

外部扰动条件下脑性瘫痪青少年平衡能力和大脑激活特征的研究*

王姝涵¹ 李爱华² 倪燕² 马征³ 梁永胜⁴ 孙威¹ 王疆娜^{1,5}

摘要

目的:探讨脑性瘫痪(CP)青少年和正常发育(TD)青少年平衡能力和大脑皮层激活水平的差异。

方法:招募CP与TD青少年各8例。应用AMTI三维测力台采集足底压力中心(COP)数据,以评价扰动与非扰动条件站立平衡能力,同步应用fNIRS采集辅助运动区(SMA)、中央前回(PreCG)、中央后回(PoCG)和顶上小叶(SPL)的氧合血红蛋白(ΔHbO_2)浓度,以评价大脑皮层激活水平。

结果:①平衡能力指标:扰动条件下CP组 ΔAP 、RMS、 RMS_{AP} 、 SP_{AP} 均显著大于对照组。CP组扰动条件下 ΔAP 、 ΔML 、RMS、 RMS_{AP} 、 SP_{AP} 显著大于非扰动条件。②大脑皮层激活水平指标:扰动条件下CP组SMA的 ΔHbO_2 显著大于对照组。CP组扰动条件下SMA、PreCG、PoCG的 ΔHbO_2 显著大于非扰动。

结论:相比于TD青少年,CP青少年在外部扰动条件下前后方向的平衡能力较差,SMA激活水平较高。受到外部扰动时,CP青少年前后方向的平衡能力降低,SMA、PreCG和PoCG激活水平增高。

关键词 脑性瘫痪;平衡能力;功能性近红外光谱

中图分类号:R742.3 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-1242(2025)-08-1155-08

Balance ability and brain activation characteristics in adolescents with cerebral palsy under the external perturbation conditions/WANG Shuhan, LI Aihua, NI Yan, et al./Chinese Journal of Rehabilitation Medicine, 2025, 40(8): 1155—1162

Abstract

Objective: To explore the differences in balance ability and brain activation level between the cerebral palsy (CP) adolescents and the typically developing (TD) adolescents.

Method: Eight adolescents with CP or TD were recruited in this study. The center of pressure (COP) was measured using an AMTI three-dimensional force platform to assess the standing balance under perturbation or non-perturbation condition. Brain activation level was also measured using the fNIRS device to collect the oxygenated hemoglobin concentrations (ΔHbO_2) in the supplementary motor area (SMA), precentral gyrus (PreCG), postcentral gyrus (PoCG) and superior parietal lobule (SPL).

Result: ① Balance ability indicators: During the perturbation condition, ΔAP , RMS, RMS_{AP} , SP_{AP} in the CP group were significantly greater than those in the control group. In the CP group, ΔAP , ΔML , RMS, RMS_{AP} , SP_{AP} during the perturbation condition were significantly greater than those during the non-perturbation condition. ② Brain activation level indicators: During the perturbation conditions, the ΔHbO_2 of SMA in the CP group were significantly greater than those in the control group. In the CP group, the ΔHbO_2 of SMA, PreCG, PoCG during the perturbation condition were significantly greater than those during the non-perturbation condition.

DOI:10.3969/j.issn.1001-1242.2025.08.004

*基金项目:国家自然科学基金项目(12402373);山东省自然科学基金项目(ZR2020QC091);国家级大学生创新创业训练计划(S202310457005,S202310457027)

1 山东体育学院,山东省济南市,250102; 2 济南医院康复医学科; 3 济南市黎明学校; 4 山东省特殊教育职业学院; 5 通讯作者
第一作者简介:王姝涵,女,硕士研究生; 收稿日期:2024-04-24

Conclusion: Compared to the TD adolescents, the CP adolescents had poorer balance in the anterior-posterior direction and higher level of SMA activation in the external perturbation condition. Under the external perturbation condition, the balance ability decreased in the anterior-posterior direction, while the activation level of SMA, PreCG and PoCG increased in the adolescents with CP.

Author's address Shandong Sport University, Jinan, 250102

Key word cerebral palsy; balance; functional near-infrared spectroscopy

脑性瘫痪(cerebral palsy, CP, 以下简称脑瘫)是指由于发育中的胎儿或婴幼儿大脑非进行性损伤所致的神经发育障碍^[1]。CP是儿童时期最常见的慢性致残性疾病^[2],每1000例活产儿中有2—3例患有CP^[3]。其中最常见类型为痉挛型脑瘫,约占发病总数的60%—70%^[4-5],主要特征是运动和姿势发育障碍,常伴有感觉、知觉、认知、交流和行为障碍。其中,平衡功能障碍是CP运动功能发育的主要限制因素之一^[6]。

平衡功能是指控制身体在空间中的位置或质心的能力,以实现身体在特定感觉环境中保持稳定和定向^[7]。CP存在平衡控制能力下降等功能障碍特征,增加跌倒风险^[8],进而限制日常生活活动^[9]。与正常发育(typically developing, TD)儿童相比,CP站立时前-后(anterior-posterior, AP)和内-外(medial-lateral, ML)侧方向表现出显著较大的足底压力中心(center of pressure, COP)均方根、摇摆路径长度、95%置信面积等,平衡能力显著较差^[10-11]。外部扰动是引发跌倒和平衡控制不稳的重要因素之一^[12]。研究表明与非扰动相比,扰动情况下COP偏移量显著较大,人体平衡能力显著较差^[13]。外部扰动对维持平衡的神经肌肉控制系统提出更高要求,在评估平衡障碍时可能比静态测试更敏感^[14]。因此,进一步了解外部扰动时CP平衡控制的相关信息,有助于制定抗扰动平衡控制训练方案。

