

基于矢量编码技术研究负重时楼梯行走时协调性和变异性

方玉铃¹, 高原², 焦培豪¹, 孙 阳¹, 张星辰¹

(1.燕山大学 体育学院, 河北 秦皇岛 066004; 2.燕山大学 河北省智能康复及神经调控重点实验室, 河北 秦皇岛 066004)

摘 要: **目的** 利用矢量编码技术量化分析负重楼梯行走时下肢协调性及变异性。**方法** 通过三维动作捕捉系统与测力台, 采集 16 名男性在正常与负重状态下楼梯行走的下肢运动学数据, 运用矢量编码方法计算关节间耦合角及耦合角标准差。**结果** 与对照组相比, 负重组在冠状面呈现不同协调模式: 摆动后期髌—膝耦合中, 手提负重呈远端协调, 对照组为反相; 膝—踝耦合中, 手/肩扛负重以反相为主, 捆持负重呈近端协调; 负重反应期髌—膝耦合中, 肩扛负重为近端协调, 对照组为同相。负重组在摆动前期矢状面内髌—膝耦合变异性更高, 在摆动前期和负重反应期冠状面内髌—膝、膝—踝耦合变异性亦显著增大。**结论** 矢量编码技术可有效识别负重下楼行走的下肢协调变化。不同负重方式诱发特定协调模式, 可能增加膝关节损伤风险; 协调变异性的普遍提高反映运动控制适应性改变, 或影响步态稳定性。

关键词: 楼梯行走; 负重; 矢量编码; 协调性; 变异性

中图分类号: G804.6 文献标识码: A 文章编号: 1003-983X(2026)01-0113-06

DOI: 10.20185/j.cnki.1003-983X.2026.01.019

Study on Coordination and Variability During Loaded Stair Walking Based on Vector Coding Technology

FANG Yuling¹, GAO Yuan², JIAO Peihao¹, SUN Yang¹, ZHANG Xingchen¹

(1.Yanshan University, School of Physical Education, Qinhuangdao Hebei, 066004; 2. Yanshan University, Key Lab of Intelligent Rehabilitation and Neuroregulation in Hebei Province, Qinhuangdao Hebei, 066004)

Abstract: **Objective** To quantify lower limb coordination and variability during loaded stair walking using vector coding technique. **Methods** Kinematic data were collected from 16 male participants during stair walking under normal and loaded conditions using a three-dimensional motion capture system and force plates. Inter-joint coupling angles and their standard deviations were calculated using the vector coding method. **Results** Compared to the control group, the loaded group exhibited different coordination patterns in the frontal plane: during late swing phase in hip-knee coupling, hand-carried load showed distal coordination, while the control group demonstrated anti-phase coordination; in knee-ankle coupling, hand/shoulder-carried loads primarily exhibited anti-phase coordination, whereas chest-held load displayed proximal coordination; during weight acceptance phase in hip-knee coupling, shoulder-carried load presented proximal coordination, in contrast to the in-phase coordination of the control group. The loaded group also demonstrated higher hip-knee coupling variability in the sagittal plane during early swing phase, and significantly increased variability in hip-knee and knee-ankle coupling in the frontal plane during both early swing and weight acceptance phases. **Conclusion** The vector coding technique effectively identifies changes in lower-limb coordination during loaded stair descent. Different loading modes elicit specific coordination patterns that may increase the risk of knee injury, while the overall increase in coordination variability reflects adaptive changes in motor control, potentially compromising gait stability.

Keywords: stair walking; loaded; vector coding; coordination; variability

收稿日期: 2025-07-28

第一作者简介: 方玉铃(2001~), 女, 河南信阳人, 在读硕士, 研究方向: 运动生物力学。

通信作者简介: 高原(1978~), 男, 河北秦皇岛人, 博士, 副教授, 研究方向: 运动生物力学, E-mail: gaoyuan1107@163.com。

在进行负载运输时, 步行是最常见的运输方式^[1]。研究表明, 外部负载会显著影响步态特征^[2], 同时可能增加步宽变异性并降低局部动态稳定性^[3-4]。鉴于跌倒事故多由姿势稳定性丧失引发^[1], 表明负载是意外跌倒的一个潜在危险因素。这一风险在楼梯行走场景中被进一步放大, 相较于平地行走, 楼梯行走对体能和姿势控制的要求显著提高^[5]。因此, 楼梯成为人类日常环境中最危险的地方之一^[6]。研究指出, 楼梯行走中发

