

# 前庭电刺激在脑卒中患者康复治疗中的研究进展\*

陈利薇<sup>1</sup> 董晓阳<sup>1</sup> 汤运梁<sup>1</sup> 王 璐<sup>1</sup> 冯 珍<sup>1,2</sup>

脑卒中(stroke)是一类具有发病率高、复发率高、致残率高、死亡率高五大特点的脑血管疾病<sup>[1]</sup>。美国心脏协会(American Heart Association, AHA)报道称<sup>[2]</sup>,在美国每年大约有700万人患脑卒中,总体患病率约为2.5%—3.7%,医疗耗费高达280亿美元。我国流行病学资料显示<sup>[3]</sup>,脑卒中在≥40岁人群中患病数高达1242万,且是农村居民致残和致死的首要病因。据报道,约有75%的脑卒中幸存者合并有不同程度的平衡、运动及记忆等方面的功能障碍<sup>[4]</sup>。然而,目前针对脑卒中后的传统康复治疗技术作用有限。前庭电刺激(galvanic vestibular stimulation, GVS)是一种低成本、简单、安全、无创的新兴治疗技术,现已用于焦虑症、眩晕症、外周性及中枢性前庭疾病的功能恢复与症状改善。近年来GVS也被应用于脑卒中后的功能康复,但此治疗技术在我国临床应用起步较晚,专业程度欠佳,缺乏循证支持,遂需要我们的进一步探索,本文就将GVS在脑卒中患者康复治疗中的应用及其可能机制综述如下。

## 1 前庭电刺激概述

1790年,Volta A<sup>[5]</sup>首次描述了将带电电极置入耳朵中会产生强烈的眩晕感,这可能是由于前庭系统受到电流刺激所导致的。Cohen B等<sup>[6]</sup>发现了对前庭神经的单个分支进行电刺激,可诱发动物产生特定方向的眼球运动,这是GVS领域发展史上的一个重要里程碑。随后,Day BL等<sup>[7]</sup>率先提出了GVS技术有助于机体保持身体平衡,是一种治疗前庭系统疾病的有效方法。近几年,随着相关领域的临床工作及科研的不断深入,GVS被逐渐应用于神经退行性疾病<sup>[8]</sup>、血管性痴呆<sup>[9]</sup>、焦虑症<sup>[10]</sup>、脊髓损伤<sup>[11]</sup>等疾病的治疗。1999年,Rorsman I等<sup>[12]</sup>首次报道GVS可改善脑卒中患者的单侧空间忽视,揭开了GVS在脑卒中后康复研究中的序幕。

GVS是基于经颅直流电刺激(transcranial direct current stimulation, tDCS)开发出的一种新的刺激模式,通过放置在耳后乳突上的电极来施加低电流,从而激活前庭传入神经和前庭末端器官<sup>[13]</sup>。GVS设备包括两个不同极性的电极

片、一个供电装置和一个输出装置。电极片置于双耳后乳突处,极性选择有双侧双极、双侧单极、单侧单极三种形式。研究表明,阴极刺激会特异性的激活前庭传入纤维,特别是不规则、自发放电的神经纤维,而阳极刺激会抑制前庭信号的传入。因此,当在正常人体安静状态下施加双极GVS,产生的刺激净效应是身体姿势转向阳极侧<sup>[14]</sup>。

## 2 前庭电刺激在脑卒中后康复治疗的应用

### 2.1 平衡功能障碍

平衡功能障碍是脑卒中患者常见的并发症,约有86%的卒中后幸存者伴有不同程度的平衡障碍<sup>[15]</sup>,导致患者出现行走速度减慢,姿势不对称加重,步态不稳等问题,严重损害其日常生活能力。而维持人体平衡需要三个环节参与:本体感觉、前庭觉以及视觉的信息输入,中枢神经系统的信息整合,骨骼肌和核心肌群控制运动。有学者采用动态姿势平衡仪对40例卒中后偏瘫患者进行测试,结果显示前庭觉在3种感觉分析中得分最低,说明脑卒中偏瘫患者处理前庭觉信息的能力受损最为明显<sup>[16]</sup>,而前庭觉对维持平衡具有至关重要的作用。因此,在改善脑卒中患者平衡障碍问题上应当重视前庭功能的恢复,GVS恰恰可以通过电流激活因脑卒中损伤后残余的前庭功能,进而促进患者平衡的恢复。

