

双重任务介入对人体静态平衡和动态稳定性的影响*

刘鑫玥¹ 霍洪峰^{1,2,3}

跌倒导致老年人死亡和伤残的主要危险因素之一,每年约三分之一65岁以上老年人至少经历1次跌倒,并且有高达90%以上的髌关节骨折是由跌倒引发的,导致人体运动功能受损,社会参与受限,直接降低日常生活质量^[1-2]。良好的姿势控制能力是维持日常生活活动的基础,也是有效预防跌倒的必要因素。老年人及神经系统障碍患者运动控制水平下降,神经协调能力不足,步态异常,行走稳定性下降,增加其跌倒风险^[3]。为科学有效地预防跌倒发生,姿势控制的神经力学机制逐渐受到研究者的关注。双任务研究范式是指在姿势控制的同时完成一项认知任务或其他运动任务,贴切日常生活活动的多任务情景,可以激发姿势控制的真实潜能,用于检查认知与神经肌肉控制之间的相互作用^[4]。目前,国内外越来越多的研究探究双重任务的介入对姿势控制的影响。有研究证实,双重任务的介入可以整合认知资源,优化中枢神经系统的自动化水平,增强姿势稳定性^[5-7],也有研究认为,第二任务的介入会争夺姿势控制注意力资源导致平衡控制及稳定能力下降^[8-10]。现有研究多集中单一认知任务介入或单一运动任务介入对姿势控制的影响,且量化指标也不尽相同,不同任务类型及任务负荷对姿势控制的影响研究还比较少。本研究通过对比不同任务类型及不同任务负荷对人体静态平衡和动态稳定性的影响差异,探究双重任务介入对人体姿势控制的影响,了解神经肌肉控制与认知的交互作用,为预防跌倒和姿势控制康复训练提供理论基础和科学依据。

1 对象与方法

1.1 实验对象

在河北师范大学招募40名普通男性大学生,将实验内容详细说明后,均自愿参加实验,并签署知情同意书。受试者年龄(23.6±1.2)岁,身高(1.78±0.03)m,体重(72.09±5.40)kg,体质指数22.74±1.10,优势侧为右侧。纳入标准:①所有受试者近半年内上下肢均未发生过损伤,身体健康状况良好;②无动、静态平衡控制障碍(站立平衡达到二级及以上水平且具有持物完成10m步行测试能力);③意识清楚,无认知

障碍(MoCA量表得分≥26分),可以理解实验要求并顺利配合完成实验。排除标准:①因上下肢骨折、畸形,无法持水杯站立或正常行走者;②意识不清,存在精神障碍或智力障碍,无法配合完成实验者。

1.2 实验仪器

1.2.1 三维动作捕捉系统:美国Motion公司生产的八镜头三维运动捕捉系统(像素2352×1728,采集频率120Hz)用来采集人体行走过程中的运动学数据。

1.2.2 静态平衡测试仪:采用芬兰HUR Labs研发的iBalance平衡测试训练仪来测试人体在软垫上不同双任务介入时站立的静态平衡能力。

1.2.3 其他设备:采用装有不同容量水的玻璃水杯和随机数生成器APP,来完成运动双任务和认知双任务干预。

1.3 方法

1.3.1 运动任务:运动任务负荷梯度采用持不同容量水的玻璃水杯进行。1倍运动负荷行走时受试者需持有250ml水的水杯,2倍运动负荷行走时受试者需要持有500ml水的水杯,且保证行走过程中水杯中的水不洒出,算作一次成功的实验数据。

1.3.2 认知任务:认知任务负荷梯度采用n-back听觉语言认知任务完成。应用随机数生成器APP生成10个2位数的随机数,实验人员依次念出并随机停止。1倍认知负荷行走时,受试者需要回答出完整随机数列的倒数第二个数字,2倍认知负荷行走时,需要回答出完整随机数列的倒数第三个数字。

1.3.3 实验流程:所有实验测试均在视线良好,环境安静的生物力学实验室完成,正式实验开始前,通过踢足球来确定优势侧。受试者均穿着紧身衣,休闲鞋,并由实验人员在其身体相应部位贴好29个反光球。实验人员向受试者讲述实验要求,并通过随机数生成器APP确定每位受试者四种双任务站立或行走的实施顺序。

