·数字康复与神经发育·

基于虚拟现实技术的运动游戏在痉挛型脑性瘫痪患儿中的应用效果

周博[1]，唐苗[2]，张永芳[1]

恩施土家族苗族自治州中心医院 1. 儿科；2. 内分泌内科，湖北 恩施 445000

摘 要：目的 探讨基于虚拟现实技术(VR)的运动游戏在痉挛型脑性瘫痪(CP)患儿中的应用效果，为优化患儿康复干预方案提供参考建议。**方法** 采用前瞻性随机对照试验，选取 2024 年 3 月—2025 年 1 月在恩施土家族苗族自治州中心医院行康复治疗的痉挛型 CP 患儿为研究对象。以随机数字表法将 224 例患儿分为观察组和对照组各 112 例。对照组行常规康复方案，观察组同时给予基于 VR 的运动游戏，干预时间为 16 周。分别于治疗前 1d、治疗 8 周后和治疗 16 周后，采用粗大运动功能评估量表 88 项(GMFM-88)、Berg 平衡量表(BBS)、改良 Ashworth 量表(MAS)评估患儿粗大运动功能、平衡功能和排肠肌、内收肌群痉挛程度。使用 t 检验和重复测量方差分析比较两组患儿各项指标变化。**结果** 治疗前，观察组和对照组患儿 GMFM-88 评分、BBS 评分、腓肠肌 MAS 评分和内收肌群 MAS 评分比较，差异均无统计学意义($P>0.05$)。重复测量方差分析结果显示，两组患儿 GMFM-88、BBS、腓肠肌 MAS、内收肌群 MAS 评分的时间、组间及交互效应均有统计学意义($P<0.001$)。治疗 16 周后，观察组患儿的 GMFM-88(51.60±14.27 *vs.* 44.37±13.69，$t=3.869$)及 BBS 评分(28.35±3.63 *vs.* 24.57±3.06，$t=8.426$)均高于对照组，腓肠肌 MAS(2.12±0.38 *vs.* 2.50±0.47，$t=-6.654$)及内收肌群 MAS 评分(2.07±0.35 *vs.* 2.58±0.52，$t=-8.611$)均低于对照组，差异有统计学意义($P<0.001$)。**结论** 基于 VR 的运动游戏弥补了常规康复方案的不足，可促进痉挛型 CP 患儿的运动功能康复，但其长期疗效仍需进一步验证。

关键词： 虚拟现实；运动游戏；痉挛型脑性瘫痪；运动功能；平衡；康复；儿童

中图分类号：R179 **文献标识码：**A **文章编号：**1008-6579(2026)08-0842-05 doi:10.11852/zgetbjzz2025-1296

Effects of virtual reality-based exercise games in children with spastic cerebral palsy

ZHOU Bo[1], TANG Miao[2], ZHANG Yongfang[1]

1. Department of Pediatrics; 2. Department of Endocrinology, The Central Hospital of Enshi Tujia and Miao Autonomous Prefecture, Enshi, Hubei 445000, China

Corresponding author: ZHANG Yongfang, E-mail: zhou329601@163.com

Abstract: Objective To investigate the effects of virtual reality (VR)-based exercise games in children with spastic cerebral palsy, so as to provide evidence for optimizing rehabilitation interventions. **Methods** A prospective randomized controlled trial was conducted among 224 children with spastic cerebral palsy who received rehabilitation treatment at the Central Hospital of Enshi Tujia and Miao Autonomous Prefecture from March 2024 to January 2025. The participants were randomly assigned to observation group and control group using a random number table, with 112 children in each group. The control group received conventional rehabilitation therapy, while the observation group received additional VR-based exercise game training for 16 weeks. Gross motor function, balance, and spasticity of the gastrocnemius and adductor muscles were assessed using the Gross Motor Function Measure 88 (GMFM-88), Berg Balance Scale (BBS), and Modified Ashworth Scale (MAS), respectively, at 1 day before treatment, after 8 weeks of treatment, and after 16 weeks of treatment. Independent-samples t-test and repeated-measures analysis of variance were used for statistical analysis. **Result** Before intervention, there were no significant differences on GMFM-88 scores, BBS scores, and MAS scores for both the gastrocnemius and adductor muscles between the observation group and control group ($P>0.05$). Repeated measures analysis of variance (ANOVA) revealed that the main effects of time and group, as well as their interaction effects, were statistically significant for all four indicators ($P<0.001$). After 16 weeks of treatment, the observation group exhibited significantly higher GMFM-88 (51.60±14.27 *vs.* 44.37±13.69, $t=3.869$) and BBS scores (28.35±3.63 *vs.* 24.57±3.06, $t=8.426$) compared with the control group. Conversely, the MAS scores for the gastrocnemius (2.12±0.38 *vs.*