生的跌倒可能导致严重后果,包括高死亡率或残疾等^[7]。因此,深入研究负载条件下的楼梯行走,对于提升安全性和预防跌倒具有重大意义。

已有研究表明,相较于平地行走,楼梯行走通常伴随更大的下肢关节活动范围和关节力矩^[8-11]。在实际楼梯行走中,人们常以不同方式携带负载,如肩扛、手提和拥持等^[12]。这些负载方式会通过改变重心位置,迫使躯干及下肢进行姿势和步态适应性调整^[13],并显著延长楼梯行走过程中的双支撑期^[14]。然而,相较于针对单关节运动学或基础步态参数的研究,关节间协调模式及其变异性有助于深入阐明负载楼梯行走的神经肌肉控制机制^[15-16]。即协调变异性不足可能反映运动系统过于僵化,而过度变异性则可能指示控制不稳定^[17]。矢量编码技术(Vector Coding, VC)是一种基于相邻时序点运动向量方向变化率的计算方法,用于量化多关节运动协调性的时空特征^[18]。其能有效量化两关节间运动协调模式(即耦合关系)的动态演变过程,从而精准表征多关节在复杂任务中的协调性^[19]。目前,该技术主要应用于特殊人群的平地行走步态分析,而关于负载条件下楼梯行走关节协调变异性的研究报道尚少。

基于此本研究旨在应用 VC 技术,系统探究负载楼梯行走过程中下肢关节协调性及其变异性的变化规律,以深入理解下肢运动控制策略,为提升楼梯行走安全性、效率以及跌倒预防策略的制定提供参考。

1 研究对象与方法

1.1 研究对象

本研究招募了 20 名男性大学生(身高:182.02±4.35 cm,体重:70.69±7.85 kg,年龄:18.68±0.86 岁),不符合纳入标准而被排除的 4 名参与者前 24 h 内曾进行高强度体力活动,最终只有 16 名符合以下纳入标准:1)无慢性疾病历史且神经肌肉功能正常;2)测试前 24 h 内没有剧烈运动且无肌肉疲劳症状;3)在前 6 个月内没有显著的下肢损伤。所有参与者在充分了解研究目的和实验方案后,提供了书面知情同意。

1.2 研究方法

1.2.1 数据采集

本研究采用一套同步数据采集系统获取下肢生物力学参数。由 8 台 Qualisys 红外高速摄像机(采样频率:200 Hz)和 4 块 Kistler 三维测力台(采样频率:2 000 Hz)构成。两者经数模转换盒实现同步。实验楼梯依据《建筑防火设计规范》(GB 50352—2005)设计,由五级台阶组成,其踏面深度和踏步高度分别为 30±0.05 cm 和 15±0.05 cm。5 个测力台按如下方式布置:一个安装于楼梯前方的地面,另外 3 个分别嵌装于第一、第二和第三级台阶表面,确保其上表面与踏面齐平。

1.2.2 测试流程

实验前,首先对目标采集区域实施精确的三维空间标定。依据 Visual3D 生物力学建模规范,在受试者体表预设解剖学标志点处粘贴被动反光标记(Marker)共 36 个。具体位置见图 1。

测试动作为楼梯行走,在测试时,受试者站立于台阶前 2 m 处准备,当听到“开始”指令后,正常(对照组)和手提、肩扛、拥持三种方式持握约 15 kg 重物开始,以自选最适的速度上楼