1.3.3.1 静态平衡测试:实验人员调试好仪器并将软垫置于静态平衡测试仪上,通知受试者准备脱鞋,坐于测试仪器旁。认知双任务站立:受试者赤足自然立于有软垫的平衡测试台上,双臂自然下垂,两眼平视前方,实验人员念出随机数列的同时开始测试,停止念数时受试者回答出正确答案。随

DOI:10.3969/j.issn.1001-1242.2024.04.021

*基金项目:河北省科技支撑项目(16275709);河北省专业学位研究生教学案例建设项目(KCJSZ2020031)

1 河北师范大学体育学院,石家庄市,050024; 2 河北省人体运动生物信息测评重点实验室; 3 通讯作者
第一作者简介:刘鑫玥,女,硕士研究生; 收稿日期:2022-03-05

之再次开始念数,停止,回答答案,直到完成测试时间30s,记录下相应的静态平衡指标;运动双任务站立:受试者赤足自然站立在平衡测试台上,优势侧手持水杯,另一侧自然下垂。双眼平视前方。实验人员提示“开始”时,进行仪器数据采集30s。每次双任务站立分别采集3次有效数据,取其平均值进行统计学分析,不同双任务站立需间歇2min。

1.3.3.2 动态稳定性测试:实验人员调试好实验仪器后,通知受试者站立在指定区域内等待指令。认知双任务步行:实验人员念出随机数数列的同时受试者开始步行并进行数据采集,数列结束随之回答出正确答案并停止步行,结束采集;运动双任务步行:受试者优势侧手握持水杯,当实验人员提示“开始”后受试者开始步行并采集数据,到达指定区域时自然停止并结束采集,全程无其他言语或认知任务干扰。每种双任务步行状态分别采集3次有效数据取其平均值用于统计学分析,不同双任务步行需间歇2min。

1.4 主要观测指标

1.4.1 静态平衡指标:重心轨迹长度:压力中心所行进的全部长度总和;包络面积:压力中心轨迹所包含的最大闭合面积;重心轨迹平均速度:单位时间内的压力中心轨迹长度;数值越小表示静态平衡能力越强。

1.4.2 动态稳定性指标:动态稳定裕度:外推质心与支撑基底面边缘之间的最短距离,其值为正值表示人体处于稳定状态,为负值时则相反,且绝对值越大,表示外推质心与支撑边缘距离越长,动态稳定性则越差。计算公式为:

$$\omega_0 = \sqrt{g/l}$$
$$CM = dCoM + vCoM/\omega_0$$
$$MoS = B_{\max} - CM$$

ω_0 为人体倒置钟摆模型的固有频率, g 为重力加速度(9.8N/kg), l 表示人体质心到地面的垂直距离, CM 为推算出的质心位置, $dCoM$ 、 $vCoM$ 分别表示某时刻质心的位移和速度; MoS 为某时刻的动态稳定裕度, $B_{\max}$ 表示为支撑面某

一方向上边界的最大值^[11-12](本文采用非优势腿脚尖与脚跟marker点前后方向的中点坐标表示)。

1.5 统计学分析

统计学分析采用统计软件SPSS 25.0,所得参数值以平均值±标准差表示。采用Shapiro-Wilk法对数据进行正态分布检验,用Levene检验数据方差齐性。采用双因素重复测量方差分析双任务类型(认知任务和运动任务)和任务负荷(简单任务和困难任务)对人体静态平衡和动态稳定性的影响以及两者之间的交互作用, $P<0.05$ 认为差异具有显著性意义。

2 结果

2.1 静态平衡指标

不同双重任务介入时人体静态平衡指标见表1,数据均服从正态分布并满足方差齐性,统计分析结果显示各静态平衡指标在任务类型和任务负荷之间不存在交互效应(表2)。重复测量方差分析表明认知双任务重心轨迹长度、重心轨迹平均速度大于执行运动双任务($P<0.05$),包络面积的变化差异不具有显著性。简单双任务负荷重心轨迹长度、包络面积、重心轨迹平均速度大于困难双任务负荷($P<0.05$)。