作者简介：周博(1990—)，男，主治医师，本科学历，主要研究方向为儿童康复。

通信作者：张永芳，E-mail：zhou329601@163.com

2.50±0.47, $t=-6.654$) and adductor muscles (2.07±0.35 *vs.* 2.58±0.52, $t=-8.611$) were significantly lower in the observation group than in the control group ($P<0.001$). **Conclusion** VR-based exercise games may be a useful adjunct to conventional rehabilitation for improving motor function in children with spastic cerebral palsy.

Keywords: virtual reality; exercise game; spastic cerebral palsy; gross motor function; balance; rehabilitation; children

脑性瘫痪(cerebral palsy, CP)是最常见的儿童身体残疾[1]。CP 儿童因痉挛、虚弱、挛缩、选择性运动控制减弱和平衡能力差而导致运动缺陷[2]。痉挛被认为是肌张力过高的原因之一,经常出现在 CP 患者中,影响肌肉功能和运动活动[3]。提高运动技能对 CP 儿童的功能发育至关重要[4]。荟萃分析认为,虚拟现实(virtual reality,VR)技术似乎对 CP 儿童的运动技能学习有额外的好处[5]。Meta 分析发现,基于 VR 技术的运动游戏可有效改善 CP 患儿的上肢功能[6]。有研究显示,基于 VR 的游戏训练可改善痉挛型双瘫青少年的运动功能和平衡功能[7]。为探索更有利于患儿康复进展的治疗模式,本研究拟分析并评估基于 VR 技术的运动游戏对痉挛型 CP 患儿平衡功能及下肢肌肉痉挛康复的影响。

1　对象和方法

1.1　一般资料　本研究为随机对照试验,选取 2024 年 3 月—2025 年 1 月在恩施土家族苗族自治州中心医院行康复治疗的痉挛型 CP 患儿为研究对象。CP 的诊断必备条件[8]:1)肌力和肌张力异常;2)反射发育异常;3)姿势和运动发育异常;4)持续存在的中枢性运动障碍。CP 诊断的参考条件:1)头颅影像学佐证(超声、CT、磁共振);2)致 CP 的病因学依据。纳入标准:1)符合脑瘫诊断标准;2) 能够用语言或非语言表达不适和(或)疼痛;3)临床分型为痉挛型四肢瘫、痉挛型偏瘫、痉挛型双瘫;4)粗大运动功能分级系统(Gross Motor Function Classification System,GMFCS)Ⅰ～Ⅲ级;5)年龄 6～12 岁。排除标准:1)康复依从性差和(或)未完成康复疗程;2)头部受伤和(或)颅脑疾病史致无法佩戴传感器;3)合并其它致运动发育迟缓疾病如外伤性脑积水、唐氏综合征;4)严重器官功能障碍; 5)肌肉、骨关节疾病和(或)手术史; 6) 前庭感受器结构异常;7) 纳入研究前 1 个月内接受肉毒素治疗;8)CP 手术史。预调查以粗大运动功能评分为观测指标,根据参考文献[9]。容许误差为 6.31,标准差为 13.35,设双侧 $\alpha=0.05$,把握度为 0.9,需要 $n=94.1$ 例,两组样本量比值为 1∶1,则两组的最少样本量均为 94 例。考虑 15%失/拒访的情况,最终每组至少需要 112 例,本研究共纳入 279 例,根据纳排标准,最终纳入 224 例。两组患儿各项指标比较,差异均无统计学意义($P>0.05$),具有可比性。见表 1。本研究通过恩施土家族苗族自治州中心医院医学伦理审批(2024-002),患儿父母均签署知情同意书。

表 1　研究对象基本特征(例,%)

Tab. 1　General characteristics of participants(n,%)