平衡控制不仅依赖于视觉、前庭觉和本体感觉的输入,还依赖于中枢神经系统的感觉-运动整合过程^[8,15],是感觉系统、中枢神经系统和肌肉骨骼系统之间复杂的相互作用^[16]。神经系统损伤是CP平衡障碍的主要原因。目前,CP平衡障碍的治疗主要集中在肌肉骨骼系统上,而平衡障碍的神经基础往往被忽视^[17]。站立平衡的神经控制支配主要包括大脑皮层、脊髓、脑干、小脑和基底节等^[18],其中大脑皮层(如运动皮层、顶叶皮层区域)通过皮质脊髓束直接参与平

衡控制,通过脑干间接参与平衡^[17,19]。功能性近红外光谱(functional near-infrared spectroscopy, fNIRS)是一种非侵入性的光学脑成像技术,通过对大脑皮层氧合血红蛋白(HbO₂)和脱氧血红蛋白(HbR)浓度的变化评估大脑神经元活动^[20]。该技术已被用于研究脑瘫、脑卒中、帕金森病等神经系统疾病人群运动功能障碍的神经控制特征^[21],有研究证明fNIRS测试额叶及顶叶皮层 Δ HbO₂的重测信度为中度和良好^[22]。研究发现,与TD相比,痉挛型双瘫CP在平地步行中大脑感觉运动和顶叶皮质的脑激活量显著更高^[23]。尽管如此,目前关于在扰动条件下的CP平衡控制及其大脑皮层激活特征的研究尚未可知。

因此,本研究旨在探究CP在非扰动和扰动情况下的平衡能力及大脑激活特征,识别与平衡功能障碍相关的大脑皮层区域,为制定靶向神经可塑性的康复治疗策略提供理论依据和实践指导。本研究假设:与TD青少年相比,CP青少年的平衡能力较差、大脑皮层激活水平较高;与非扰动相比,CP青少年扰动情况下的平衡能力较差、大脑皮层激活水平较高。

1 对象与方法

1.1 研究对象

采用G*power 3.1软件进行样本量计算,对预实验的COP-RMS指标结果进行先验分析,计算得出Effect size $f=0.433$,将显著性水平设为0.05,统计效能设为0.8,通过双因素重复测量方差分析,计算出所需总样本量为14。本研究通过微信、张贴海报等方式从康复医院、特殊教育学校招募符合筛选标准的8例痉挛性偏瘫CP青少年为实验组,8例匹配的TD青少年为对照组(表1)。

纳入标准^[24-28]:CP组:①痉挛性偏瘫青少年,年龄12—18岁;②下肢改良Ashworth量表诊断为2级以下,粗大运动功能分级系统(Gross motor function classification system, GMFCS)分级为I—II

表1 受试者基本信息 (x±s)

组别	性别(例)		年龄(岁)	身高(m)	体重(kg)
	男	女			
脑瘫组	5	3	13.88±1.25	1.55±0.08	45.50±5.04
对照组	5	3	13.75±1.49	1.57±0.08	49.38±6.39
P值			0.858	0.631	0.200

级;③除CP外无其他神经系统疾病;④能够理解并遵循简单的指示和执行重复性任务。TD组:无头部受伤、神经系统、前庭或肌肉骨骼功能紊乱或严重异常的病史。

排除标准^[24,26,29]:①1年内进行过手术或6个月内注射过肉毒杆菌毒素;②患有认知障碍;③下肢肌肉骨骼畸形;④癫痫发作或发热

纳入CP青少年的磁共振检查结果显示为单侧大脑运动皮层受损。本研究通过山东体育学院运动科学伦理委员会的批准(No.2023009)。受试者及其监护人自愿参加此次研究,并签署知情同意书。

1.2 研究方法

1.2.1 实验仪器设备。

1.2.1.1 AMTI 测力台:应用 AMTI 测力台 (Advanced Mechanical Technology Inc., Watertown, MA, USA)采集平衡任务的COP位移数据,采集频率为1000Hz。

1.2.1.2 fNIRS 仪器及系统:应用便携式近红外成像系统 fNIRS (LIGHTNIRS, Shimadzu Corp, Kyoto, Japan)采集血流动力学反应参数,采样频率为13.3Hz,激光二极管光源的波长为780nm、805nm和830nm。采集帽包括8个红外光极发射器和8个红外光极探测器,以4×4的正方形阵列排列,光极之间的平均距离为3cm,共20个通道^[30]。

1.2.2 数据采集。

1.2.2.1 平衡能力测试:非扰动条件下平衡测试:受试者以舒适姿势站立在测力台上,双上肢自然放于身体两侧,双足平行距离与肩同宽,保持此姿势安静稳定站立30s^[25]。受试者每次测试后坐位休息30s,重复进行3次有效测试,最后取平均值进行数据分析。

扰动条件下平衡测试:在非扰动条件的基础上应用平衡扰动系统对受试者进行平衡扰动测试。扰动系统包括固定于腰部周围的无弹性腰带,将其系于1m长的绳子,受试者后方放置可调节高度凳子(凳子高度与腰部平行),通过绳子连接重物(图1)。

重物重量以受试者体重的5%计算^[31]。采集数据过程中,通过放下重物提供外部扰动。测试时间为30s^[32],重复进行3次有效测试并取平均值进行数据分析。

1.2.2.2 fNIRS 测试:根据国际10—20脑电图系统标准,研究人员将fNIRS设备佩戴于受试者头部,fNIRS探针放置于大脑感兴趣区(辅助运动区、中央前回、中央后回和顶上小叶)的头皮区域。受试者在平衡测试之前处于安静稳定坐位,闭眼并保持放松进行30s静息状态,随后进行平衡任务测试监测皮层的脑血氧水平变化,静息与任务重复交替进行3次有效测试^[33]。见表2,图2。

1.2.3 数据处理:应用Vicon Nexus软件对COP原始数据进行提取,使用Butterworth低通滤波器对数据进行平滑处理,截止频率为10Hz^[10]。

应用Matlab软件包(Homer2)对fNIRS数据进行预处理及计算。首先将fNIRS信号转换为光密度信号,然后根据修正的Beer-Lambert定律将光密度信号转换为氧合血红蛋白浓度(HbO₂)。运用带通