梯,为了确保实验数据的一致性,受试者的优势侧下肢先迈入第一个台阶,全程采用一步一阶策略,禁止跨越多层台阶。每个动作之间有 3 min 的间歇时间。

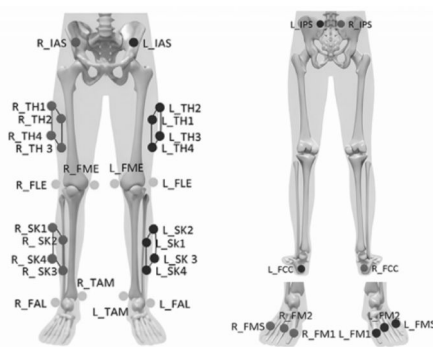


图 1 下肢解剖学标志点

1.2.3 步态周期划分

本文选取测试时一个步态周期进行分析。基于膝关节在步态中的生物力学功能特点,其运动存在从屈曲缓冲向伸直承重过渡的关键转换点^[20]。因此,本文将步态周期定义为从右脚脚尖离地时刻开始,至右腿膝关节达到最小屈曲角度的时刻结束。将其划分为 3 个阶段:摆动前期(0%~33%),即从右脚脚尖离地到髋关节达到最大屈曲角度;摆动后期(34%~66%),对应从髋关节最大屈曲角度至右脚首次触地;以及负重反应期(67%~100%),定义为从右脚触地到膝关节达到最小屈曲角度(图 2)。

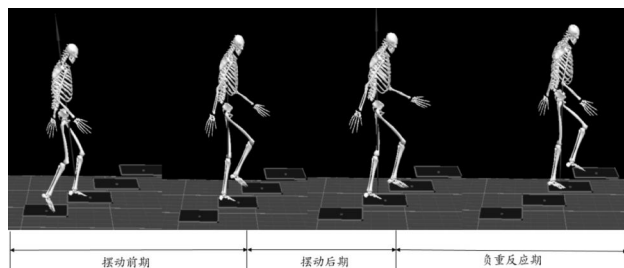


图 2 步态周期划分(以右脚为例)

1.2.4 数据处理

使用 Visual3D 计算下肢关节角度参数,随后将每个步态周期标准化为 101 个数据点。在此基础上,通过公式计算每名受试者不同阶段耦合角的标准差,用于后续统计分析。关于协调模式的处理:先将 16 名受试者同一动作在每个步态阶段的同一帧数据取均值,然后计算各个动作每个步态阶段的下肢关节耦合角,其结果对应图 3,以此得到相应的协调模式。

耦合角计算公式如下:

$$CA_i = \arctan\left(\frac{\theta_{D(i+1)} - \theta_{D(i)}}{\theta_{P(i+1)} - \theta_{P(i)}}\right) \times \frac{180}{\pi}, \theta_{P(i+1)} - \theta_{P(i)} > 0 \quad (1.1)$$

$$CA_i = \arctan\left(\frac{\theta_{D(i+1)} - \theta_{D(i)}}{\theta_{P(i+1)} - \theta_{P(i)}}\right) \times \frac{180}{\pi} + 180, \theta_{P(i+1)} - \theta_{P(i)} < 0 \quad (1.2)$$

其中 CA_i 为耦合角, θ_D 为远端关节角度, $\theta_{D(i+1)}$ 为远端关节角度 i 帧的下一帧角, θ_P 为近端关节角度, $\theta_{P(i+1)}$ 为近端关节角度 i 帧的下一帧角。

通过下式将 CA_i 校正至 $0^\circ \sim 360^\circ$ 之间:

$$CA_i = \begin{cases} CA_i + 360, & CA_i < 0 \\ CA_i, & CA_i \geq 0 \end{cases} \quad (1.3)$$

CAV_i 耦合角标准差计算公式如下:

$$\bar{x}_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \cos CA_i \quad (1.4)$$

$$\bar{y}_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sin CA_i \quad (1.5)$$

$$r_i = \sqrt{\bar{x}_i^2 + \bar{y}_i^2} \quad (1.6)$$

$$CAV_i = \sqrt{2(1-r_i)} \times \frac{180}{\pi} \quad (1.7)$$

其中 $\bar{x}_i$ 为平均水平向量; $\bar{y}_i$ 为平均垂直向量。

根据 Button 等人的关节耦合量表^[21], 可将耦合角 CA_i (范围 $0^\circ \sim 360^\circ$) 反映的协调模式划分为 4 类: ①同相位模式: 相邻关节运动方向相向且幅度相似; ②反相位模式: 相邻关节运动方向相反; ③近端主导模式: 近端关节活动相较远端关节占优势; ④远端主导模式: 远端关节活动相较近端关节占优势 (图 3)。