项目	观察组(n=112)	对照组(n=112)	$t/\chi^2/Z$ 值	P 值
年龄(岁,$\bar{x}\pm s$)	9.19±2.02	9.04±2.93	0.446[a]	0.656
男童	61(54.46)	59(52.68)	0.072[b]	0.789
病程(年,$\bar{x}\pm s$)	8.02±2.14	8.14±1.98	0.436[a]	0.664
痉挛型 CP 分型			1.229[b]	0.541
偏瘫	52(46.43)	60(53.57)		
双瘫	57(50.89)	50(44.64)		
四肢瘫	3(2.68)	2(1.79)		
GMFCS 功能分级			−0.191[c]	0.849
Ⅰ	49(43.75)	51(45.54)		
Ⅱ	37(33.04)	35(31.25)		
Ⅲ	26(23.21)	26(23.21)		

注:[a]t 值,[b]χ^2 值,[c]Z 值。

1.2　方法

1.2.1　康复方案　对照组:应用常规康复方案。康复项目包括:运动疗法、神经肌肉电刺激、推拿疗法、作业疗法。每个项目均 30min/次,1 次/d,6d/周,合计治疗 16 周。观察组:在常规康复方案的基础上联合应用基于 VR 的运动游戏。

游戏方法:在正式康复游戏开始前,向患儿与其家属介绍头戴式传感器的使用方法。要求患儿积极配合。该系统使用头戴式传感器实时检测患儿头部运动的角速度。患儿头戴轻便帽子,传感器(MPU6050)放置于额头中央。传感器包括 1 个 3 轴加速度计和 1 个 3 轴陀螺仪。传感器和加速度计测量头部沿水平轴、前轴和后轴的加速度。根据设定的程序,游戏系统为每个患者确定 1 个最大和最小角速度阈值。当达到最低头部运动速度阈值时,头部的运动会触发游戏中在 1 个或多个方向上执行的任务。例如,对于患儿 A,确定其可以达到的最小速度为 120°/s,最大速度为 250°/s。当患儿的头部运动速度达到至少 120°/s 时,才能进行与视频游戏中心角色的互动;相反,当头部运动的速度达到 250°/s,游戏暂停。

游戏场景:场景为一条悬浮在虚拟空间的 3D 直线道路,沿路随机分布不同的障碍物和奖励的物品。患者通过快速向上(跳跃)、向下(爬行)、左右转

动头部来引导一个移动的角色越过障碍物，收集奖品。例如，对于患儿 A，其仰头超过 120°/s 时即可跳过障碍物；低头超过 120°/s 时即可爬行；左侧或右侧转头超过 120°/s 时即可向左或向右移动角色。游戏的目标是在避开障碍物的同时收集尽可能多的奖品（茶壶），并且保证游戏中角色不掉出路径。障碍物设置由小至大分别为电线杆、路障、稻草人、草堆。患儿如想捡拾物品（茶壶），需通过 13 个障碍物。患儿在有限时间内收集物品（茶壶）愈多，积分越多，说明患儿的运动功能水平愈好。笔记本电脑屏幕顶部显示剩余时间、行驶的距离和收集的物品数量。在游戏过程中，若患儿发生交感神经兴奋症状，及时停止游戏并行相应处理。

游戏强度：每次游戏分为 4 局，2.5min/局，每局之间休息 1min，总时长 13min。每周在医院进行 2 次游戏，每次间隔≥48h，以避免患儿疲劳。患儿共接受该类游戏 16 周。

1.2.2 研究指标 粗大运动功能：应用粗大运动功能评估量表 88 项（Gross Motor Function Measure 88，GMFM-88）[10] 进行评估。量表的组内信度为 0.997，效度为 0.812。量表共分为 88 个项目，5 个能区。患儿得分愈高，表示其粗大运动功能愈好。平衡功能：应用 Berg 平衡量表（Berg Balance Scale，BBS）[11] 进行评估。量表的组内信度在 0.968～0.985，组间信度在 0.992～0.998；在结构效度方面，BBS 评估总分与平衡仪测试指标呈中度负相关（r=－0.404～－0.756）。量表共 14 个项目，量表总分 0～56 分。患儿得分愈高表示平衡能力愈好。肌肉痉挛程度：观测对象为腓肠肌及内收肌群，应用改良 Ashworh 量表（Modified Ashworth Scale，MAS）[12] 进行评估。评定者间信度的 Kendall′s tau-b 系数为 0.621～0.862；在结构效度方面，MAS 评分与生物力学参数之间的相关系数为 0.829～0.876。患儿得分愈高，则说明其肌肉痉挛程度愈严重。

1.3 质量控制 在开始实施康复前，对研究团队成员进行统一培训，以确保康复过程的一致性。在患儿康复前后，由研究团队成员通过观察评估患儿的康复效果。所有数据应用 EpiData 软件由双人录入，并设置逻辑纠错。