图1 扰动条件下的平衡测试



图2 fNIRS 探针位置

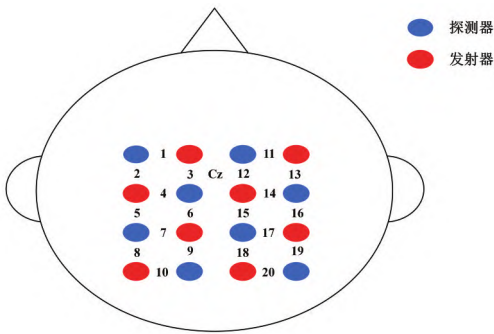


表2 fNIRS测试通道对应的脑区

脑区	通道(ch)
辅助运动区	1,3,11,12
中央前回	4,6,14,15
中央后回	6,7,15,17
顶上小叶	9,10,18,20

滤波(0.01—0.1Hz)去除呼吸(0.4Hz)、心跳(1—2Hz)、血压(0.1Hz)等生理噪声,并进行伪迹校正。将每次平衡测试开始前5s内HbO₂浓度的平均值作为基线,对信号进行基线校正。将每个平衡任务下3次测试的HbO₂数据分别进行平均,计算任务与基线条件之间的差异,以确定每个通道(ch)的氧合血红蛋白浓度变化(ΔHbO_2),进而反映大脑皮层区域激活程度的变化。最后,使用Matlab工具包Brain-Net Viewer对fNIRS数据进行可视化处理。

1.2.4 观察指标。

1.2.4.1 平衡能力指标:根据COP位移计算出各项变量以评估平衡能力,包括最大动摇径(Delta_{AP}、Delta_{ML})、95%置信椭圆面积(95%eArea)、均方根距离(RMS、RMS_{AP}、RMS_{ML})和摇摆路径(SP、SP_{AP}、SP_{ML})^[34]。计算公式如下:

$$\begin{aligned}\text{Delta}_{\text{AP}} &= X_{\text{max}} - X_{\text{min}} \\ \text{Delta}_{\text{ML}} &= Y_{\text{max}} - Y_{\text{min}} \\ 95\%e\text{Area} &= \pi \times (X_{\text{max}} - X_{\text{min}}) \times (Y_{\text{max}} - Y_{\text{min}}) \\ \text{RMS} &= \sqrt{\frac{\sum (X_n - \bar{X})^2 + \sum (Y_n - \bar{Y})^2}{N}} \\ \text{RMS}_{\text{AP}} &= \sqrt{\frac{\sum (X_n - \bar{X})^2}{N}} \\ \text{RMS}_{\text{ML}} &= \sqrt{\frac{\sum (Y_n - \bar{Y})^2}{N}} \\ \text{SP} &= \sum_{n=1}^{n-1} \sqrt{(X_{n+1} - X_n)^2 + (Y_{n+1} - Y_n)^2} \\ \text{SP}_{\text{AP}} &= \sum_{n=1}^{n-1} |X_{n+1} - X_n| \\ \text{SP}_{\text{ML}} &= \sum_{n=1}^{n-1} |Y_{n+1} - Y_n|\end{aligned}$$

1.2.4.2 fNIRS指标:各个通道的氧合血红蛋白浓度变化(ΔHbO_2)。计算公式如下:

$$\Delta\text{HbO}_2 = \text{任务HbO}_2 - \text{静息HbO}_2$$

1.3 统计学分析

应用SPSS 26.0(IBMS, NY, USA)进行数据

的统计学分析,数据以平均值±标准差表示。所有参数均使用Shapiro-Wilk检验确定数据是否属于正态分布。数据符合正态分布,则采用双因素重复测量方差分析检验组别自变量(脑瘫组、对照组)、扰动条件自变量(扰动、非扰动)对各因变量的交互效应及主效应影响。若存在显著交互效应则应用Bonferroni事后检验进行两两比较,使用偏eta平方(η^2p)表示双因素重复测量方差分析的交互效应和主效应的效应量大小。显著性水平设置为 $P<0.05$ 。

2 结果

2.1 平衡能力指标对比结果

由表3可知,双因素重复测量方差分析结果显示,CP组和对照组的Delta_{AP}($P=0.023$)、Delta_{ML}($P=0.006$)、RMS($P=0.009$)、RMS_{AP}($P=0.011$)、SP_{AP}($P=0.022$)存在显著组别和扰动交互效应。经事后检验结果显示,与非扰动相比,扰动条件下CP组的Delta_{AP}($P<0.001$)、Delta_{ML}($P<0.001$)、RMS($P<0.001$)、RMS_{AP}($P=0.001$)、SP_{AP}($P=0.001$)显著较大;与非扰动相比,扰动条件下对照组的Delta_{ML}($P<0.001$)显著较大。与对照组相比,CP组扰动条件下Delta_{AP}、RMS、RMS_{AP}、SP_{AP}均显著较大($P<0.001$),而Delta_{ML}($P=0.619$)无显著差异。与对照组相比,CP组非扰动条件下Delta_{AP}($P=0.002$)、Delta_{ML}($P=0.035$)、RMS($P=0.016$)、RMS_{AP}($P=0.003$)、SP_{AP}($P=0.001$)均显著较大。

2.2 大脑皮层激活特征指标对比结果

由表4可知,双因素重复测量方差分析结果显示,CP组和对照组ch12($P=0.041$)、ch14($P=0.048$)、ch15($P=0.039$)的 ΔHbO_2 存在显著组别和扰动交互效应。经事后检验结果显示,与非扰动相比,扰动条件下CP组的ch12($P=0.004$)、ch14($P=0.002$)、ch15($P=0.010$)的 ΔHbO_2 显著较大。与对照组相比,CP组扰动条件下ch12($P=0.047$)的 ΔHbO_2 显著较大。