在测力台上,脑卒中患者表现为肢体压力中心(center of pressure, COP)偏向健侧且摇摆增加的姿势特征,摆动轨迹的速度和长度是COP的量化参数,当COP参数降低说明人体对姿势的控制能力获得了增强<sup>[17]</sup>。Inukai Y等<sup>[18]</sup>将26名健康参与者随机分为假刺激组和随机波动电流前庭刺激组(nGVS),结果显示nGVS组在刺激期间及刺激后,摇摆轨迹长度、前后平均速度、内测平均速度与基线相比均减少,而假刺激组的COP参数无显著性改变,这为GVS可以通过增强脑卒中患者控制姿势的能力促进平衡的恢复提供了证据支持。Bonan IV等<sup>[19]</sup>验证了这一观点,将GVS和视动刺激分别应用于脑卒中患者,刺激期间的COP平均位置与静止时平均位置的差值绝对值作为COP位移参数,结果发现

DOI:10.3969/j.issn.1001-1242.2023.03.021

\*基金项目:国家自然科学基金项目(81860409);江西省教育厅青年项目(GJJ190125);江西省卫生健康委员会科技计划项目(20204202);江西省中医药管理局科技计划项目(2019A117)

1 南昌大学第一附属医院康复医学科,南昌市,330006;2 通讯作者  
第一作者简介:陈利薇,女,硕士研究生;收稿日期:2020-08-02

GVS与视觉刺激两者之间存在正相关,且无论是左半球还是右半球病变的卒中患者,刺激后其体位不对称均明显减轻,右侧病变患者的COP位移变化大约是左侧病变患者的2倍,说明GVS用于改善右半球病变患者平衡障碍的效果更佳。

除此之外,Babyar S等<sup>[20]</sup>对10名伯克侧倾量表(Burke lateropulsion scale, BLS)评分 $\geq 2$ 分的缺血性脑卒中患者进行研究,每个患者给予GVS、tDCS及假刺激三种治疗方案,结果显示tDCS和GVS治疗后患者的坐位触觉压力中心(COP-X)内侧速度均增加,与假刺激组相比,GVS治疗15min后胸侧倾斜有显著改善,进一步表明GVS对改善脑卒中后姿势障碍发挥着潜在的作用。对于GVS在改善姿势不对称时是否具有持续效应这一问题,有学者发现<sup>[17]</sup>,nGVS刺激后30min和1h时参与者的路径长度和摇摆速度均有显著改善,但nGVS刺激组和假刺激组之间不具有显著差异,无法确定GVS刺激后姿势的改善是因为持续效应还是学习效应。因此,上述研究表明GVS可以促进脑卒中患者平衡功能恢复的事实,但其是否具有存在长期效应有待进一步验证研究。

## 2.2 单侧空间忽略

单侧空间忽视(unilateral spatial neglect, USN)是指患者对病灶对侧(常为左侧)的刺激无反应或反应变慢,是脑卒中急性期最常见的认知障碍之一,发病率高达82%。虽然部分患者后期可自行恢复,但仍有1/3患者会发展成永久后遗症,这将严重限制患者的其他功能恢复<sup>[21]</sup>。目前针对单侧忽略的常见康复治疗方法包括棱镜适应、镜像疗法、前庭康复、rTMS等<sup>[22]</sup>。近几年,国外有部分学者致力于GVS在单侧忽略中的研究。Christophe<sup>[23]</sup>的综述中描述了GVS对脑卒中患者单侧空间忽略具有改善作用。Wilkinson等<sup>[24]</sup>将52例脑卒中后左侧空间忽略患者按照随机双盲原则分为3组,每组参与者分别接受1次、5次、10次的重复右阴极/左阳极(R-GVS)治疗,在治疗前一天和治疗末天使用Barthel指数和行为注意力测试(BIT)进行评估,结果显示3组患者的BIT评分均有提高,BI增加了20%,且1个月后效果仍在,说明重复GVS可以改善卒中患者的单侧忽视。

