

doi: 10.13241/j.cnki.pmb.2023.02.017

虚拟现实平衡训练联合神经肌肉电刺激对前交叉韧带重建术后患者 膝关节功能、腘绳肌肌力和步行功能的影响*

郑黎明 何 斌[△] 王新生 铁贵瑶 李欣蕊

(中国人民解放军联勤保障部队第九〇八医院康复医学科 江西 南昌 330001)

摘要 目的:探讨虚拟现实平衡训练联合神经肌肉电刺激(NMES)对前交叉韧带重建术(ACLR)后患者膝关节功能、腘绳肌肌力和步行功能的影响。**方法:**选择2019年8月~2021年12月期间我院收治的前交叉韧带(ACL)损伤患者96例,并成功实施ACLR,采用随机数字表法分为对照组($n=48$,常规康复训练、虚拟现实平衡训练)和研究组($n=48$,常规康复训练、虚拟现实平衡训练联合NMES干预)。对比两组膝关节功能优良率、膝关节功能、腘绳肌肌力和步行功能。**结果:**研究组的临床膝关节功能优良率93.75%(45/48)高于对照组68.75%(33/48),差异有统计学意义($P<0.05$)。两组干预后膝关节功能评分、膝关节活动度均升高,且研究组高于对照组($P<0.05$)。两组干预后患侧腘绳肌等长肌力升高,且研究组高于对照组($P<0.05$),两组干预后健侧腘绳肌等长肌力对比无明显差异($P>0.05$)。两组干预后步长、步速升高,且研究组高于对照组,患侧摆动相降低,且研究组低于对照组($P<0.05$)。两组干预后被动活动察觉阈值、进行被动角度再生试验降低,且研究组低于对照组($P<0.05$)。**结论:**虚拟现实平衡训练联合NMES应用于ACLR术后患者的疗效显著,有助于其膝关节功能恢复,提高腘绳肌肌力,改善步行功能。

关键词:前交叉韧带重建术;神经肌肉电刺激;虚拟现实平衡训练;膝关节功能;腘绳肌肌力;步行功能

中图分类号:R686 **文献标识码:**A **文章编号:**1673-6273(2023)02-294-05

Effects of Virtual Reality Balance Training Combined with Neuromuscular Electrical Stimulation on Knee Function, Hamstring Muscle Strength and Walking Function after Anterior Cruciate Ligament Reconstruction*

ZHENG Li-ming, HE Bin[△], WANG Xin-sheng, TIE Gui-yao, LI Xin-rui

(Department of Rehabilitation Medicine, The 908 Hospital of Joint Logistics Support Force of Chinese People's Liberation Army, Nanchang, Jiangxi, 330001, China)

ABSTRACT Objective: To investigate the effects of virtual reality balance training combined with neuromuscular electrical stimulation (NMES) on knee function, hamstring muscle strength and walking function after anterior cruciate ligament reconstruction (ACLR). **Methods:** 96 patients with anterior cruciate ligament (ACL) injury who were treated in our hospital from August 2019 to December 2021 were selected, and ACLR was successfully implemented. They were randomly divided into control group ($n=48$, routine rehabilitation training, virtual reality balance training) and study group ($n=48$, routine rehabilitation training, virtual reality balance training combined with intervention) by random number table method. The excellent and good rate of knee function, knee function, hamstring muscle strength and walking function of the two groups were compared. **Results:** The excellent and good rate of knee joint function in the study group was 93.75% (45/48) higher than 68.75% (33/48) in the control group, and the difference was statistically significant ($P<0.05$). After intervention, knee function score and knee range of motion were increased in the two groups, and the study group was higher than the control group ($P<0.05$). After intervention, the isometric strength of the affected side hamstring muscle in the two groups increased, and the study group was higher than the control group ($P<0.05$). There was no significant difference in isometric strength of the unaffected side hamstring muscle in the two groups after intervention ($P>0.05$). After intervention, the step length and step speed in the two groups increased, and the study group was higher than the control group, the affected side swing phase decreased, and the study group was lower than the control group ($P<0.05$). After intervention, the threshold of passive activity perception and conduct passive angle regeneration test decreased in two groups, and the study group was lower than the control group ($P<0.05$). **Conclusion:** Virtual reality balance training combined with NMES has a significant effect on patients with ACLR after operation, which is helpful to the recovery of knee joint function, improve hamstring muscle strength and improve walking function.