图3所示为CP组与对照组分别在非扰动与扰动条件下维持平衡的大脑皮层整体激活水平对比图。由图3可知,与非扰动相比,CP组扰动条件下右脑SMA、PreCG、PoCG的激活水平显著较高。与对照组相比,扰动条件下CP组右脑SMA的激活水平显著较高。

表3 脑瘫组与对照组平衡能力的对比 (x±s)

平衡能力指标	脑瘫组		对照组		组别		扰动		组别×扰动	
	非扰动	扰动	非扰动	扰动	P值	η²p	P值	η²p	P值	η²p
Delta _{AP} (mm)	32.02±13.31 ^①	47.35±17.63 ^{①②}	12.87±4.53	16.81±5.88	<0.001	0.604	0.001	0.571	0.023	0.317
Delta _{ML} (mm)	41.28±19.18 ^①	66.22±17.56 ^②	24.16±7.76	69.67±7.78 ^②	0.297	0.077	<0.001	0.899	0.006	0.433
95%eArea(mm²)	4241.91±3099.23	7563.40±2672.68	1076.94±579.30	3624.55±1188.85	0.004	0.457	<0.001	0.879	0.205	0.112
RMS(mm)	10.13±4.36 ^①	16.77±5.71 ^{①②}	5.61±1.62	6.83±1.12	0.001	0.582	0.001	0.584	0.009	0.399
RMS _{AP} (mm)	6.21±2.92 ^①	11.08±5.40 ^{①②}	2.35±0.68	2.24±0.97	<0.001	0.627	0.015	0.357	0.011	0.376
RMS _{ML} (mm)	7.25±3.21	12.34±4.53	5.04±1.54	7.44±1.91	0.014	0.363	0.001	0.581	0.136	0.151
SP(mm)	520.74±138.64	696.16±146.56	279.41±39.84	468.14±140.35	<0.001	0.608	<0.001	0.640	0.858	0.002
SP _{AP} (mm)	301.66±104.42 ^①	502.12±193.12 ^{①②}	153.48±18.05	181.46±21.00	<0.001	0.669	0.004	0.454	0.022	0.322
SP _{ML} (mm)	329.96±75.23	417.13±83.84	203.30±32.62	346.68±58.28	0.002	0.508	<0.001	0.703	0.182	0.123

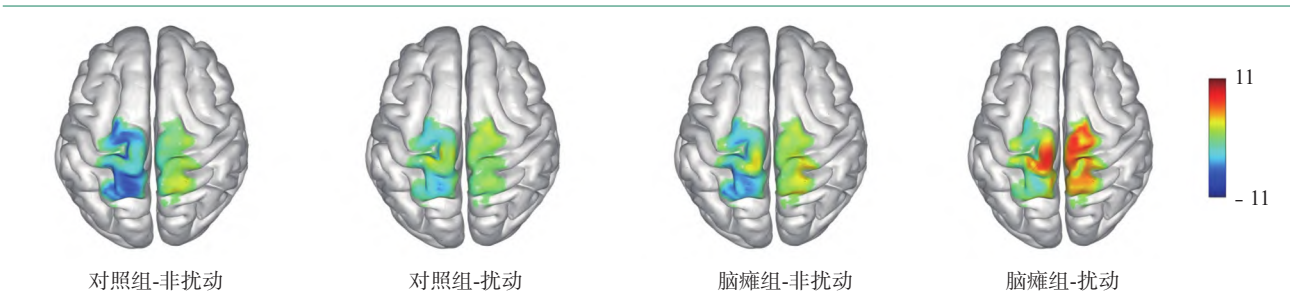
注:①同一任务组间差异具有显著性;②不同任务组内差异具有显著性,P<0.05。

表4 脑瘫组与对照组大脑皮层激活特征的对比 (x±s,×10⁻⁷mmol/L)

脑区及通道(ch)	脑瘫组		对照组		组别		扰动		组别×扰动	
	非扰动	扰动	非扰动	扰动	P值	η²p	P值	η²p	P值	η²p
辅助运动区										
1	- 6.1±12.29	- 4.48±11.22	- 8.66±7.03	- 5.1±8.48	0.741	0.008	0.135	0.152	0.564	0.024
3	- 2.20±8.18	1.29±11.98	- 8.43±7.39	- 3.86±10.43	0.226	0.103	0.040	0.267	0.766	0.007
11	2.48±18.73	7.17±17.57	- 0.36±8.57	2.77±6.23	0.599	0.020	0.040	0.268	0.657	0.014
12	2.96±9.05	10.36±8.66 ^{①②}	2.49±5.40	2.98±4.05	0.242	0.097	0.022	0.321	0.041	0.266
中央前回										
4	- 1.01±11.00	5.77±9.59	1.95±15.72	5.44±15.40	0.836	0.003	0.035	0.281	0.467	0.038
6	6.25±9.96	8.99±8.12	- 4.06±7.71	0.42±7.71	0.038	0.272	0.001	0.563	0.323	0.070
14	1.50±16.01	8.72±15.88 ^②	- 0.19±7.39	1.36±5.49	0.460	0.040	0.005	0.444	0.048	0.250
15	1.04±10.96	4.69±11.27 ^②	0.37±7.87	0.08±9.01	0.596	0.021	0.074	0.211	0.039	0.270
中央后回										
6	6.25±9.96	8.99±8.12	- 4.06±7.71	0.42±7.71	0.038	0.272	0.001	0.563	0.323	0.070
7	5.50±5.92	7.43±7.54	- 3.28±7.08	0.90±8.85	0.048	0.252	0.019	0.336	0.342	0.065
15	1.04±10.96	4.69±11.27 ^②	0.37±7.87	0.08±9.01	0.596	0.021	0.074	0.211	0.039	0.270
17	2.23±8.76	5.00±12.62	0.99±8.83	2.26±6.39	0.571	0.024	0.540	0.027	0.819	0.004
顶上小叶										
9	- 6.28±8.89	- 3.45±7.93	- 9.03±8.82	- 5.70±9.45	0.530	0.029	0.157	0.138	0.905	0.001
10	- 4.18±11.37	4.07±11.43	- 5.03±11.84	1.43±14.13	0.757	0.007	0.014	0.357	0.740	0.008
18	1.24±10.55	4.92±13.29	4.52±10.79	1.26±7.84	0.963	0.000	0.955	0.000	0.352	0.062
20	6.24±21.68	4.81±12.85	0.58±12.90	- 1.77±7.68	0.324	0.069	0.663	0.014	0.915	0.001