Zubko O等<sup>[25]</sup>对2例确诊为卒中后单侧忽略患者进行了5d R-GVS治疗,分别于刺激3d前、第1d、第5d、3d后通过字母和星星删除任务来评估患者忽略症状的程度,评估后显示2名参与者单侧忽略症状得到了改善,且3d后随访时仍有效。GVS对单侧忽略的改善程度可能取决于电极的极性、施加时间、电流强度等因素。一例单盲、对照交叉试验研究显示,7例右半球卒中伴有左侧空间忽略患者按照随机顺序分别接受R-GVS、左阴极/右阳极GVS(L-GVS)和假刺激三种刺激,刺激后10min和20min进行评估疗效,结果显示L-GVS刺激20min对改善单侧忽略效果最佳<sup>[26]</sup>。然而目前尚无GVS与其他方法治疗单侧忽略的对比研究,其疗效能否优于

其他康复方法有待进一步探索。

## 2.3 倾斜综合征

倾斜综合征(pusher syndrome,以下称pusher综合征)是脑卒中后表现出的一种特殊姿势障碍。在任何体位时,此类患者身体都强有力的向偏瘫侧倾斜,并抵制一切纠正其姿势的被动运动<sup>[27]</sup>。脑卒中患者pusher综合征的发生率约为10%—15%<sup>[28]</sup>,在发病的6个月内通常可自行消失,但常导致患者跌倒风险增高,康复效率降低。目前针对改善pusher综合征主要的康复治疗手段有注意力训练、视觉反馈训练、躯干肌训练等<sup>[29]</sup>。近年来,将GVS用于改善脑卒中后的pusher综合征成为研究者关注的热点之一。Krewer C等<sup>[30]</sup>研究表明单次GVS可以改善pusher综合征,但效果并不显著。2014年一项ABAB单案例研究设计显示,对合并有pusher综合征的脑卒中患者给予重复GVS联合物理治疗,采用BLS和对侧倾斜量表(SCP)进行评估,结果显示患者的BLS和SCP评分有明显改善,说明GVS结合物理治疗对改善pusher综合征有积极作用<sup>[28]</sup>。Oppenländer K等<sup>[31]</sup>将24例亚急性、单侧右半球卒中患者按照主观视觉垂直(subjective visual vertical, SVV)和主观触觉垂直(subjective tactile vertical, STV)有无受损分为正常组和受损组,两组患者在三天内每天接受不同的刺激模式:假刺激、R-GVS、L-GVS,平均刺激电流强度为0.7mA,持续20min,结果显示给予左阴极GVS时患者SVV的各项参数显著降低,STV的恒定误差和范围在数值上也有所减少。而多数观点认为脑卒中患者出现pusher综合征是因为患者SVV和/或STV的偏移所致<sup>[29]</sup>,因此SVV和STV得到改善提示GVS可以促进脑卒中患者pusher综合征的恢复。

## 2.4 记忆障碍

记忆障碍是脑卒中患者最常见的认知功能障碍之一,约占45.4%<sup>[32]</sup>。记忆功能一旦受损,将导致患者的康复进程及自主行为能力恢复严重受限。目前针对记忆障碍的康复干预手段主要以功能恢复训练,远程认知康复,虚拟现实技术,电针为主。此外,有学者尝试将GVS运用于脑卒中后记忆障碍的治疗研究中。Wilkinson D等<sup>[33]</sup>对一例右半球卒中患者给予GVS治疗后,发现其对图片的复制和记忆能力得到了提高。颞顶叶和顶岛叶前庭皮质(the parieto insular vestibular cortex, PIVC)是与记忆相关的脑皮质区域。Hilliard D等<sup>[34]</sup>对健康受试者给予GVS治疗发现,GVS激活了PIVC和颞顶叶之间的连通性,并因此改善其空间记忆和学习能力,为研究GVS改善卒中患者相应脑皮质区域的记忆与学习功能提供了证据。由此可见,GVS对治疗脑卒中记忆障碍具有有效的临床意义。