1.4 统计学方法 使用 SPSS 26.0 软件对数据进行分析。计量资料均通过正态性检验，以 $\bar{x}\pm s$ 描述，两组间比较采用 t 检验。多时点重复观测资料则行重复测量方差分析，两两比较采用 LSD-t 检验或组内两两比较差值 t 检验。计数资料以例（%）描述，组间比较采用 χ^2 检验，等级资料用 Wilcoxon 检验。P<0.05 为差异有统计学意义。

2 结 果

2.1 观察组与对照组患儿治疗前后各项研究指标的评分比较 两组患儿治疗前 1 天的 GMFM-88 评分、BBS 评分、腓肠肌 MAS 评分、内收肌群 MAS 评分比较，差异无统计学意义（P >0.05）；观察组与对照组患儿治疗 8 周后、治疗 16 周后的 GMFM-88 评分、BBS 评分、腓肠肌 MAS 评分、内收肌群 MAS 评分比较，差异有统计学意义（P<0.05）。见表 2。

表 2 观察组与对照组患儿治疗前后 GMFM-88，BBS，腓肠肌 MAS，内收肌群 MAS 评分比较（分，$\bar{x}\pm s$）

Tab. 2 Comparison of GMFM-88, BBS, gastrocnemius muscle MAS, and adductor muscle group MAS scores between the observation group and the control group before and after treatment (score, $\bar{x}\pm s$)

观察指标	组别	例数	治疗前	治疗 8 周后	治疗 16 周后
GMFM-88 评分	观察组	112	36.63±12.12	43.50±13.06	51.60±14.27
	对照组	112	36.79±12.08	39.04±11.68	44.37±13.69
	t 值		－0.099	2.422	3.869
	P 值		0.921	0.016	<0.001
BBS 评分	观察组	112	20.53±2.78	25.42±3.16	28.35±3.63
	对照组	112	20.48±3.04	22.86±2.55	24.57±3.06
	t 值		0.128	6.672	8.426
	P 值		0.898	<0.001	<0.001
腓肠肌 MAS 评分	观察组	112	3.24±0.57	2.51±0.42	2.12±0.38
	对照组	112	3.23±0.69	2.88±0.54	2.50±0.47
	t 值		0.118	－5.724	－6.654
	P 值		0.906	<0.001	<0.001
内收肌群 MAS 评分	观察组	112	3.21±0.57	2.50±0.37	2.07±0.35
	对照组	112	3.24±0.54	2.92±0.64	2.58±0.52
	t 值		－0.404	－6.013	－8.611
	P 值		0.686	<0.001	<0.001

2.2　康复治疗前后两组患儿各项研究指标评分的重复测量方差分析　重复测量方差分析结果显示，两组患儿 GMFM-88、BBS、腓肠肌 MAS、内收肌群 MAS 评分的时间主效应、组间主效应和交互效应均有统计学意义（$P<0.05$）。见表 3。

表 3　观察组与对照组患儿 GMFM-88、BBS、腓肠肌 MAS、内收肌群 MAS 评分重复测量方差分析结果

Tab. 3　Results of repeated measures ANOVA of GMFM-88, BBS, gastrocnemius muscle MAS, and adductor muscle group MAS scores between the observation group and the control group

项目	时间主效应		组间主效应		交互效应	
	F 值	*P* 值	*F* 值	*P* 值	*F* 值	*P* 值
GMFM-88 评分	88.681	<0.001	103.51	<0.001	27.351	<0.001
BBS 评分	79.460	<0.001	218.754	<0.001	21.954	<0.001
腓肠肌 MAS 评分	66.687	<0.001	98.551	<0.001	17.359	<0.001
内收肌群 MAS 评分	39.338	<0.001	74.365	<0.001	15.004	<0.001

3　讨　论

3.1　基于虚拟现实技术的运动游戏对患儿粗大运动功能的影响　本研究发现，基于 VR 的运动游戏可促进痉挛型 CP 患儿的粗大运动功能康复。首先，本研究通过游戏锻炼了患儿的视觉功能。CP 儿童前庭动眼神经反射功能障碍与粗大运动功能分类系统相关[13]。与无视觉障碍的同龄人相比，有视觉障碍的儿童通常表现出较低水平的运动能力[14]。其次，游戏有效缓解了患儿的肌肉痉挛，促进其肢体灵活性，使患儿逐步恢复正常的活动能力，提高在日常生活中站立和行走的动作表现。