注:①同一任务组间差异具有显著性;②不同任务组内差异具有显著性,P<0.05。

图3 大脑皮层整体激活水平对比图



注:颜色越暖(红色)表示ΔHbO₂浓度越大,脑激活水平越高;颜色越冷(蓝色)表示ΔHbO₂浓度越小,脑激活水平越低。

3 讨论

本研究通过采用生物力学和fNIRS相结合的方法,对CP青少年和正常青少年的平衡能力和大脑皮层激活特征进行对比,旨在探讨CP青少年和正常青

少年平衡能力和大脑皮层激活水平的差异,为CP制定康复治疗策略提供理论依据和实践指导。本研究结果支持假设,外部扰动降低了TD和CP青少年的平衡能力、提高了CP青少年的大脑皮层激活程度,

扰动条件下CP青少年的平衡能力比TD青少年更差、大脑皮层激活程度更高。

3.1 平衡能力分析讨论

本研究结果显示,与TD青少年相比,CP青少年平衡能力较差,支持本研究第一个假设,这一发现与先前CP平衡控制的生物力学相关研究结果一致^[11,35]。Pierret等^[11]发现与TD儿童相比,CP儿童睁眼和闭眼状态站立时COP位移的摇摆面积、RMS和平均速度均显著较大。对健康人群来说,平衡的稳定性控制是自动化的,但对于CP等平衡稳定性较差的人群来说,这具有较大挑战性^[36]。一方面,CP站立表现为肌肉协调和运动反应的延迟、肌肉激活能力受限、肌肉共收缩等现象,这些神经肌肉反应的异常可能会降低CP恢复平衡稳定的能力^[37]。则CP平衡功能差可能主要由于CP肌肉活动的协调能力较差所致。另一方面,平衡控制主要由大脑初级运动皮层和视觉皮层、小脑、脑干以及基底节(尤其是壳核)参与支配^[38]。Forssberg等^[39]提出,与TD相比,CP大脑神经控制的发育严重迟缓,致使CP利用视觉信息维持姿势稳定时可能会产生自我干扰,这一现象在CP儿童中可能特别突出。因此,CP平衡障碍可能与脑功能发育异常和迟缓有关,进而限制了自身平衡控制调整能力^[40]。

本研究发现,扰动条件下CP组和TD组的Delta_{ML}无显著性差异,而CP组Delta_{AP}、RMS_{AP}、SP_{AP}显著大于TD组,表明CP青少年在AP方向的平衡控制较差,而ML方向的平衡能力未表现出一致的功能缺失,这可能与人体平衡控制的关节调节策略有关。研究表明人体在扰动条件下维持AP方向的平衡能力主要依靠踝关节策略,踝关节跖屈肌和背屈肌发挥主要作用^[36,41]。与TD相比,CP在平衡扰动中胫骨前肌和腓肠肌外侧头作为原动肌时激活延迟,表现出异常的激活时序^[42]。此外,CP踝关节远端肌肉的最大自主收缩力显著低于TD,从而影响CP平衡能力^[43]。因此,CP在AP方向平衡能力较差可能与踝关节的控制能力较差有关^[36]。

此外,本研究结果显示,与非扰动相比,扰动条件下CP青少年Delta_{AP}、Delta_{ML}、RMS、RMS_{AP}、SP_{AP}指标的值显著较大,即扰动条件下CP的平衡能力较差,支持本研究的假设。这表明扰动任务影响CP青

少年的平衡功能,这可能与平衡任务的难度增加有关。研究发现,随着任务难度的增加,健康青少年双足站立时姿势摇摆幅度增加、平衡能力下降^[44],与本研究结果一致。向后扰动时,膝关节由于受关节囊和周围韧带的限制而不产生运动,形成髌、踝关节耦合以维持身体平衡^[45]。此外,扰动后痉挛性CP维持稳定性的能力与特定方向平衡反应能力有关^[37]。由于CP的平衡反应受损,则其基本机制可能与对其扰动的神经反应有关。有研究表明向后扰动反应与惊跳反射具有共同的神经通路,向后平衡反应可能受反应时间的影响^[46]。

3.2 大脑皮层激活特征分析讨论

本研究结果显示,与对照组相比,扰动条件下CP组SMA(ch12)的脑激活水平显著较高,即SMA的神经激活量更大,CP需更多的神经资源来维持平衡。Kurz等^[23]通过测量在跑步机上行走时TD与CP的 ΔHbO_2 以量化大脑皮层激活量的差异,发现与TD相比,CP行走时PreCG、PoCG和SPL的激活水平显著较大,但SMA的激活水平无显著差异,与本研究结果不一致。其原因可能与运动任务的不同有关。大脑皮层区域的激活程度取决于任务的复杂程度,任务难度越高则需要的皮层激活水平越高^[47]。平衡是完成日常生活活动、运动的基础^[48]。因此,本研究中CP维持平衡时SMA的激活水平显著,而完成行走可能需更多其他皮层区域的激活。