## 3 GVS促进脑卒中后功能恢复的可能作用机制

目前针对GVS促进脑卒中后功能恢复的具体生理机制

尚不清楚,可能涉及对多种神经纤维、神经递质、大脑神经网络和脑血流量等的调控,现就以下三个可能机制进行阐述。

### 3.1 GVS对神经元、神经递质的调节

研究表明,阴极GVS可以通过促进突触前膜谷氨酸的释放对神经元产生激活效应,使得突触后膜上谷氨酸与N-甲基-天冬氨酸(N-methyl-D-aspartate, NMDA)的结合增多,进而增加了突触后膜钙离子的水平。同时,阴极GVS可以使 $\gamma$ -氨基丁酸( $\gamma$ -aminobutyric acid, GABA)的释放减少,从而降低抑制性神经元的传递。使用非洲爪蟾蝌蚪的动物实验研究显示<sup>[35]</sup>,在前庭-眼通路中,GVS中的阴极刺激可以诱导前庭-眼反射(VOR)神经元细胞内的钙离子增多,从而增强细胞与突触之间的相互作用,进而促进突触的可塑性。且当应用NMDA受体拮抗剂(7-氯-尿嘧啶酸)和AMPA受体拮抗剂(CNQX)阻碍谷氨酸能前庭毛细胞突触传递时,发现GVS仍能诱导前庭传入纤维的信号传递,但电信号振幅下降了约3%,说明GVS引起的毛细胞和前庭传入纤维的兴奋性改变是依赖于细胞膜的极化作用。

目前,C-fos蛋白的表达水平是反映神经元活性大小的理想标志<sup>[36]</sup>。Holstein GR等<sup>[37]</sup>使用正弦GVS刺激前庭-交感神经通路,发现在尾部前庭核复合体有大量的C-fos蛋白聚集,尤其是部分内侧核、脊髓核和前庭上核中,说明GVS在前庭-交感神经通路中同样发挥着激活神经元的作用。在前庭-脊髓通路中,Keywan A等<sup>[38]</sup>研究表明,与假刺激组相比,nGVS治疗组通过降低前庭-脊髓反射神经元的感知阈值,提高了受试者前庭传入神经元的兴奋性,使其能够感知和处理平常无法检测到的阈下前庭信号。同样,Wuehr M等<sup>[39]</sup>也认为GVS是通过降低前庭-脊髓反射神经元的兴奋阈值来促进阈下前庭信号的输入。为进一步探讨GVS对GABA的作用,Samoudi G等<sup>[40]</sup>对正常小鼠和6-羟基多巴胺诱导的帕金森小鼠模型通过植入电极施加双侧双极随机前庭电刺激(stochastic vestibular stimulation, SVS),患侧施加阳极刺激,对侧施加阴极刺激,结果显示正常小鼠和受损小鼠的患侧黑质中GABA分泌均显著性增多,而对侧黑质中GABA分泌减少。此外,有研究显示GVS可以促进单侧迷路切除大鼠的平衡功能恢复,其作用机制可能是促进了患侧前庭内侧核神经元细胞的细胞增殖过程<sup>[41]</sup>。结果表明GVS可通过调节钙离子的浓度、神经递质的分泌、神经元的兴奋阈值从而增强神经细胞的活性,这些与脑卒中患者功能恢复密不可分。

### 3.2 GVS对大脑功能区域的调节

GVS不仅可以直接影响双侧乳突刺激电极下神经元的突触电活动,而且还可以激活与刺激区域神经元相关的多个脑功能区域。近年来功能性磁共振成像(functional magnetic resonance imaging, fMRI)和正电子发射计算机断层显像(positron emission computed tomography, PET)技术被广泛