2.2 动态稳定性指标

不同双重任务介入时人体脚跟触地时刻动态稳定裕度数据均服从正态分布并满足方差齐性,统计分析结果显示脚跟触地时刻动态稳定裕度在任务类型和任务负荷之间存在交互效应($P<0.05$,表2)。任务类型简单效应检验结果表明简单认知双任务动态稳定裕度(-0.30±0.02)大于简单运动双任务($F=8.679, P=0.004$),困难认知双任务动态稳定裕度(-0.29±0.01)小于困难运动双任务(-0.28±0.04)($F=10.225, P=0.002$)。任务负荷简单效应检验结果表明,简单认知双任务动态稳定裕度小于困难认知双任务($F=1.893, P=0.173$),简单运动双任务动态稳定裕度(-0.32±0.03)小于困难运动双任务($F=153.35, P<0.001$)。

表1 双重任务介入人体静态平衡指标

($\bar{x}\pm s, n=40$)

项目	认知双任务步行		运动双任务步行	
	简单	困难	简单	困难
重心轨迹长度(mm)	271.96±34.64	268.13±43.76 ^①	252.84±30.12 ^②	235.77±45.08 ^{①②}
包络面积(mm ²)	241.50±74.44	224.80±98.50 ^①	236.94±103.73	175.65±89.28 ^①
重心轨迹平均速度(mm/s)	9.07±1.16	8.94±1.46 ^①	8.43±1.00 ^②	7.86±1.50 ^{①②}

注:①与简单双任务负荷比较 $P<0.05$;②与认知双任务类型比较 $P<0.05$ 。

表2 静态平衡指标和动态稳定性指标的
双因素重复测量方差分析

项目	任务类型		负荷类型		交互效应	
	F值	P值	F值	P值	F值	P值
重心轨迹长度(mm)	11.849	0.001	5.521	0.021	2.215	0.141
包络面积(mm ²)	2.802	0.098	9.087	0.003	2.970	0.089
重心轨迹平均速度(mm/s)	11.814	0.001	5.615	0.020	2.206	0.142
脚跟触地时刻(m)	0.112	0.739	94.66	<0.001	60.58	<0.001

3 讨论

步行时能同时执行其他认知任务或运动任务是人体完成独立生活的必要条件。本研究通过评估不同类型以及不同负荷双重任务介入对人体静态平衡和动态稳定性的影响差异,探究双重任务干扰对人体姿势控制的影响。

静态平衡能力是指人体在没有外力干扰情况下,控制身

体重心在一定支撑面积内维持特定姿势的能力,这种能力依赖于人体感受器官的信息输入、中枢神经系统的信息整合以及肌肉骨骼系统的信息执行^[13]。认知任务介入或同时执行其他运动任务均可能对静态平衡控制产生影响。本研究结果显示,运动任务介入时人体重心轨迹长度、重心轨迹平均速度均小于认知任务介入,这表明与认知任务介入相比,运动任务介入会增强人体静态平衡能力。这与之前的研究结果部分一致^[14-15],认知任务的介入会损害人体平衡控制能力,但均未对比认知任务与运动任务对人体静态平衡的影响差异。在双任务研究范式中,运动任务类型缺乏专业客观的划分标准,表现效果不容易量化导致运动双任务研究广度受限^[16]。运动任务的介入对人体静态平衡能力产生积极影响,可能是因为平衡姿势控制与其他运动任务的完成均属于神经肌肉控制系统,增强了姿势控制的神经肌肉反射,也可能是因为与认知任务相比,运动任务占用的注意力资源较小,对姿势控制产生的干扰较小,这也提示在之后的研究以及康复方案应用中可以考虑运动任务介入的优势。本研究还探究了不同负荷双任务介入对人体静态平衡能力的影响,结果表明,与简单双任务介入相比,困难双任务介入的静态平衡控制能力更好。Riley等^[17]探究短期记忆任务对人体姿势控制可变性的影响,也表示随着认知负荷的增加,左右方向姿势摆动的可变性降低。复杂的双重任务介入可能会需要消耗更多的认知资源,从而减少机体主动控制静态平衡的认知资源分配比例,间接激发了姿势控制的随机性^[18]。刘丹等^[19]探究认知任务介入对人体静态稳定性的影响,认为低负荷认知任务介入对人体静态稳定性有益,这与本研究结果不一致,可能是因为双任务类型选择的差异或者双任务负荷层级不敏感,导致研究结果出现偏差。