Key words: Anterior cruciate ligament reconstruction; Neuromuscular electrical stimulation; Virtual reality balance training; Knee function; Hamstring muscle strength; Walking function

Chinese Library Classification(CLC): R686 **Document code:** A

Article ID: 1673-6273(2023)02-294-05

* 基金项目:江西省卫生计生委中医药科研项目(2016A183)

作者简介:郑黎明(1993-),男,本科,主管治疗师,研究方向:运动损伤康复,E-mail: doctorcc0505@163.com

[△] 通讯作者:何斌(1970-),男,本科,主治医师,研究方向:运动损伤康复,E-mail: timi206@163.com

(收稿日期:2022-06-10 接受日期:2022-07-07)

前言

前交叉韧带(ACL)损伤是临床常见的膝关节疾病,可导致膝关节前后方向及旋转不稳,常见于各种交通事故或剧烈运动中,若未能予以及时治疗,可影响患者的关节功能、运动能力^[1,2]。前交叉韧带重建术(ACLR)是治疗 ACL 损伤的常用方案,但由于移植术无法替代原有 ACL 在膝关节本体感觉中的作用,故术后需配合相应康复干预措施来帮助患者术后恢复,但常规的康复训练也有部分患者无法受益,需寻找其他更为有效的干预方案^[3]。虚拟现实平衡训练可改善 ACLR 术后患者膝关节的本体感觉能力,可促进患者步行能力恢复^[4],但该训练模式主观意识较强,易受到患者自身理解度的影响,导致依从性下降,影响治疗效果^[5]。神经肌肉电刺激(NMES)是指应用低频脉冲电流刺激神经纤维或肌肉组织,引起肌肉收缩,进而改善相关功能的一种干预方案,主要适用于骨科术后的肌力康复、脑损伤后急性期和恢复期的肢体瘫痪、周围神经损伤等^[6]。王李琴等^[7]学者的研究发现,NMES 可明显改善关节镜下 ACL 重建术后患者的膝关节功能。本研究通过探讨虚拟现实平衡训练联合 NMES 在 ACLR 术后患者中的临床应用价值,以期 ACLR 术后患者的康复训练方案的选择提供数据支持。

1 资料与方法

1.1 一般资料

选择 2019 年 8 月~2021 年 12 月期间我院收治的 ACL 损伤患者 96 例,并成功实施 ACLR,手术操作均由同一组医师团队完成。采用随机数字表法分为对照组($n=48$,常规康复训练、虚拟现实平衡训练)和研究组($n=48$,常规康复训练、虚拟现实平衡训练联合 NMES 干预)。我院伦理委员会已批准本研究。其中对照组女性 17 例,男性 31 例,年龄 18~53 岁,平均(32.67 ± 5.41)岁;损伤原因:交通事故 5 例,运动跌伤 40 例,其他 3 例;体质量指数 $19.3 \sim 27.6 \text{ kg/m}^2$,平均(23.72 ± 1.43) kg/m^2 。研究组女性 18 例,男性 30 例,年龄 20~52 岁,平均(32.91 ± 4.63)岁;损伤原因:交通事故 6 例,运动跌伤 38 例,其他 4 例;体质量指数 $20.2 \sim 27.8 \text{ kg/m}^2$,平均(23.41 ± 1.37) kg/m^2 。两组一般资料对比差异不明显($P>0.05$),具有可比性。