用于研究GVS在脑功能连接方面的作用机制。早在1998年有报道称GVS可以激活人类大脑中央沟、顶内沟前下部以及颞顶连接处的脑功能区域,在灵长类动物中这些区域的同源脑区分别是Brodmann 3a区、2区以及PIVC<sup>[42]</sup>。最近,有学者报道健康参与者在接受双侧双极GVS后,fMRI显示其大脑Rolandic区和中央旁小叶之间的节点中心度(degree centrality, DC)显著升高,提示在静息态脑网络中,GVS可以增加大脑Rolandic区和中央旁小叶与其他脑区之间的连接数量,而Rolandic区和中央旁小叶是大脑感觉运动网络中的重要组成部分<sup>[43]</sup>。现已证实,脑卒中患者偏瘫时涉及全身的感觉运动网络功能连接严重受损<sup>[44]</sup>,因此GVS可能通过使局部感觉运动皮层获得重塑,从而改善偏瘫肢体的运动功能。

此外,GVS还可以增加其他大脑网络区域的功能连接,例如左侧顶下小叶与舌回之间,左后岛叶与梭状回、壳核、小脑之间,左中岛叶与楔前回、眶额皮层、小脑之间以及右后导叶与舌回、楔前回之间,这些区域均与视觉认知和记忆功能的恢复相关<sup>[45]</sup>。与此同时,Macauda G等<sup>[46]</sup>也发现GVS时fMRI显示岛叶和顶盖大脑皮质可被激活,并认为这是处理前庭系统的两大核心脑皮质区域。除了上述区域,研究表明前庭电刺激时额叶的运动前区也可被激活,该区可能对应于猴大脑皮质Brodmann 6区的腹侧前部,在动物实验中已经证实该区属于前庭大脑皮质。另外,对帕金森病的治疗中发现,GVS和nGVS激活了患者桥脑脚被盖核(pedunculopontine tegmental nucleus, PPN)和顶下小叶之间的连通性,而PPN作为皮层下胆碱能系统的关键部分,对人类维持肢体平衡和步态正常至关重要<sup>[47]</sup>。由此可见,GVS可能通过激活与平衡及记忆相关的脑功能区域,从而发挥改善脑卒中患者平衡及记忆功能的作用。

### 3.3 GVS对脑血流量的调节

脑卒中后功能障碍患者常伴有脑组织缺血及脑部供血不足,而GVS可改善颞顶连接处、顶下小叶、岛叶等与前庭功能密切相关大脑区域的脑血流量(cerebral blood flow, CBF),从而为GVS促进脑卒中患者平衡及认知功能恢复奠定了基础。Becker-Bense S等<sup>[48]</sup>使用一体化PET/MRI对健康参与者在接受GVS后的脑血流灌注情况进行研究,发现GVS后参与者的右侧前岛叶脑血流量达到最大激活峰,相应的在双侧顶下小叶皮质、颞顶交界处的脑血流峰值也被激活,其次在左前丘脑、旁正中丘脑、双侧额上回、中央前回、中央后回皮质的局部血流量均有提高,为GVS改善脑卒中患者相应脑组织区域缺血提供了证据支持。此外,周波等<sup>[49]</sup>报道,与仅使用药物治疗组相比,GVS联合常规药物治疗能够使前庭周围性疾病患者的椎动脉与基底动脉血流速度明显升高,从而有效的提高大脑血流量的供应,进而改善脑功能。

#### 4 小结

GVS由于其具有易于操作、低成本、无创、效果显著等优势,已被应用于神经系统疾病功能障碍的康复研究中,虽然目前国内尚未见GVS改善脑卒中后功能障碍的直接文献报道,但国外许多研究已表明GVS可促进脑卒中患者的功能恢复,因此GVS有望成为脑卒中患者未来康复的有用工具。然而,目前关于此技术的研究尚存在一些问题:①GVS的作用机制还不完全明确,虽然研究者已经从神经递质、脑功能连接、脑血流量等多个层面对GVS的作用机制展开了研究,但是各作用机制之间的相互作用有待进一步探讨;②将GVS作为脑卒中后康复干预的研究样本量普遍偏少,且有些研究结果尚存在一些争议,遂需要多采用随机、双盲、合理的样本量进行研究;③GVS刺激参数缺乏统一性,例如因不同刺激时长、刺激强度、刺激模式、电极的放置位置等因素所致不同的疗效需要进一步确认。

#### 参考文献

[1] 甘勇,杨婷婷,刘建新,等.国内外脑卒中流行趋势及影响因素研究进展[J].中国预防医学杂志,2019,20(2):139—144.