本研究发现,TD维持平衡时大脑皮层激活水平较低,而CP大脑皮层激活水平较高,表明CP对大脑皮质的代谢需求增加,使血流动力学反应增加^[47]。这可能是由于对TD而言,动作任务相对简单,需要较少的激活即可完成运动^[24],而CP肌肉骨骼损伤、运动学习或神经系统感觉输入的异常,导致其完成相同平衡控制任务的难度增加,进而需要更多的皮层激活才能维持平衡^[23-24]。值得注意的是,本研究结果显示,CP大脑左、右半球的激活水平不同,且右脑感觉运动皮层的激活更为明显。这与先前研究结果一致,Carolina^[49]发现偏瘫CP使用受累侧肢体完成运动任务过程中,患侧大脑半球的激活显著增加。根据躯体运动区与感觉区“左右交叉”的支配特点^[50],左侧肢体受累严重的CP维持平衡时右脑需更大的激活来应对。

与非扰动相比,CP组扰动条件下维持平衡时SMA(ch12)、PreCG(ch14、ch15)和PoCG(ch15)的脑激活水平较高,支持本研究假设,即CP完成扰动任务时需更高的大脑皮层激活水平才可维持平衡,这一发现与先前研究结果相似^[33,51-52]。Herold等^[33]发现健康人在不稳定平面维持平衡时SMA、PreCG和PoCG的激活程度高于稳定平面。研究结果显示在具有挑战性的感觉运动任务中,高级皮层结构在维持姿势控制时发挥着重要作用。SMA高度参与简单和复杂运动任务的规划和执行,包括参与动作序列、学习、对运动的执行控制等^[53]。当平衡受到干扰时,下肢足踝运动控制的增强需更高的SMA激活^[54]。PreCG脑区主要管理全身骨骼肌的运动,初级运动皮质(M1)等运动皮层在与平衡控制相关的预期控制以及自主运动的启动方面发挥重要作用,还会在执行运动时整合前庭觉、躯体感觉和视觉信息;PoCG主要管理全身感觉^[50,55]。

本研究存在一定的局限性:①本研究选取的CP青少年属于特殊人群,受人群数量及纳入标准限制,选取的样本量较小,未来需进行更大样本的研究。②本研究仅包括12—18岁痉挛性偏瘫CP青少年,研究结果可能无法推广到其他年龄段和类型的CP,未来研究应进一步对多年龄段的各类型CP进行研究,有助于针对性制定改善CP青少年平衡能力的康复治疗方案。③平衡控制主要由肌肉骨骼系统、大脑皮层、皮层下结构、小脑、脑干共同作用,而本研究仅探讨平衡能力与大脑皮层激活特征,未来还可进行肌电活动、皮层下结构的相关研究以深入探究平衡调控作用的潜在机制。④大脑皮层激活特征的测试数据来源于fNIRS分析,后续还需更多关于脑瘫的fNIRS重测分析数据支持。

4 结论

受到外部扰动时,CP青少年前后方向的平衡能力降低,SMA、PreCG和PoCG激活水平增高。相比于TD青少年,CP青少年在外部扰动条件下前后方向的平衡能力较差,SMA激活水平较高。因此,我们建议未来为CP制定康复治疗时应着重于促进SMA、PreCG、PoCG的激活以提高其维持平衡和姿势稳定性的能力。

参考文献

- [1] Kurt EE. Definition, epidemiology, and etiological factors of cerebral palsy[EB/OL]. Cerebral Palsy - Current Steps, 2016. DOI: 10.5772/64768.
- [2] Damiano DL, Longo E. Early intervention evidence for infants with or at risk for cerebral palsy: an overview of systematic reviews[J]. Dev Med Child Neurol, 2021, 63(7): 771—84.
- [3] Vitrikas K, Dalton H, Breish D. Cerebral palsy: an overview[J]. Am Fam Physician, 2020, 101(4):213—20.
- [4] 唐久来, 秦炯, 邹丽萍, 等. 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—54.
- [5] Streja E, Miller JE, Wu C, et al. Disproportionate fetal growth and the risk for congenital cerebral palsy in singleton births[J]. PLoS One, 2017, 10(5):e0126743.
- [6] Burtner PA, Woollacott MH, Craft GL, et al. The capacity to adapt to changing balance threats: A comparison of children with cerebral palsy and typically developing children [J]. Dev Neurorehabil, 2007, 10(3):249—260.
- [7] Liao HF, Hwang AW. Relations of balance function and gross motor ability for children with cerebral palsy[J]. Percept Mot Skills, 2003, 96:1173—1184.
- [8] Gatica-Rojas V, Mendez-Rebolledo G, Guzman-Muñoz, et al. Does Nintendo Wii Balance Board improve standing balance? A randomized controlled trial in children with cerebral palsy[J]. Eur J Phys Rehabil Med, 2017, 53(4):535—544.
- [9] Nihan A, Ece ÜA, Damla C, et al. The effect of robotic rehabilitation on posture and trunk control in non-ambulatory cerebral palsy[J]. Assist Technol, 2022, 5:1—7.
- [10] Bickley C, Linton J, Sullivan E, et al. Comparison of simultaneous static standing balance data on a pressure mat and force plate in typical children and in children with cerebral palsy[J]. Gait Posture, 2019, 67:91—98.
- [11] Pierret J, Caudron S, Paysant J, et al. Impaired postural control of axial segments in children with cerebral palsy [J]. Gait Posture, 2021, 86:266—272.
- [12] Hirjaková Z, Bizovská L, Bzdúšková D, et al. Postural stability after treadmill and overground walking in young and elderly[J]. Gait Posture, 2020, 80:84—89.
- [13] Pollock CL, Ivanova TD, Hunt MA, et al. Motor unit recruitment and firing rate in medial gastrocnemius muscles during external perturbations in standing in humans[J]. J Neurophysiol, 2014, 112(7):1678—1684.
- [14] Robbins SM, Caplan RM, Aponte DI, et al. Test-retest reliability of a balance testing protocol with external perturbations in young healthy adults[J]. Gait Posture, 2017, 58: 433—439.
- [15] Sherman DA, Tim Lehmann, Baumeister J, et al. External focus of attention influences cortical activity associated with single limb balance performance[J]. Phys Ther, 2021, 101(12):pzab223.