3.2　基于虚拟现实技术的运动游戏对患儿平衡功能的影响　前庭功能减退患儿通常表现出异常步态和跌倒风险增加[15]。跌倒在 CP 儿童中很常见[16]，改善平衡能力可以促进其保持正常的姿势，提高身体的稳定性和协调性，从而降低其在生活中的跌倒风险。本研究结果显示，基于 VR 的运动游戏可促进痉挛型 CP 患儿的平衡功能康复。首先，游戏通过头颅旋转刺激患儿的前庭系统，提高其方向感知能力和空间定位能力。其次，游戏降低了肌肉的痉挛程度，增强了肌肉力量，从而改善肢体灵活性，促进其行动能力。良好的肌肉力量和适当的下肢肌肉灵活性增强了痉挛型双瘫儿童的功能状态和良好的平衡[17]。第三，游戏锻炼了患儿的视觉能力和注意力。通过注视、追视等视觉训练，增强患儿的反应能力和视觉感知能力，提高方向感知和空间定位的准确性。第四，通过头颈部位的运动，可以缓解颈部的僵硬和疼痛。在增加颈部活动范围的同时，改善姿势控制能力。

3.3　基于虚拟现实技术的运动游戏对患儿肌肉痉挛程度的影响　在 CP 儿童中，腓肠肌痉挛可能导致马蹄足姿势，从而使正常步态时踝关节背屈不足[18]。内收肌群主要用于臀部的“伸展”动作[19]。本研究发现，基于 VR 的运动游戏可促进痉挛型 CP 患儿的下肢肌肉痉挛康复。既往研究发现，促进前庭功能，可改善下肢肌肉。前庭在受到电刺激的情况下，下肢肌肉活动可能会增加[20]。其次，游戏促进了患儿的视觉功能改善。视觉和前庭输入影响肌肉协同作用，肌肉协同作用负责坐姿到站姿运动中的身体伸展和稳定[21]。

综上所述，本次研究以痉挛型 CP 患儿为研究对象，对其进行康复治疗。研究发现，基于 VR 的运动游戏对患儿的粗大运动功能、平衡功能、肌肉痉挛程度具有良好的疗效，且操作简便、安全。局限性在于：本研究为单中心研究，样本量和研究设计在对次级结果得出深远结论的统计能力上有限。此外，本研究缺乏对患儿长期疗效的观察和随访，且干预方案尚无统一标准，今后需扩大样本量、持续随访。

利益冲突声明　本研究不存在利益冲突

数据可用性声明　本研究中所有的原始数据已在论文中得以全面展示。

参考文献

[1] Hanson JH, Majnemer A, Pietrangelo F, et al. Evidence-based early rehabilitation for children with cerebral palsy: Co-development of a multifaceted knowledge translation strategy for rehabilitation professionals[J]. Front Rehabil Sci, 2024, 5: 1413240.

[2] Mohammed AH, El-Serougy HR, Abdel Karim AE, et al. Correlation between selective motor control of the lower extremities and balance in spastic hemiplegic cerebral palsy: A randomized controlled trial[J]. BMC Phys Sci Med Rehabil, 2023, 15(1): 24.

[3] Roldan A, Henríquez M, Iturricastillo A, et al. Towhat degree does limb spasticity affect motor performance in para-footballers with cerebral palsy? [J]. Front Physiol, 2022, 12: 807853.

[4] Xue Z, Zhang W, Zhou N, et al. Effects of virtual reality motor games on motor skills in children with cerebral palsy: A systematic review and meta-analysis[J]. Front Psychol, 2025, 15: 1483370.

[5] Kilcioglu S, Schiltz B, Araneda R, et al. Short- to long-term effects of virtual reality on motor skill learning in children with cerebral palsy: Systematic review and meta-analysis[J]. JMIR Serious Games, 2023, 11: e42067.

[6] 孙天虹，王楠. 基于虚拟现实技术的运动游戏治疗脑瘫儿童上肢功能有效性的 meta 分析[J]. 中国卫生统计，2025，42(4)：574-579.
Sun TH, Wang N. Meta-analysis on the effectiveness of virtual reality-based sports games in improving upper limb function in children with cerebral palsy[J]. Chinese Health Statistics, 2025, 42(4): 574-579. (in Chinese)

[7] Lee K, Oh H, Lee G. Fully immersive virtual reality game-based training for an adolescent with spastic diplegic cerebral palsy: A case report[J]. Children, 2022, 9(10): 1512.