[2] Benjamin EJ, Muntner P, Alonso A, et al. Heart disease and stroke statistics—2019 update: a report from the American Heart Association[J]. Circulation, 2019, 139(10):e56—e528.

[3] 《中国脑卒中防治报告2018》编写组.我国脑卒中防治仍面临巨大挑战——《中国脑卒中防治报告2018》概要[J].中国循环杂志,2019,34(2):105—119.

[4] 庄霁雯,郑洁皎,陈秀恩,等.脑卒中平衡功能障碍治疗的研究进展[J].中国康复理论与实践,2016,22(10):1127—1131.

[5] 周籽佑,陈凯,陈洪梅,等.小波分析在电流前庭刺激对人体静态平衡研究中的应用[J].航天医学与医学工程,2019,32(6):531—538.

[6] Cohen B, Suzuki JI. Eye movements induced by ampullary nerve stimulation[J]. Am J Physiol, 1963, 204:347—351.

[7] Day BL, Séverac Cauquil A, Bartolomei L, et al. Human body-segment tilts induced by galvanic stimulation: a vestibularly driven balance protection mechanism[J]. J Physiol, 1997, 500(Pt 3):661—672.

[8] Khoshnam M, Häner DMC, Kuatsjah E, et al. Effects of galvanic vestibular stimulation on upper and lower extremities motor symptoms in Parkinson's disease[J]. Front Neurosci, 2018, 12:633.

[9] 陈光辉,周发明,上官守琴,等.前庭电刺激对血管性痴呆患者认知功能影响[J].湖北医药学院学报,2014,33(2):128—130+135.

[10] Pasquier F, Denise P, Gauthier A, et al. Impact of galvanic vestibular stimulation on anxiety level in young adults [J]. Front Syst Neurosci, 2019, 13:14.

[11] Čobeljić RD, Ribarič-Jankes K, Aleksić A, et al. Does galvanic vestibular stimulation decrease spasticity in clinically complete spinal cord injury?[J]. Int J Rehabil Res, 2018, 41(3):251—257.

[12] Rorsman I, Magnusson M, Johansson BB. Reduction of visuo-spatial neglect with vestibular galvanic stimulation[J].

Scand J Rehabil Med, 1999, 31(2):117—124.

[13] Utz KS, Dimova V, Oppenländer K, et al. Electrified minds: transcranial direct current stimulation (tDCS) and galvanic vestibular stimulation (GVS) as methods of non-invasive brain stimulation in neuropsychology: a review of current data and future implications[J]. Neuropsychologia, 2010, 48(10):2789—2810.

[14] Stolbkov IuK, Tomilovskaia ES, Kozlovskaja IB, et al. Galvanic vestibular stimulation in physiological and clinical studies in recent years[J]. Usp Fiziol Nauk, 2014, 45(2):57—76.

[15] 邓华阳,陶希,宋涛.脑卒中坐位平衡及评定方法研究进展[J].中国康复医学杂志,2020,35(2):248—252.

[16] 付奕,谢丽君,丘卫红,等.感觉系统障碍对脑卒中平衡能力的影响[J].中国康复理论与实践,2011,17(10):983—985.

[17] Nooristani M, Maheu M, Houde MS, et al. Questioning the lasting effect of galvanic vestibular stimulation on postural control[J]. PLoS one, 2019, 14(11):e0224619.