- [16] Pavão SL, Santos AN, Woollacott MH, et al. Assessment of postural control in children with cerebral palsy: A review[J]. Res Dev Disabil, 2013, 34(5):1367—1375.
- [17] McIlvain G, Tracy JB, Chaze CA, et al. Brain stiffness relates to dynamic balance reactions in children with cerebral palsy[J]. J Child Neurol, 2020, 35(7):463—471.
- [18] Rosen AB, Yentes JM, McGrath ML, et al. Alterations in cortical activation among individuals with chronic ankle instability during single-limb postural control[J]. J Athl Train, 2019, 54(6):718—726.
- [19] Andreas M, Britta P, Thorben H, et al. Cortical correlates of human balance control[J]. Brain Topogr, 2017, 30(4):434—446.
- [20] 吴毅. 近红外光学技术在脑功能成像和神经调控中的应用[J]. 中国康复医学杂志, 2024, 39(2):153—156.
- [21] Sukal-Moulton T, de Campos AC, Stanley CJ, et al. Functional near infrared spectroscopy of the sensory and motor brain regions with simultaneous kinematic and EMG monitoring during motor tasks[J]. J Vis Exp, 2014, 5(94):52391.
- [22] Dong Y, Mao M, Wu Y, et al. Frontal and parietal cortices activation during walking is repeatable in older adults based on fNIRS[J]. Heliyon, 2024, 10(9):e30197.
- [23] Kurz MJ, Wilson TW, Arpin DJ. An fNIRS exploratory investigation of the cortical activity during gait in children with spastic diplegic cerebral palsy[J]. Brain Dev, 2014, 36(10):870—877.
- [24] Sukal-Moulton T, de Campos AC, Alter KE, et al. Relationship between sensorimotor cortical activation as assessed by functional near infrared spectroscopy and lower extremity motor coordination in bilateral cerebral palsy[J]. Neuroimage Clin, 2018, 20:275—285.
- [25] Rojas VG, Rebollo GM, Muñoz EG, et al. Differences in standing balance between patients with diplegic and hemiplegic cerebral palsy[J]. Neural Regen Res, 2013, 8(26):2478—2483.
- [26] Surkar SM, Hoffman RM, Harbourne R, et al. Cognitive-motor interference heightens the prefrontal cortical activation and deteriorates the task performance in children with hemiplegic cerebral palsy[J]. Arch Phys Med Rehabil, 2021, 102(2):225—232.
- [27] Cho C, Hwang W, Hwang S, et al. Treadmill training with virtual reality improves gait, balance, and muscle strength in children with cerebral palsy[J]. Tohoku J Exp Med, 2016, 238(3):213—218.
- [28] Harri P, Pekka KJ, Helena M, et al. The gait is less stable in children with cerebral palsy in normal and dual-task gait compared to typically developed peers[J]. J Biomech, 2021, 117:110244.
- [29] Tian F, Delgado MR, Dhamne SC, et al. Quantification of functional near infrared spectroscopy to assess cortical reorganization in children with cerebral palsy[J]. Opt Express, 2010, 18(25):25973—25986.
- [30] Klem GH, Lüders HO, Jasper HH, et al. The ten-twenty electrode system of the International Federation[J]. Electroencephalogr Clin Neurophysiol, 1958, 10:371—375.
- [31] Bamber ZA, Sun W, Menon RS, et al. Functional electrical stimulation of peroneal muscles on balance in healthy females[J]. Cyborg and Bionic Systems, 2021, 2021:9801097.
- [32] Donker SF, Ledebt A, Roerdink M, et al. Children with cerebral palsy exhibit greater and more regular postural sway than typically developing children[J]. Exp Brain Res, 2008, 184(3):363—370.
- [33] Herold F, Orlowski K, Bormel S, et al. Cortical activation during balancing on a balance board[J]. Hum Mov Sci, 2017, 51:51—58.
- [34] Prieto TE, Myklebust JB, Hoffmann RG, et al. Measures of postural steadiness: differences between healthy young and elderly adults[J]. IEEE Trans Biomed Eng, 1996, 43(9):956—966.
- [35] Schmit J, Riley M, Cummins-Sebree S, et al. Children with cerebral palsy effectively modulate postural control to perform a supra-postural task[J]. Gait Posture, 2015, 42(1):49—53.
- [36] Ferdjallah M, Harris GF, Smith P, et al. Analysis of postural control synergies during quiet standing in healthy children and children with cerebral palsy[J]. Clin Biomech, 2002, 17(3):203—210.
- [37] Crenshaw JR, Petersen DA, Conner BC, et al. Anteroposterior balance reactions in children with spastic cerebral palsy[J]. Dev Med Child Neurol, 2020, 62(6):700—708.
- [38] Taube W, Mouthon M, Leukel C, et al. Brain activity during observation and motor imagery of different balance tasks: An fMRI study[J]. Cortex, 2015, 64:102—114.
- [39] Forssberg H. Neural control of human motor development[J]. Curr Opin Neurobiol, 1999, 9(6):676—682.
- [40] Bar-Haim S, Al-Jarrah MD, Nammourah I, et al. Mechanical efficiency and balance in adolescents and young adults with cerebral palsy[J]. Gait Posture, 2013, 38(4):668—673.
- [41] Winter DA, Prince F, Frank JS, et al. Unified theory regarding A/P and M/L balance in quiet stance[J]. J Neurophysiol, 1996, 75(6):2334—2343.
- [42] Tedroff K, Knutson LM, Soderberg GL. Synergistic muscle activation during maximum voluntary contractions in children with and without spastic cerebral palsy[J]. Dev Med Child Neurol, 2006, 48(10):789—796.
- [43] Roncesvalles MN, Woollacott MW, Burtner PA. Neural factors underlying reduced postural adaptability in children with cerebral palsy[J]. Neuroreport, 2002, 13(18):2407—2410.
- [44] Gebel A, Lehmann T, Granacher U. Balance task difficulty affects postural sway and cortical activity in healthy ado-