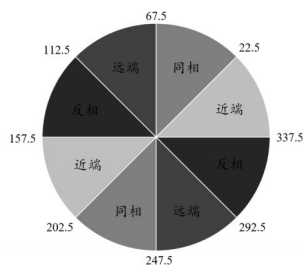


图 3 关节协调对应量图

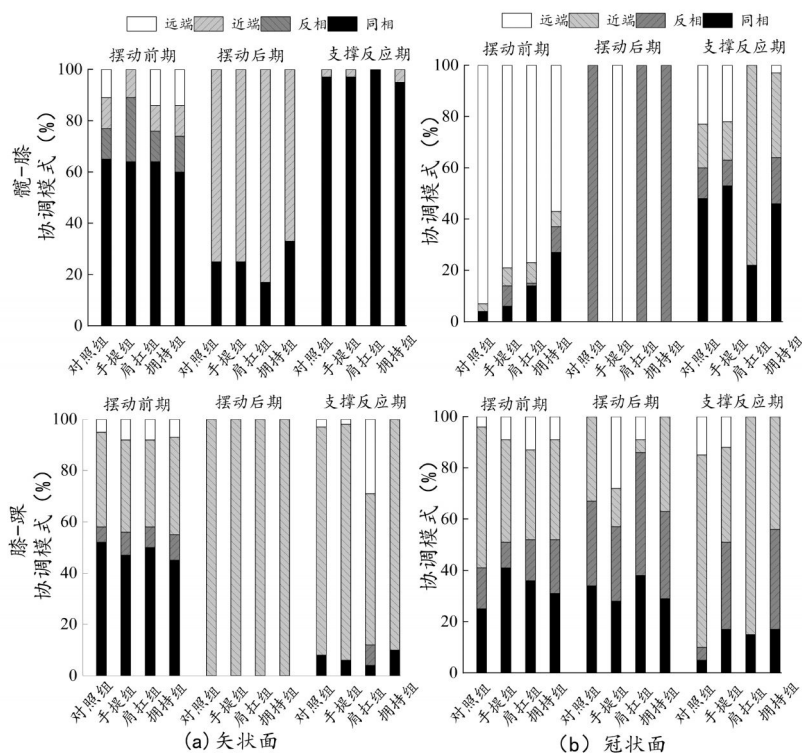


图 4 下肢关节协调模式

注: $22.5^\circ \sim 67.5^\circ$ 、 $202.5^\circ \sim 247.5^\circ$ 对应同相协调; $67.5^\circ \sim 112.5^\circ$ 、 $247.5^\circ \sim 292.5^\circ$ 对应远端协调; $112.5^\circ \sim 157.5^\circ$ 、 $292.5^\circ \sim 337.5^\circ$ 对应反相协调; $157.5^\circ \sim 202.5^\circ$ 、 $337.5^\circ \sim 375^\circ$ 对应近端协调。

1.2.5 统计学

采用 Excel、Matlab 和 SPSS26.0 进行统计学分析。数据符合正态分布, 以 $(\bar{x} \pm s)$ 表示。负重组与对照组耦合角标准差比较采用配对样本 t 检验。偏态分布则采用配对秩和检验。显著性水平 $p < 0.05$ 。

2 研究结果

2.1 下肢关节协调模式变化

负重组的步态协调模式与对照组在冠状面内不同 (图 4)。

摆动后期, 对照组为髌—膝关节耦合为反相协调, 而负重组中手提组为远端协调; 在膝—踝关节耦合, 对照组为同相协调, 手提和肩扛为反相协调, 捆持则转为近端协调。在负重反应期, 髌—膝关节耦合对照组为同相协调, 而负重组的肩扛为近端协调。

2.2 不同负重方式下肢关节变异性

在矢状面内, 对照组与负重组的髌—膝关节耦合角标准差在摆动前期具有显著性差异 ($p < 0.05$)。在冠状面内, 对照组与负重组髌—膝和膝—踝耦合角标准差在摆动前期和负重反应期中具有显著性差异 ($p < 0.05$)。此外, 在摆动后期, 冠状面上的负重组髌—膝耦合角标准差大于对照组 ($p = 0.056$), 见表 1。