[18] Inukai Y, Otsuru N, Saito K, et al. The after-effect of noisy galvanic vestibular stimulation on postural control in young people: a randomized controlled trial[J]. Neurosci Lett, 2020, 729:135009.

[19] Bonan IV, Leblong E, Leplaideur S, et al. The effect of optokinetic and galvanic vestibular stimulations in reducing post-stroke postural asymmetry[J]. Clin Neurophysiol, 2016, 127(1):842—847.

[20] Babyar S, Santos T, Will-Lemos T, et al. Sinusoidal transcranial direct current versus galvanic vestibular stimulation for treatment of lateropulsion poststroke[J]. J Stroke Cerebrovasc Dis, 2018, 27(12):3621—3625.

[21] 毛翼睿,武俊英.经颅直流电刺激在卒中后单侧忽略中的应用[J].中西医结合心脑血管病杂志,2020,18(4):587—589.

[22] 王萍,单春雷,王健.单侧空间忽略的康复研究进展[J].中国康复理论与实践,2020,26(1):59—61.

[23] Christophe Lopez. The vestibular system[J]. Current Opinion in Neurology, 2016, 29(1):74—83.

[24] Wilkinson D, Zubko O, Sakel M, et al. Galvanic vestibular stimulation in hemi-spatial neglect[J]. Front Integr Neurosci, 2014, 8:4.

[25] Zubko O, Wilkinson D, Langston D, et al. The effect of repeated sessions of galvanic vestibular stimulation on target cancellation in visuo-spatial neglect: preliminary evidence from two cases[J]. Brain Inj, 2013, 27(5):613—619.

[26] Nakamura J, Kita Y, Ikuno K, et al. Influence of the stimulus parameters of galvanic vestibular stimulation on unilateral spatial neglect[J]. Neuroreport, 2015, 26(8):462—466.

[27] Bergmann J, Krewer C, Müller F, et al. A new cutoff score for the burke lateropulsion scale improves validity in the classification of pusher behavior in subacute stroke patients[J]. Gait Posture, 2019, 68:514—517.

[28] Nakamura J, Kita Y, Yuda T, et al. Effects of galvanic vestibular stimulation combined with physical therapy on pusher behavior in stroke patients: a case series[J]. Neuro Rehabilitation, 2014, 35(1):31—37.

[29] 刘四维,关敏,张静,等.倾斜综合征的研究进展[J].华西医学, 2019, 34(11):1315—1320.