动态稳定性是中枢神经系统与运动器官共同工作、协同配合的结果,是人正常生活工作的基本要求之一,人体重心位置和速度的综合考虑对动态稳定性评价尤为重要,Hof等^[20]探究人体行走时的横向平衡控制认为,人体在平地自然行走,脚跟着地时,动态稳定能力最差。Bosse等^[21]认为,在楼梯行走测试中人体不同支撑时相相互转换时刻最不稳定。本研究选取人体行走过程中脚跟触地时刻左右方向动态稳定裕度来评价双重任务介入时人体动态稳定性的变化。双重任务类型简单效应分析结果显示,双重任务负荷较低时,认知双任务动态稳定裕度绝对值小于运动双任务。双重任务负荷较高时,认知双任务动态稳定裕度绝对值大于运动双任务。这表明低负荷双重任务介入时,相比运动双任务,认知双任务更稳定,高负荷双重任务介入时,认知任务不稳定。之前有研究表明^[22],第二任务负荷较低时,对姿势控制会产生积极影响。Zheng H等^[23]在探究双重任务介入对人体下楼梯动态稳定性影响认为下楼梯时数学计算任务介

入会降低人体动态稳定性。不同认知双任务介入,对姿势控制产生不同影响,这与本研究结果一致。Lacour等^[24]提出U型非线性的相互作用模型解释这个现象,他认为姿势稳定性的增强或减弱取决于第二任务的复杂性,当第二任务简单时,占用的注意力资源较少,双任务干扰现象不明显,增强姿势稳定性,随着第二任务复杂性增加,消耗的认知资源逐渐增多,超过人体总的注意力资源时,会损害人体的姿势控制,降低动态稳定性。另外,本研究还分析了双重任务负荷的简单效应,结果显示,在执行运动任务时,简单双任务动态稳定裕度绝对值大于困难双任务。即在执行运动双任务时,困难负荷双任务的动态稳定性更好。这与上述研究结果一致。当执行困难运动双任务时,为保证动态姿势控制与运动任务同时完成,机体可能会充分调动中枢神经肌肉控制,激活相关肌肉的紧张性,选取较谨慎的步态模式,降低步速,改变步态参数等,进而增强行走过程中的动态稳定性。综上所述,在低负荷双重任务介入时,认知双任务更稳定;在高负荷双重任务介入时,运动双任务更稳定。这提示在制定特殊人群动态姿势控制相关康复诊疗计划时可能需要考虑双重任务负荷以及任务类型的合理选配,当患者自身能力较差时,只能接受低负荷的双重任务训练,建议选择认知任务增强动态稳定性;当患者身体功能恢复到一定水平时,可以接受较高负荷双重任务训练,建议选择运动任务增强动态稳定性。

4 结论

双重任务类型以及任务负荷会对人体姿势控制产生不同影响。在本实验条件下,相比认知双重任务,运动双重任务介入会增强人体静态稳定性,高负荷双重任务比低负荷双重任务更能促进人体静态平衡能力;对于动态姿势控制,任务类型和任务负荷存在一定的交互效应,任务负荷简单时,认知双重任务介入可以促进人体动态稳定性,增加任务负荷后,运动双重任务介入会表现出更高的动态姿势控制能力。

参考文献

- [1] Muir-Hunter SW, Wittwer JE. Dual-task testing to predict falls in community-dwelling older adults: a systematic review[J]. *Physiotherapy*, 2016,102(1):29—40.
- [2] 李世明, Tanvi Bhatt. 人体动态稳定性理论及防跌倒扰动性训练进展[J]. *体育科学*, 2011,31(4):67—74.
- [3] 徐欣, 温子星. 人体动态稳定性控制理论在老年人防跌倒中的应用[J]. *中国康复理论与实践*, 2017,23(11):1254—1257.
- [4] Tramontano M, Morone G, Curcio A, et al. Maintaining gait stability during dual walking task: effects of age and neurological disorders[J]. *Eur J Phys Rehabil Med*, 2017,53(1):7—13.
- [5] Madhekhaksar F, Egges A. Effect of dual task type on gait