(下转第1168页)

- 后盆底康复措施及实施方案[J]. 中国实用妇科与产科杂志, 2015, 31(6):522—529.
- [4] 刘诗琪, 彭莉. 女性盆底功能康复方法研究进展[J]. 保健医学研究与实践, 2021, 18(2):99—103.
- [5] 谢幸. 妇产科学:9版[M]. 北京:人民卫生出版社, 2018: 278—286.
- [6] 董凌燕, 陶茜, 龚成, 等. 女性盆底功能障碍性疾病的发病机制和康复治疗的研究进展[J]. 中外医学研究, 2023, 21(36):180—184.
- [7] 高洁, 苑翠翠, 常洪坤, 等. 阴道分娩后超声检查盆腔组织器官解剖参数变化与患者盆底功能障碍性疾病相关性研究[J]. 陕西医学杂志, 2024, 53(2):189—193, 198.
- [8] Zhu L, Yu S, Xu T, et al. Validation of the Chinese version of the Pelvic Organ Prolapse/Urinary Incontinence Sexual Questionnaire short form (PISQ-12) [J]. Int J Gynaecol Obstet, 2012, 116(2):117—119.
- [9] 李洁, 高桂香, 屈敏, 等. Glazer评估未育女性盆底功能障碍性疾病的康复治疗效果及临床意义[J]. 中国医疗美容, 2023, 13(2):18—20.
- [10] Zhang L, Zhao S, Wu S, et al. Application of four-dimensional pelvic floor ultrasound in the diagnosis of postpartum pelvic floor dysfunction and evaluation of curative effect[J]. Altern Ther Health M, 2024:AT9881.
- [11] 朱瑞森. 磁电刺激联合治疗女性产后压力性尿失禁的疗效分析[D]. 青岛:青岛大学, 2023.
- [12] 王丽霞, 戚琰红. 早期盆底康复训练联合补中益气丸对产后女性盆底功能障碍的干预效果分析[J]. 中国妇幼保健, 2022, 37(15):2737—2740.
- [13] 张惠文, 付婷婷, 赵淑萍, 等. 电刺激生物反馈及阴道哑铃 Kegel 锻炼治疗产后盆底功能障碍性疾病的临床效果分析[J]. 实用妇产科杂志, 2020, 36(11):864—867.
- [14] 唐虹, 张瑜, 游丽娇, 等. 盆底康复治疗仪结合中医辨证治疗产后盆底功能障碍性疾病的临床研究[J]. 现代生物医学进展, 2020, 20(12):2346—2350.
- [15] 朱淑庆, 吕菲菲, 刘梦泽, 等. 四维盆底超声在磁电联合治疗压力性尿失禁疗效评估中的价值[J]. 中国妇产科临床杂志, 2023, 24(3):315—316.
- [16] 吕小娟, 张琳, 唐佳松. 磁电联合治疗绝经后女性盆腔器官脱垂的临床疗效观察[J]. 中国老年学杂志, 2020, 40(11): 2381—2385.
- [17] 张冉, 张明, 刘凤平, 等. 磁电联合综合盆底康复治疗对盆底松弛患者的疗效观察[J/OL]. 中华临床医师杂志, 2021, 15(9):646—651.
- [18] Filippini M, Biordi N, Curcio A, et al. A qualitative and quantitative study to evaluate the effectiveness and safety of magnetic stimulation in women with urinary incontinence symptoms and pelvic floor disorders[J]. Medicina-Lithuania, 2023, 59(5):879.
- [19] Zhang L, Lv XJ, Tang J. Efficacy of pelvic floor magnetic stimulation combined with electrical stimulation on postpartum pelvic organ prolapse: a retrospective study[J]. Pelviperineology, 2021, 39(1):18—23.

(上接第 1162 页)

- lescents[J]. Exp Brain Res, 2020, 238(5):1323—1333.
- [45] Henry SM, Fung J, Horak FB. Control of stance during lateral and anterior/posterior surface translations[J]. IEEE Trans Rehabil Eng, 1998, 6(1):32—42.
- [46] Nonnekens J, Scotti A, Nijhuis LBO, et al. Are postural responses to backward and forward perturbations processed by different neural circuits?[J]. Neuroscience, 2013, 245: 109—120.
- [47] Kurz MJ, Wilson TW, Arpin DJ. Stride-time variability and sensorimotor cortical activation during walking[J]. NeuroImage, 2012, 59(2):1602—1607.
- [48] Paillard T. Plasticity of the postural function to sport and/or motor experience[J]. Neurosci Biobehav Rev, 2017, 72: 129—152.
- [49] Ana Carolina de Campos, Theresa Sukal-Moulton, Theodore Huppert, et al. Brain activation patterns underlying upper limb bilateral motor coordination in unilateral cerebral palsy: an fNIRS study[J]. Dev Med Child Neurol, 2020, 62(5):625—632.
- [50] 丁文龙, 刘学政. 系统解剖学[M]. 北京:人民卫生出版社, 2018.
- [51] Mihara M, Miyai I, Hattori N, et al. Cortical control of postural balance in patients with hemiplegic stroke[J]. Neuroreport, 2012, 23(5):314—319.
- [52] Mihara M, Miyai I, Hatakenaka M, et al. Role of the prefrontal cortex in human balance control[J]. Neuroimage, 2008, 43(2):329—336.
- [53] Hupfeld KE, Ketcham CJ, Schneider HD. Transcranial direct current stimulation (tDCS) to the supplementary motor area (SMA) influences performance on motor tasks[J]. Exp Brain Res, 2017, 235(3):851—859.
- [54] Sahyoun C, Floyer-Lea A, Johansen-Berg H, et al. Towards an understanding of gait control: brain activation during the anticipation, preparation and execution of foot movements[J]. NeuroImage, 2004, 21(2):568—575.
- [55] Takakusaki K. Functional neuroanatomy for posture and gait control[J]. J Mov Disord, 2017, 10(1):1—17.