- [30] Krewer C, Rieß K, Bergmann J, et al. Immediate effectiveness of single-session therapeutic interventions in pusher behaviour[J]. *Gait Posture*,2013,37(2):246—250.
- [31] Oppenländer K, Utz KS, Reinhart S, et al. Subliminal galvanic-vestibular stimulation recalibrates the distorted visual and tactile subjective vertical in right-sided stroke[J]. *Neuropsychologia*,2015,74:178—183.
- [32] Stamenova V, Jennings JM, Cook SP, et al. Repetition-lag memory training is feasible in patients with chronic stroke, including those with memory problems[J]. *Brain Inj*,2017,31(1):57—67.
- [33] Wilkinson D, Zubko O, Degutis J, et al. Improvement of a figure copying deficit during subsensory galvanic vestibular stimulation[J]. *J Neuropsychol*,2010,4(Pt 1):107—118.
- [34] Hilliard D, Passow S, Thurm F, et al. Noisy galvanic vestibular stimulation modulates spatial memory in young healthy adults[J]. *Sci Rep*,2019,9(1):9310.
- [35] Gensberger KD, Kaufmann AK, Dietrich H, et al. Galvanic vestibular stimulation: cellular substrates and response patterns of neurons in the vestibulo-ocular network[J]. *J Neurosci*,2016,36(35):9097—9110.
- [36] Ionov ID, Pushinskaya II, Gorev NP, et al. Cyclosporin-induced catalepsy in aged rats: specific change of brain c-Fos protein expression in the lateral entorhinal cortex[J]. *Brain Res Bull*,2020,159:79—86.
- [37] Holstein GR, Friedrich VL Jr, Martinelli GP. Glutamate and GABA in vestibulo-sympathetic pathway neurons[J]. *Front Neuroanat*,2016,10:7.
- [38] Keywan A, Wuehr M, Pradhan C, et al. Noisy galvanic stimulation improves roll-tilt vestibular perception in healthy subjects[J]. *Front Neurol*,2018,9:83.
- [39] Wuehr M, Boerner JC, Pradhan C, et al. Stochastic resonance in the human vestibular system-noise-induced facilitation of vestibulospinal reflexes[J]. *Brain Stimul*,2018,11(2):261—263.
- [40] Samoudi G, Nissbrandt H, Dutia MB, et al. Noisy galvanic vestibular stimulation promotes GABA release in the substantia nigra and improves locomotion in hemiparkinsonian rats[J]. *PLoS One*,2012,7(1):e29308.
- [41] Shaabani M, Lotfi Y, Karimian SM, et al. Short-term galvanic vestibular stimulation promotes functional recovery and neurogenesis in unilaterally labyrinthectomized rats[J]. *Brain Res*,2016,1648(Pt A):152—162.
- [42] Lobel E, Kleine JF, Bihan DL, et al. Functional MRI of galvanic vestibular stimulation[J]. *J Neurophysiol*,1998,80(5):2699—2709.
- [43] Helmchen C, Machner B, Rother M, et al. Effects of galvanic vestibular stimulation on resting state brain activity in patients with bilateral vestibulopathy[J]. *Hum Brain Mapp*,2020,41(9):2527—2547.
- [44] 吴杰,赵智勇,唐朝正,等.基于独立成分分析的脑卒中感觉运动网络功能连接异常的研究[J]. *中国康复医学杂志*,2017,32(6):607—612.
- [45] Helmchen C, Rother M, Spliethoff P, et al. Increased brain responsivity to galvanic vestibular stimulation in bilateral vestibular failure[J]. *Neuroimage Clin*,2019,24:101942.
- [46] Macaudo G, Moisa M, Mast FW, et al. Shared neural mechanisms between imagined and perceived egocentric motion:a combined GVS and fMRI study[J]. *Cortex*,2019,119:20—32.
- [47] Cai J, Lee S, Ba F, et al. Galvanic vestibular stimulation (GVS) augments deficient pedunculo-pontine nucleus (PPN) connectivity in mild Parkinson's disease: fMRI effects of different stimuli[J]. *Front Neurosci*,2018,12:101.
- [48] Becker-Bense S, Willoch F, Stephan T, et al. Direct comparison of activation maps during galvanic vestibular stimulation: a hybrid H<sub>2</sub>[15 O] PET-BOLD MRI activation study [J]. *PLoS One*,2020,15(5):e0233262.
- [49] 周波,杨皖菁,王勇,等.前庭电刺激在前庭周围性疾病的临床应用效果分析[J]. *医学研究杂志*,2015,44(11):81—84.

·综述·

## 基于功能性近红外光谱技术探索脑卒中恢复期患者障碍躲避的皮层调控机制的研究进展\*

毛佳燕<sup>1</sup> 邱纪方<sup>1,2,3</sup>

脑卒中是一种极为常见的高死亡率、高致残率疾病<sup>[1-2]</sup>,对人类的生命健康造成了极大的威胁。随着康复医学的介入,越来越多脑卒中后患者重获了基础步行能力。由此,障

碍躲避成为一项更具挑战性的关卡,它关系到脑卒中患者后生活质量的高低。然而目前在临床上,关于障碍躲避能力皮层调控机制的研究很少。近年来,功能性近红外光谱技术

DOI:10.3969/j.issn.1001-1242.2023.03.022

\*基金项目:2021年浙江省卫生健康科技计划面上项目(2021KY959)

1 浙江中医药大学第三临床医学院,康复医学院,浙江省杭州市,310053; 2 浙江康复医疗中心(浙江中医药大学附属康复医院); 3 通讯作者第一作者简介:毛佳燕,女,硕士研究生; 收稿日期:2021-09-09