- and dynamic stability during stair negotiation at different inclinations[J]. *Gait Posture*, 2015, 9(9):4566—4571.
- [6] Morioka S, Hiyamizu M, Yagi F. The effects of an attentional demand tasks on standing posture control[J]. *J Physiol Anthropol Appl Human Sci*, 2005, 24(3):215—219.
- [7] Zhang C, Song Q, Sun W, et al. Dynamic stability of older adults under dual task paradigm during stair descent[J]. *Motor Control*, 2020, 24(1):113—126.
- [8] 郑慧芬, 孙威, 宋祺鹏, 等. 手机任务介入对下楼梯行走动态稳定性的影响[J]. *中国运动医学杂志*, 2021, 40(7):528—535.
- [9] 王疆娜, 郑慧芬, 孙威. 下楼梯行走执行手机任务时下肢动态稳定性、运动协调性及关节力学的变化[J]. *中国组织工程研究*, 2021, 25(6):837—843.
- [10] Hyndman D, Ashburn A, Yardley L, et al. Interference between balance, gait and cognitive task performance among people with stroke living in the community[J]. *Disabil Rehabil*, 2006, 28(13—14): 849—856.
- [11] Tisserand R, Armand S, Allali G, et al. Cognitive-motor dual-task interference modulates mediolateral dynamic stability during gait in post-stroke individuals[J]. *Hum Mov Sci*, 2018, 58: 175—184.
- [12] 梁雷超, 黄灵燕, 伍颢, 等. 膝关节关节炎对女性老年人步行动态稳定性的影响[J]. *体育科学*, 2016, 36(3):61—66.
- [13] 游永豪, 温爱玲. 人体平衡能力测评方法[J]. *中国康复医学杂志*, 2014, 29(11):1099—1104.
- [14] Broglio SP, Tomporowski PD, Ferrara MS. Balance performance with a cognitive task: a dual-task testing paradigm [J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2005, 37(4):689—695.
- [15] Bergamin M, Gobbo S, Zanotto T, et al. Influence of age on postural sway during different dual-task conditions [J]. *Front Aging Neurosci*, 2014, 6: 271.
- [16] Asai T, Misu S, Doi T, et al. Effects of dual-tasking on control of trunk movement during gait: respective effect of manual- and cognitive-task[J]. *Gait Posture*, 2014, 39(1): 54—59.
- [17] Riley MA, Baker AA, Schmit JM, et al. Effects of visual and auditory short-term memory tasks on the spatiotemporal dynamics and variability of postural sway[J]. *J Mot Behav*, 2005, 37(4):311—324.
- [18] 朱婷, 安丙辰, 梁贞文, 等. 认知对姿势控制能力影响的研究进展[J]. *中华老年病研究电子杂志*, 2015, 2(1): 35—38.
- [19] 刘丹, 陆阿明. 双重认知任务介入对人体静态稳定性的影响 [J]. *湖北体育科技*, 2019, 38(10): 903—909.
- [20] Hof AL, Van Bockel RM, Schoppen T, et al. Control of lateral balance in walking-experimental findings in normal subjects and above-knee amputees[J]. *Gait Posture*, 2007, 25(2):250—258.
- [21] Bosse I, Oberländer KD, Savelberg HH, et al. Dynamic stability control in younger and older adults during stair descent[J]. *Human Mov Sci*, 2012, 31(6):1560—1570.
- [22] Huxhold O, Li SC, Schmiedek F, et al. Dual-tasking postural control: aging and the effects of cognitive demand in conjunction with focus of attention[J]. *Brain Res Bull*, 2006, 69(3):294—305.
- [23] Zheng H, Song Q, Zhang C, et al. The effect of text-based math task on dynamic stability control during stair descent[J]. *J Biomech*, 2020, 113:110088.
- [24] Lacour M, Bernard-Demanze L, Dumitrescu M. Posture control, aging, and attention resources: models and posture-analysis methods[J]. *Neurophysiol Clin*, 2008, 38(6): 411—421.