1.2 纳入排除标准

纳入标准:(1)查体时能发现明显的关节松弛,经膝关节轴移试验、拉赫曼试验、前抽屉试验等结果捐献是为阳性,并经 X 线检查、核磁共振等影像学检查确诊;(2)患者及其家属知情本次研究,并签署了相关同意书者;(3)均为单侧损伤。排除标准:(1)骨质疏松者;(2)既往有损伤关节手术治疗史或骨折史者;(3)因自身身体原因,不能坚持完成本研究者;(4)合并后交叉韧带和/或侧副韧带损伤;(5)术后存在严重并发症者;(6)严重心血管、肺部疾病、椎间盘突出、癫痫者。

1.3 治疗方法

两组术后均接受常规康复训练,包括等张肌力训练、关节活动度练习、行走训练、负重训练等。且从术后第 8 周起,两组均接受虚拟现实平衡训练,使用美国生产的 Biodex 三维平衡训练系统进行动态平衡训练,包括驾船竞赛、城市赛道、撞击球训练等。具体为:撞击球训练:双脚并足站立于测力板中央区

域,VR 场景显示周围出现不同方向、不同速度的小球撞击移动平板。难度等级 1~9 级,根据个体情况选择不同等级,并由双足站立过渡到单足站立。驾船竞赛:患者双脚与肩同宽站立于测力板中央,双膝微屈。VR 场景为患者驾驶一艘小船行驶于海面上,左右转向、前进与后退分别通过左右重心转移、前后位重心转移控制,以最少时间到达指定终点为最终目标,城市赛道:患者双脚与肩同宽站立于测力板中央,VR 场景为患者驾驶一辆汽车行驶于马路上,左右转向、前进与后退分别通过左右重心转移、前后位重心转移控制;以躲避对向车道的来车训练为主要目标。15 min/次,每天 2 次,每周 6 d,训练 8 周。研究组术后第 3 d,患者取仰卧位,采用德国贝朗公司生产的 STIMU-PLE-DIG 型 NMES 治疗仪对患者患侧股外侧肌、股内侧肌实施 NMES 治疗。将电极片放置在病变肢体上,固定,接通电源,刺激频率为脉宽 $30 \mu\text{s}$,20 Hz 疏密波,电流强度调整范围 $15 \sim 30 \text{ mA}$,间歇时间设置为 $10 \sim 15 \text{ s}$ 。30 min/次,1 次/d,6 d/周,共持续 8 周。

1.4 评价指标

(1)考察两组干预后的膝关节功能优良率,优:可做高难度动作,关节功能完全恢复;良:高难度下肢动作受限,关节功能恢复;中:日常活动不受限,关节恢复;差:患者日常行走受限。优良率 = 优率 + 良率^[8]。(2)干预前后记录两组膝关节功能评分、膝关节活动度,其中膝关节活动度评价采用关节活动度尺。膝关节功能评分采用 Lysholm 膝关节功能评分量表,总分为 100 分,评分越高,膝关节功能改善效果越好^[9]。(3)干预前后采用 BIODEX 等速肌力测试仪测试双侧(健侧、患侧)腘绳肌等长肌力。(4)干预前后采用三维步态分析系统采集两组患者的步态时空参数(步长、步速、患侧摆动相)。(5)干预前后采用 I-SOMED200 等速测试仪测量被动活动度察觉阈值和进行被动角度再生试验,被动角度再生试验分别在屈曲段 $80^\circ \sim 100^\circ$ 、中间段 $40^\circ \sim 60^\circ$ 、伸直段 $0^\circ \sim 20^\circ$ 三段进行,每段随机抽取 2 个角度共 6 个位置进行测定,最终结果取 6 次平均值。被动活动察觉阈值重复测量 3 次取均值。

1.5 统计学方法

采用 SPSS27.0 软件处理数据,计量资料包括膝关节功能评分、膝关节活动度等符合正态分布、方差齐性采用均数 $\pm$ 标准差($\bar{x} \pm s$)表示,行 t 检验。计数资料包括膝关节功能优良率等采用(%)表示,行 χ^2 检验,检验水准为 $\alpha=0.05$ 。