3 分析与讨论

3.1 不同负重方式下肢关节协调模式

表 1 不同步态阶段内负重组与对照组耦合角标准差比较

步态周期	平面	关节	组别	CAV	T/Z值	p 值
摆动前期	矢状面	髌—膝	对照组	48.55 ± 1.98		
			肩扛组	48.55 ± 1.98	-3.362	0.004
			拥持组	49.78 ± 2.68	-3.654	0.002
	冠状面	髌—膝	对照组	37.21 ± 13.58		
			手提组	45.79 ± 11.13	-2.551	0.022
			肩扛组	41.71 ± 15.18		
摆动后期	冠状面	膝—踝	手提组	50.98 ± 11.99	-2.612	0.020
			对照组	12.79 ± 11.58		
			手提组	26.42 ± 20.12	0.605	0.056
	冠状面	髌—膝	对照组	43.11 ± 11.01		
			手提组	50.95 ± 12.73	-3.348	0.004
			肩扛组	46.48 ± 12.98		
负重反应期	冠状面	膝—踝	对照组	57.48 ± 15.03	-4.187	0.001
			手提组			

注:表中显示的数据为有显著性差异的数据,其他部分数据均无显著性差异($p>0.05$)。

本研究发现,在摆动后期的髌—膝耦合中,对照组以反相协调为主,即关节运动幅度反向变化。已有研究表明,髌—膝反相协调程度与任务完成时间呈负相关^[22]。在摆动后期,身体需要快速地将重心从支撑侧转移至即将落地的摆动侧,而反相协调这种复杂的模式可能是对照组状态下楼梯行走速度更快的原因。但 Park 等指出,髌—膝反相协调可能是不自然和不适当的运动模式,从而导致肌肉向相反方向收缩^[23],这提示楼梯行走可能会对膝盖造成拉伤。与对照组相比,负重组中手提组的髌—膝耦合呈现向远端协调的转变,这与 Konings^[24]等观察到的结果相似。其研究表明,膝关节的快速伸展可以产生更大的功率。这一结果暗示,负重状态可能会加剧膝关节损伤分析,可能归因于膝关节在摆动阶段的主导作用。

在膝—踝耦合方面,对照组以同相协调为主,表明两关节的角度变化曲线具有高度同步性。这种协同模式构建了高效的能量传递链,能显著减少关节间的能量内耗^[25]。负重组则呈现显著差异:手提与肩扛负重时均以反相协调为主,拥持负重时则转为膝关节主导的近端协调。相较于手提和肩扛方式,拥持负重表现出膝—踝近端协调模式,这可能主要源于其负重位置及相应的平衡控制策略。拥持负重使负荷前移,重心明显前倾,从而增强了对膝关节稳定性和推进功能的需求,使其在协调中占主导地位,而踝关节则更多处于配合状态。该模式与马玉丹等^[26]在速度滑冰中报道的膝关节主导机制一致,适用于需持续稳定和较大推进力的情境。相比之下,手提和肩扛负重由于负荷位于体侧或上方,对冠状面平衡控制要求更高,因此更多依赖膝—踝反相协调以实现快速调节,在保证步态效率的同时强化动态平衡^[27]。由此可见,拥持负重更依赖膝关节的局部控制以维持稳定性,而手提和肩扛方式则通过关节间反相协调更侧重于整体平衡与步伐调整。

在负重反应期的髌—膝耦合中,手提与拥持负重组均保持与对照组一致的同相协调,即髌、膝两关节沿相同方向运动,形成协同发力或缓冲耦合模式。而肩扛负重组则呈现踝关节主导的近端协调模式。与手提、拥持负重相比,肩扛负重的

负荷集中于斜方肌,会显著抬高身体重心。已有研究表明,重心高度增加时,相同角度的身体倾斜会导致更大的地面投影位移,进而放大身体摆动幅度^[28]。李宏云等研究也发现,踝关节不稳患者在支撑面晃动时,髌关节活动的增加可代偿踝关节功能缺陷^[29]。这表明当身体不稳时,机体更依赖髌关节维持稳定,与本研究肩扛负重时的髌关节主导模式一致。