[8] 中国康复医学会儿童康复专业委员会，中国残疾人康复协会小儿脑性瘫痪康复专业委员会，《中国脑性瘫痪康复指南》编委会. 中国脑性瘫痪康复指南(2015)：第一部分[J]. 中国康复医学杂志，2015，30(7)：747-754.
The Children's Rehabilitation Professional Committee of the Chinese Rehabilitation Medicine Association, the Children's Cerebral Palsy Rehabilitation Professional Committee of the Chinese Disabled Persons' Rehabilitation Association, and the Editorial Committee of the Chinese Cerebral Palsy Rehabilitation Guidelines. Chinese Rehabilitation Guidelines for Cerebral Palsy (2015): Part 1 [J]. Chinese Journal of Rehabilitation Medicine, 2015, 30 (7): 747-754. (in Chinese)

[9] 孙振球，徐勇勇. 医学统计学[M]. 4 版. 北京：人民卫生出版社，2014：573.
Sun ZQ, Xu YY. Medical Statistics [M]. 4th ed. Beijing: People's Health Publishing House, 2014: 573. (in Chinese)

[10] 陈燕惠. 儿科临床常用量表速查手册[M]. 北京：化学工业出版社，2018：202.
Chen YH. Quick reference manual for commonly used pediatric clinical scales[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2018: 202. (in Chinese)

[11] 张玉梅，宋鲁平. 康复评定常用量表[M]. 北京：科学技术文献出版社，2018：62.
Zhang YM, Song LP. Common scales for rehabilitation assessment [M]. Beijing: Science and Technology Literature Press, 2018: 62. (in Chinese)

[12] 严晓华，何璐，郑韵，等. 改良 Ashworth 量表与改良 Tardieu 量表在痉挛型脑瘫患儿评定中的信度研究[J]. 中国康复医学杂志，2015，30(1)：18-21.
Yan XH, He LU, Zheng Y, et al. Reliability study of Improved Ashworth Scale and Improved Tardieu Scale in evaluating spasmodic cerebral palsy in Children [J]. Chinese Journal of Rehabilitation Medicine, 2015, 30 (1): 18-21. (in Chinese)

[13] Conti LC, Ferri N, Manzari L, et al. Vestibulo-oculomotor reflex dysfunction in children with cerebral palsy correlates with Gross Motor Function Classification System[J]. Audiol Res, 2025, 15(2): 21.

[14] Brian A, Starrett A, Beach PH, et al. Perceived motor competence mediates the relationship between gross motor skills and physical activity in youth with visual impairments[J]. Res Q Exerc Sport, 2022, 93(9): 310-317.

[15] Harter MJ, Furman JM, Sparto PJ, et al. Walking balance recovery in people with unilateral vestibular hypofunction [J]. J Vestib Res, 2025, 35(6): 269-279.

[16] Esterley M, Krach LE, Pederson K, et al. Physical and psychosocial consequences of falls in ambulatory individuals with cerebral palsy by age and gross motor function[J]. Arch Phys Med Rehabil, 2025, 106(5): 688-695.

[17] Afnan Z, Malik AN, Jahan S, et al. Association of muscles length and strength with balance and functional status among children with diplegic spastic cerebral palsy[J]. J Pak Med Assoc, 2023, 73(2): 253-257.

[18] Analan PD, Aslan H. Use of shear wave elastography to analyze the muscle structure in children with spastic cerebral palsy [J]. J Pediatr Rehabil Med, 2023, 16 (1): 157-161.

[19] Takahashi K, Tozawa H, Kawama R, et al. Redefining muscular action: Human "adductor" Magnus is designed to act primarily for hip "extension" rather than adduction in living young individuals[J]. J Appl Physiol, 2025, 138 (4): 1088-1099.

[20] Matsugi A, Oku K, Mori N. The effects of stochastic galvanic vestibular stimulation on body sway and muscle activity[J]. Front Hum Neurosci, 2020, 14: 591671.

[21] Yoshida K, An Q, Yozu A, et al. Visual and vestibular inputs affect muscle synergies responsible for body extension and stabilization in sit-to-stand motion[J]. Front Neurosci, 2019, 12: 1042.

收稿日期：2025-11-17 **修回日期**：2026-05-29 **本文编辑**：李少闻