2 结果

2.1 两组膝关节功能优良率对比

研究组膝关节功能优良率 93.75%(45/48) 高于对照组 68.75%(33/48),差异有统计学意义($P<0.05$)。见表 1。

2.2 两组膝关节功能评分、膝关节活动度对比

两组干预前膝关节功能评分、膝关节活动度对比无明显差异($P>0.05$)。两组干预后膝关节功能评分、膝关节活动度均升高,且研究组高于对照组($P<0.05$)。见表 2。

2.3 两组双侧腘绳肌等长肌力对比

两组干预前健侧、患侧腘绳肌等长肌力对比无明显差异($P>0.05$)。两组干预后患侧腘绳肌等长肌力升高,且研究组高于对照组($P<0.05$),两组干预后健侧腘绳肌等长肌力对比无明显差异($P>0.05$)。见表 3。

表 1 两组膝关节功能优良率对比 [例(%)]

Table 1 Comparison of excellent and good rate of knee function between the two groups [n(%)]

Groups	Excellent	Good	Middle	Bad	Excellence and good rate
Control group(n=48)	12(25.00)	21(43.75)	11(22.92)	4(8.33)	33(68.75)
Study group(n=48)	17(35.42)	28(58.33)	3(6.25)	0(0.00)	45(93.75)
χ^2					9.846
P					0.002

表 2 两组膝关节功能评分、膝关节活动度对比($\bar{x} \pm s$)

Table 2 Comparison of knee function score and knee range of motion between the two groups($\bar{x} \pm s$)

Groups	Time	Knee function score(scores)	Knee range of motion(°)
Control group(n=48)	Before intervention	63.24± 6.49	69.25± 7.43
	After intervention	76.78± 5.18	91.78± 6.09
	t	-11.297	-16.248
	P	0.000	0.000
Study group(n=48)	Before intervention	62.48± 6.31	68.46± 9.62
	After intervention	85.09± 5.67*	103.92± 12.97*
	t	-18.465	-15.124
	P	0.000	0.000

Note: compared with the control group after intervention, * $P < 0.05$.

表 3 两组双侧腘绳肌等长肌力对比($\bar{x} \pm s$, n.m/kg)

Table 3 Comparison of isometric hamstring strength between the two groups($\bar{x} \pm s$, n.m/kg)

Groups	Time	Unaffected side	Affected side
Control group(n=48)	Before intervention	41.22± 6.19	32.67± 4.36
	After intervention	41.65± 5.26	39.13± 5.39
	t	-0.367	-6.456
	P	0.715	0.000
Study group(n=48)	Before intervention	40.83± 4.73	32.31± 5.41
	After intervention	41.57± 5.64	47.58± 4.53*
	t	-0.697	-14.993
	P	0.488	0.000

Note: compared with the control group after intervention, * $P < 0.05$.

2.4 两组步态时空参数对比

两组干预前步长、步速、患侧摆动相对比无明显差异($P > 0.05$)。两组干预后步长、步速升高,且研究组高于对照组;患侧摆动相降低,且研究组低于对照组($P < 0.05$)。见表 4。

2.5 两组膝关节本体感觉相关指标对比

两组干预前被动活动察觉阈值、进行被动角度再生试验对比无明显差异($P > 0.05$)。两组干预后被动活动察觉阈值、进行被动角度再生试验降低,且研究组低于对照组($P < 0.05$)。见表 5。

3 讨论

ACL 处有着丰富的本体感觉器官,可以感受关节的拉力和应力,肌肉的运动,进而通过神经传导通路传送到中枢神经

系统,在对抗胫骨前后方向的应力负荷和旋转扭矩方面发挥着重要作用^[10-12]。ACL 损伤会导致其本体感受器数量减少或出现变性,并出现传入神经功能障碍,最终影响膝关节本体感觉^[13,14];同时,ACL 损伤后也可累及健侧膝关节的本体感觉,导致平衡障碍,需及时予以正确、有效的治疗^[15,16]。ACLR 是治疗 ACL 损伤的常用方法之一,尽管手术可帮助患者恢复膝关节结构,但也存在残余损伤,不利于患者术后恢复^[17]。此外,膝关节周围肌肉术后也有残余损伤,会导致肌力下降,步行功能受到影响^[18]。不少研究证实^[19,20],合理有效的康复训练可促使人体本体感觉恢复,并可以促进 ACLR 患者膝关节功能恢复。