3.2 不同负重方式下肢关节协调变异性特征

运动协调变异性反映了完成动作任务时神经肌肉策略集合的多样性^[18,30]。依据动力系统理论,变异性本质是中性属性,其功能意义需结合任务语境判定^[31]。

结果显示,负重组的耦合角标准差在摆动前期和负重反应期显著大于对照组。负重组表现出的更高协调变异性,不能简单地视为动作控制误差或精度下降的表现。周容^[32]等研究指出,在运动任务执行中,骨骼肌肉系统表现出的协调变异性,其意义超越单纯的误差范畴,体现为一种重要的适应性。增加的变异性可能有助于系统探索更广泛的运动解决方案^[33],以维持动态平衡和任务目标,从而增强对外部扰动或内部需求的应对能力^[34]。然而,变异性增高也可能存在不同的解读。Gribbin^[35]等在对特殊人群的研究中指出,过高的变异性有时意味着系统在特定约束条件下难以找到或稳定于一个高效、协调的最佳运动模式。本研究中负重条件下耦合角标准差的增大,一方面可能是由于负重增加了系统的自由度控制难度,使得个体在协调下肢各关节以精确完成动作时面临更大挑战,暂时难以找到一个高效稳定的模式;另一方面,也可能反映了负重任务本身的特殊性迫使身体主动探索并采用与对照组状态下不同的、多样化的关节协调策略来适应负荷。Davids^[36]等的观点也与此相关,他们认为系统运动变异性的增加常与感觉运动控制效率的暂时性下降相关联。结合负重对生理系统的影响机制研究,负重可能改变关节本体感觉输入^[37]、肌肉激活模式^[38],增加肌肉疲劳并改变关节动力学负荷^[39-40]。这些因素都可能干扰原有高效协调模式的执行,迫使神经系统调用更多样的补偿性协调策略,以在负荷条件下维持基本的运动

功能和关节稳定性。因此,本研究中观察到的负重组耦合角标准差增大,很可能是负重这一外部约束作用于感觉运动系统后,系统为维持功能而进行适应性调整或面临控制挑战的综合体现。

综上所述,肌肉骨骼损伤与运动协调机制的变化紧密相关^[41-42],正常与异常步态的协调模式差异可通过矢量编码算法实现有效量化^[43]。本文通过定量计算下肢关节在不同平面内对照组与负重组的协调差异,发现负重组在冠状面内引起运动协调机制的变化,负重组的协调变异性普遍高于对照组。此现象可能源于神经系统通过运动控制策略重组以适应外部负荷,从而维持功能性步态与动态平衡。然而,此类代偿机制可能诱发膝关节生物力学负荷异常,同时升高的协调变异性提示神经肌肉控制效能下降,二者协同作用下将会提升运动系统损伤风险。

4 结论

结果表明负重时关节之间存在一定的运动协调规律。楼梯行走时负重会诱发特定的下肢关节协调模式改变(如髌—膝远端协调、膝—踝反相协调或膝主导)并显著增加协调变异性。这些变化是神经系统为适应负荷、维持运动功能和平衡而采取的适应性策略。然而,该类协调模式可能要求膝关节承担更多的负担,且较高的协调变异性通常反映运动控制效率下降,与潜在损伤风险密切相关。因此,负重楼梯行走,需警惕其对下肢关节健康(尤其是膝关节)和步态稳定性的潜在负面影响。

参考文献:

