approach [J]. *Biomedical Instrumentation & Technology*, 2011, 45(3): 249.
- [23] Nakamura T, Tanida M, Nijima A, et al. Auditory stimulation affects renal sympathetic nerve activity and blood pressure in rats [J]. *Neuroscience Letters*, 2007, 416(2): 107—112.
- [24] Bernardi L, Porta C, Casucci G, et al. Dynamic interactions between musical, cardiovascular, and cerebral rhythms in humans[J]. *Circulation*,2009,119(25):3171—3180.
- [25] Nater UM, Abbruzzese E, Krebs M, et al. Sex differences in emotional and psychophysiological responses to musical stimuli [J]. *International Journal of Psychophysiology*, 2006, 62(2): 300—308.
- [26] Nilsson U, Unosson M, Rawal N. Stress reduction and analgesia in patients exposed to calming music postoperatively: a randomized controlled trial [J]. *Eur J Anaesthesiol*, 2005, 22(2): 96—102.

## (上接第211页)

- 脑卒中患者下肢运动功能的影响[J]. *中国康复医学杂志*, 2021, 36(5):597—599.
- [18] Zheng Y, Mao M, Cao Y, et al. Contralaterally controlled functional electrical stimulation improves wrist dorsiflexion and upper limb function in patients with early-phase stroke: A randomized controlled trial[J]. *J Rehabil Med*, 2019, 51(2):103—108.
- [19] Brzosko Z, Mierau SB, Paulsen O. Neuromodulation of spike-timing-dependent plasticity: past, present, and future[J]. *Neuron*, 2019, 103(4):563—581.
- [20] Knutson JS, Gunzler DD, Wilson RD, et al. Contralaterally controlled functional electrical stimulation improves hand dexterity in chronic hemiparesis: a randomized trial[J]. *Stroke*, 2016, 47(10):2596—2602.
- [21] Wu J, Cheng H, Zhang J, et al. The modulatory effects of bilateral arm training (BAT) on the brain in stroke patients: a systematic review[J]. *Neurol Sci*, 2021, 42(2): 501—511.
- [22] Lee D, Lee G, Jeong J. Mirror therapy with neuromuscular electrical stimulation for improving motor function of stroke survivors: A pilot randomized clinical study[J]. *Technol Health Care*, 2016, 24(4):503—511.
- [23] Khallaf ME. Effect of gravity and task specific training of elbow extensors on upper extremity function after stroke[J]. *Neurol Res Int*, 2018, 2018:4172454.
- [24] 刘浩, 贾延兵, 王旭豪, 等. 周围神经电刺激对脑卒中患者运动皮质兴奋性的影响[J]. *中国康复医学杂志*, 2016, 31(8):878—883.
- [25] Zheng Y, Hu X. Elicited finger and wrist extension through transcutaneous radial nerve stimulation[J]. *Ieee T Neur Sys Reh*, 2019, 27(9):1875—1882.
- [26] Knutson JS, Makowski NS, Harley MY, et al. Adding contralaterally controlled electrical stimulation of the triceps to contralaterally controlled functional electrical stimulation of the finger extensors reduces upper limb impairment and improves reachable workspace but not dexterity: a randomized controlled trial[J]. *Am J Phys Med Rehab*, 2020, 99(6):514—521.
- [27] Platz T, Pinkowski C, van Wijck F, et al. Reliability and validity of arm function assessment with standardized guidelines for the Fugl-Meyer Test, Action Research Arm Test and Box and Block Test: a multicentre study[J]. *Clin Rehabil*, 2005, 19(4):404—411.
- [28] Betti S, Zani G, Guerra S, et al. Reach-to-grasp movements: A multimodal techniques study[J]. *Front Psychol*, 2018, 9:990.