虚拟现实平衡训练具有交互、沉浸、想象三大特点,早前的报道证实^[21],虚拟现实平衡训练能提高脑卒中偏瘫患者的平衡

表 4 两组步态时空参数对比($\bar{x} \pm s$)Table 4 Comparison of temporal and spatial gait parameters between the two groups($\bar{x} \pm s$)

Groups	Time	Step length(cm)	Step speed(m/s)	Affected side swing phase(%)
Control group(n=48)	Before intervention	52.17± 6.29	0.97± 0.13	51.36± 6.29
	After intervention	65.13± 6.14	1.32± 0.17	40.96± 5.31
t		-10.215	-11.331	8.753
P		0.000	0.000	0.000
Study group(n=48)	Before intervention	52.63± 5.79	0.95± 0.19	50.12± 5.74
	After intervention	72.56± 6.46*	1.51± 0.25*	29.19± 4.25*
t		-15.917	-12.356	20.303
P		0.000	0.000	0.000

Note: compared with the control group after intervention, * $P < 0.05$.

表 5 两组膝关节本体感觉相关指标对比($\bar{x} \pm s, ^\circ$)Table 5 Comparison of knee proprioception related indexes between the two groups($\bar{x} \pm s, ^\circ$)

Groups	Time	Threshold of passive activity	Conduct passive angle regeneration
		perception	test
Control group(n=48)	Before intervention	3.16± 0.38	5.38± 0.37
	After intervention	2.52± 0.41	3.49± 0.41
t		7.932	23.710
P		0.000	0.000
Study group(n=48)	Before intervention	3.19± 0.44	5.46± 0.45
	After intervention	2.16± 0.28*	2.58± 0.31*
t		13.683	36.515
P		0.000	0.000

Note: compared with the control group after intervention, * $P < 0.05$.

功能及姿势控制能力。施明等^[4]学者的研究发现:虚拟现实平衡训练可改善 ACLR 患者术后膝关节的本体感觉,同时还可改善患者的平衡功能。早在 1964 年就有研究证实 NMES 能使肌肉产生可见收缩,帮助机体关节功能恢复^[23]。也有相关基础实验表明^[23],NMES 可使肌肉被动地有节律性地收缩,延缓废用性萎缩,为神经再支配创造条件,恢复其传导功能。金伟等人^[24]的报道证实:早期康复训练联合 NMES 可明显改善 ACLR 患者的膝关节活动度,有利于膝关节功能恢复。

本次研究结果显示,虚拟现实平衡训练联合 NMES 应用于 ACLR 患者,可促进膝关节功能恢复,改善步行功能,疗效优于单用虚拟现实平衡训练。虚拟现实平衡训练通过执行依赖视觉听觉信息的双重认知任务来训练患者处理物理平衡扰动的能力。NMES 经预先设定程序的电刺激与支配肌肉的神经上发挥作用,引起肌肉收缩,并促进病灶患肢周围组织代偿与重组,同时提高机体的运动功能,改善步态参数^[25,26]。此外,NMES 可模拟部分的轴突断裂,刺激神经元细胞反应,通过突触和中枢神经系统的反馈回路来对运动神经元予以激活,有助于缓解神经元麻痹,进而改善机体的感觉以及运动神经^[27]。同时,血液循环状况与肌肉组织中有氧、低氧、无氧等程度相关,而 NMES 刺激神经肌肉也能够促进局部的静脉以及淋巴回流,改善血液循环,加快膝关节血液循环,让病灶处组织加快重组,构建新的神