- [1] CHEN X, QU X. Effects of Backpack Load on Stair Gait in Young Male Adults[J]. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 2018, 67: 53-59.
- [2] MAJUMDAR D, PAL M S, MAJUMDAR D. Effects of Military Load Carriage on Kinematics of Gait[J]. *Ergonomics*, 2010, 53(6): 782-791.
- [3] QU X, YEO J C. Effects of Load Carriage and Fatigue on Gait Characteristics[J]. *Journal of Biomechanics*, 2011, 44(7): 1259-1263.
- [4] QU X. Effects of Lower-Limb Muscular Fatigue on Stair Gait[J]. *Journal of Biomechanics*, 2015, 48(15): 4059-4064.
- [5] KARAMANIDIS K, ARAMPATZIS A. Altered Control Strategy between Leading and Trailing Leg Increases Knee Adduction Moment in the Elderly while Descending Stairs[J]. *Journal of Biomechanics*, 2011, 44(4): 706-711.
- [6] CAYLESS S M. Slip, Trip and Fall Accidents: Relationship to Building Features and Use of Coroners' Reports in Ascribing Cause[J]. *Applied Ergonomics*, 2001, 32(2): 155-162.
- [7] JACOBS J V. A Review of Stairway Falls and Stair Negotiation: Lessons Learned and Future Needs to Reduce Injury[J]. *Gait & Posture*, 2016, 49: 159-167.
- [8] COSTIGAN P A, DELUZIO K J, WYSS U P. Knee and Hip Kinetics during Normal Stair Climbing[J]. *Gait & Posture*, 2002, 16(1): 31-37.
- [9] NADEAU S, MCFADYEN B J, MALOUIN F. Frontal and Sagittal Plane Analyses of the Stair Climbing Task in Healthy Adults Aged over 40 Years: What Are the Challenges Compared to Level Walking?[J]. *Clinical Biomechanics*, 2003, 18(10): 950-959.
- [10] 王新亭, 吴永红, 王鸥, 等. 老年人手提重物时不同停止方式对步态稳定性的影响[J]. *医用生物力学*, 2021, 36(2): 297-303.
- [11] WALSH G S, LOW D C. Military Load Carriage Effects on the Gait of Military Personnel: a Systematic Review[J]. *Applied Ergonomics*, 2021, 93: 103376.
- [12] 赵康, 王连雷, 王宏卫, 等. 不同负重方式对腰椎生物力学的影响[J]. *山东大学学报(医学版)*, 2023, 61(6): 70-78.
- [13] 闫可, 刘艺辉, 张泽毅, 等. 背包类型对大学生楼梯行走运动学和足底压力的影响[J]. *医用生物力学*, 2023, 38(3): 580-586+593.
- [14] HONG Y, LI J X. Influence of Load and Carrying Methods on Gait Phase and Ground Reactions in Children's Stair Walking[J]. *Gait & Posture*, 2005, 22(1): 63-68.
- [15] BURGESS -LIMERICK R, ABERNETHY B, NEAL R J. Relative Phase Quantifies Interjoint Coordination[J]. *Journal of Biomechanics*, 1993, 26(1): 91-94.
- [16] HAMILL J, VAN EMMERIK R E A, HEIDERSCHUIT B C, et al. A Dynamical Systems Approach to Lower Extremity Running Injuries[J]. *Clinical Biomechanics*, 1999, 14(5): 297-308.
- [17] STERGIOU N, HARBOURNE R, CAVANAUGH J. Optimal Movement Variability: a New Theoretical Perspective for Neurologic Physical Therapy[J]. *Journal of Neurologic Physical Therapy*, 2006, 30(3): 120-129.
- [18] 马乾峰, 丁健, 李立, 等. 基于矢量编码技术研究功能性踝关节不稳者下肢协调性和变异性[J]. *医用生物力学*, 2023, 38(6): 1086-1092.
- [19] 王佳伟, 刘晔. 不同高度跳深时髌、膝关节协调模式与下肢肌肉活动的关系[J]. *中国组织工程研究*, 2023, 27(2): 276-281.
- [20] MCGRATH T, STIRLING L. Body-Worn IMU-Based Human Hip and Knee Kinematics Estimation during Treadmill Walking[J]. *Sensors*, 2022, 22(7): 2544.
- [21] BUTTON C, WHEAT J, LAMB P. Why Coordination Dynamics Is Relevant for Studying Sport Performance[M]//Complex Systems in Sport. London: Routledge, 2014: 70-87.
- [22] HEUVELMANS P, DI PAOLO S, BENJAMINSE A, et al. Relationships between Task Constraints, Visual Constraints, Joint Coordination and Football-Specific Performance in Talented Youth Athletes: an Ecological Dynamics Approach[J]. *Perceptual and Motor Skills*, 2024, 131(1): 161-176.
- [23] PARK S, YOON S. Quantifying Coordination and Variability in the Lower Extremities after Anterior Cruciate Ligament Reconstruction[J]. *Sensors*, 2021, 21(2): 652.
- [24] KONINGS M J, ELFERINK-GEMSER M T, STOTER I K, et al. Performance Characteristics of Long-Track Speed Skaters: a Literature Review[J]. *Sports Medicine*, 2015, 45(4): 505-516.
- [25] 焦培豪, 张苗, 冯临光, 等. 足球头顶球落地方式对下肢协调与能量耗散的影响[J]. *湖北体育科技*, 2024, 43(5): 90-96.
- [26] 马玉丹, 温朝晖, 具中山, 等. 基于惯性测量单元的女子速度滑冰运动员下肢运动协调特征研究[J]. *北京体育大学学报*, 2021, 44(12): 98-109.
- [27] PAMUKOFF D N, HOLMES S C, GARCIA S A, et al. Lower Extremity Coordination and Joint Kinetic Distribution during Gait in Adults with and without Prader-Willi Syndrome[J]. *Journal of Biomechanics*, 2022, 141: 111213.