经运动网络,最终恢复其正常的传导功能^[28]。戴文敏等^[29]学者的研究显示,ACLR 患者坚持进行电刺激治疗,可有效降低突触阻力,重新建立与中枢神经系统的联系,最终达到加快膝关节功能恢复的目的。本次研究结果还发现,两组干预后患侧腘绳肌等长肌力升高,且研究组高于对照组,提示虚拟现实平衡训练联合 NMES 可缓解腘绳肌肌力萎缩,并促进其肌力逐步恢复。腘绳肌包括半腱肌、半膜肌、股二头肌,其收缩的主要功能就是屈膝和后伸髋关节,维持膝关节稳定性,既往的报道证实^[30],在膝关节动态伸膝过程中,腘绳肌的功能可明显提高膝关节的稳定性。推测 NMES 可通过易化作用和提高运动单位兴奋性达到改善肌力的目的。

综上所述,虚拟现实平衡训练联合 NMES 用于 ACLR 患者,可提高腘绳肌肌力,促进膝关节功能恢复,改善步行功能,具有较好的临床应用价值。

参考文献(References)

- [1] Kohn L, Rembeck E, Rauch A. Anterior cruciate ligament injury in adults: Diagnostics and treatment [J]. Orthopade, 2020, 49 (11): 1013-1028
- [2] Sonnery-Cottet B, Daggett M, Fayard JM, et al. Anterolateral Ligament Expert Group consensus paper on the management of internal rotation and instability of the anterior cruciate ligament-

- deficient knee[J]. *J Orthop Traumatol*, 2017, 18(2): 91-106
- [3] Lin KM, Boyle C, Marom N, et al. Graft Selection in Anterior Cruciate Ligament Reconstruction [J]. *Sports Med Arthrosc Rev*, 2020, 28(2): 41-48
- [4] 施明, 潘文平, 曾明, 等. 虚拟现实平衡训练对前交叉韧带重建术后膝关节本体感觉的效果 [J]. *中国康复理论与实践*, 2020, 26(12): 1458-1463
- [5] 施明, 潘文平, 曾明, 等. 虚拟现实平衡训练对前交叉韧带重建术后步行能力的影响[J]. *江苏医药*, 2021, 47(2): 129-132
- [6] Hauger AV, Reiman MP, Bjordal JM, et al. Neuromuscular electrical stimulation is effective in strengthening the quadriceps muscle after anterior cruciate ligament surgery [J]. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2018, 26(2): 399-410
- [7] 王李琴, 方景. 神经肌肉电刺激联合早期康复训练对关节镜下前交叉韧带重建术后康复的影响[J]. *实用临床医药杂志*, 2020, 24(17): 110-113
- [8] Lysholm J, Gillquist J. Evaluation of knee ligament surgery results with special emphasis on use of a scoring scale [J]. *Am J Sports Med*, 1982, 10(3): 150-154
- [9] 林建宁, 孙笑非, 阮狄克. 膝关节 lysholms 评分等级评价膝关节功能[J]. *中国骨与关节损伤杂志*, 2008, 23(3): 230-231
- [10] Stone AV, Marx S, Conley CW. Management of Partial Tears of the Anterior Cruciate Ligament: A Review of the Anatomy, Diagnosis, and Treatment[J]. *J Am Acad Orthop Surg*, 2021, 29(2): 60-70
- [11] Dos'Santos T, Thomas C, Comfort P, et al. The Effect of Training Interventions on Change of Direction Biomechanics Associated with Increased Anterior Cruciate Ligament Loading: A Scoping Review[J]. *Sports Med*, 2019, 49(12): 1837-1859
- [12] 陈能, 吕燃, 谭方, 等. 六味地黄丸组方对前交叉韧带损伤患者 TGF- β 1、BMP-2 基因表达及术后功能康复的影响[J]. *现代生物医学进展*, 2022, 22(6): 1174-1179
- [13] Sikidar A, Marieswaran M, Kalyanasundaram D. Estimation of forces on anterior cruciate ligament in dynamic activities [J]. *Biomech Model Mechanobiol*, 2021, 20(4): 1533-1546
- [14] Almeida AM, Santos Silva PR, Pedrinelli A, et al. Aerobic fitness in professional soccer players after anterior cruciate ligament reconstruction[J]. *PLoS One*, 2018, 13(3): e0194432
- [15] L Ška D, Zeln ĩk R. Clinical Assessment of Anterior Cruciate Ligament Rupture[J]. *Acta Chir Orthop Traumatol Cech*, 2020, 87(5): 318-322
- [16] Shanbehzadeh S, Mohseni Bandpei MA, Ehsani F. Knee muscle activity during gait in patients with anterior cruciate ligament injury: a systematic review of electromyographic studies [J]. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2017, 25(5): 1432-1442
- [17] Sasaki Y, Fujii M, Araki D, et al. Effect of Percentage of Femoral Anterior Cruciate Ligament Insertion Site Reconstructed With Hamstring Tendon on Knee Kinematics and Graft Force [J]. *Am J Sports Med*, 2021, 49(5): 1279-1285
- [18] He C, He W, Li Y, et al. Biomechanics of Knee Joints after Anterior Cruciate Ligament Reconstruction [J]. *J Knee Surg*, 2018, 31 (4): 352-358
- [19] Parisien RL. Editorial Commentary: The Epic Saga of the Anterior Cruciate Ligament and Anterolateral Complex of the Knee-Loyal Sidekick May Provide Protection Without Constraint[J]. *Arthroscopy*, 2020, 36(5): 1374-1375
- [20] Volpi P. Editorial Commentary: Timing of Anterior Cruciate Ligament Reconstruction Is Just as Important as a Correct Surgical Procedure[J]. *Arthroscopy*, 2021, 37(4): 1221-1222
- [21] 梁明, 徐奕鹏, 曲源, 等. 基于 3D 环境的虚拟现实任务导向训练在脑卒中患者平衡功能康复中的应用 [J]. *临床神经病学杂志*, 2021, 34(5): 348-351
- [22] Valenti F. Neuromuscular electrical stimulation in clinical practice [J]. *Acta Anaesthesiol*, 1964, 15(6): 227-245
- [23] 宋光, 王磊, 任超世, 等. 模型动物失神经支配及神经肌肉电刺激的可编程植入式神经肌肉电刺激器[J]. *中国组织工程研究与临床康复*, 2011, 15(22): 4098-4102
- [24] 金伟. 激进康复训练联合神经肌肉电刺激对关节镜下前交叉韧带重建术后关节功能恢复的影响 [J]. *中国医药导报*, 2016, 13(36): 121-124
- [25] Conley CEW, Mattacola CG, Jochimsen KN, et al. A Comparison of Neuromuscular Electrical Stimulation Parameters for Postoperative Quadriceps Strength in Patients After Knee Surgery: A Systematic Review[J]. *Sports Health*, 2021, 13(2): 116-127
- [26] Wellauer V, Item JF, Bizzini M, et al. Home-Based Nonoperative-Side Quadriceps Neuromuscular Electrical Stimulation Prevents Muscle Weakness Following Anterior Cruciate Ligament Reconstruction[J]. *J Clin Med*, 2022, 11(2): 466
- [27] 江泽平, 黄珍, 陈耀东, 等. 神经松动术和神经肌肉电刺激及二者联合治疗上肢周围神经损伤的疗效对比[J]. *广西医学*, 2021, 43(14): 5
- [28] 陈建, 周敬滨, 解强, 等. 神经肌肉电刺激对前交叉韧带重建术后腘绳肌功能的影响[J]. *中国运动医学杂志*, 2016, 35(8): 750-753
- [29] 戴文敏, 丁杰, 周稳, 等. 前交叉韧带重建后肌肉功能恢复中神经肌肉电刺激的应用[J]. *中国组织工程研究*, 2015, 14(7): 1082-1086
- [30] 章闻捷, 叶祥明, 张大威, 等. 腘绳肌等速离心训练对前交叉韧带重建术后膝关节功能的影响 [J]. *中国运动医学杂志*, 2017, 36(9): 805-809