- [28] OJIE O O D, SAATCHI R, SAATCHI M. Demonstration of the Effect of Centre of Mass Height on Postural Sway Using Accelerometry for Balance Analysis[J]. Technologies, 2020, 8(2): 20.
- [29] 李宏云, 李宏, 薛啸傲, 等. 机械性踝关节不稳患者存在感觉整合功能缺陷[J]. 中国运动医学杂志, 2022, 41(11): 827-832.
- [30] 王一吉, 周红俊, 刘根林, 等. 不完全性脊髓损伤患者与健康人步态变异性、对称性和协调性的对照研究[J]. 中国康复, 2023, 38(12): 724-728.
- [31] 马乾峰, 李立, 张伟, 等. 不同硬度地面对功能性踝关节不稳患者步态协调性的影响[J]. 中国康复理论与实践, 2024, 30(3): 345-351.
- [32] 周容, 黄灵燕, 毕嘉伟, 等. 基于脑网络的多焦点经颅直流电刺激降低健康成年人双任务步态变异性的研究[J]. 中国康复医学杂志, 2023, 38(11): 1514-1521.
- [33] ORTH D, VAN DER KAMP J, MEMMERT D, et al. Creative Motor Actions as Emerging from Movement Variability[J]. Frontiers in Psychology, 2017, 8: 1903.
- [34] NESTICO J, NOVAK A, PERRY S D, et al. Does Increased Gait Variability Improve Stability when Faced with an Expected Balance Perturbation during Treadmill Walking? [J]. Gait & Posture, 2021, 86: 94-100.
- [35] GRIBBIN T C, SLATER L V, HERB C C, et al. Differences in Hip - Knee Joint Coupling during Gait after Anterior Cruciate Ligament Reconstruction[J]. Clinical Biomechanics, 2016, 32: 64-71.
- [36] DAVIDS K, GLAZIER P, ARAÚJO D, et al. Movement Systems as Dynamical Systems: The Functional Role of Variability and Its Implications for Sports Medicine[J]. Sports Medicine, 2003, 33(4): 245-260.
- [37] YU Y, CHEN Y, LOU T, et al. Correlation between Proprioceptive Impairment and Motor Deficits after Stroke: a Meta-Analysis Review [J]. Frontiers in Neurology, 2022, 12: 688616.
- [38] ELLESTAD S H, HOLCOMB T P, SWIERGOL A M, et al. The Quantification of Muscle Activation during the Loaded Carry Movement Pattern[J]. International Journal of Exercise Science, 2024, 17(1): 480-490.
- [39] ZHONG S, JIA N, QU Y, et al. Analysis and Study on Biomarkers of Local Muscle Fatigue Caused by Repetitive Lifting Task [J]. BMC Musculoskeletal Disorders, 2024, 25(1): 660.
- [40] SILDER A, BESIER T, DELP S L. Running with a Load Increases Leg Stiffness[J]. Journal of Biomechanics, 2015, 48(6): 1003-1008.
- [41] CHIU S L, LU T W, CHOU L S. Altered Inter-Joint Coordination during Walking in Patients with Total Hip Arthroplasty[J]. Gait & Posture, 2010, 32(4): 656-660.
- [42] HERB C C, CHINN L, HERTEL J. Altering Shank-Rear-Foot Joint Coupling during Gait with Ankle Taping in Patients with Chronic Ankle Instability and Healthy Controls[J]. Journal of Sport Rehabilitation, 2016, 25(1): 13-22.
- [43] CELESTINO M L, VAN EMMERIK R, BARELA J A, et al. Effects of Limited Knee Flexion Movement in Intra-Limb Gait Coordination [J]. Journal of Biomechanics, 2021, 128: 110712.

(上接第76页)

- 建校园体锻新生态的实践[EB/OL]. (2025-05-19)[2025-10-05]. <https://www.jse.edu.cn/index.php?r=portal/content/view&id=17927>.
- [27] 河南省体育局.“行走是吾乡”2025年河南省自行车公开赛进商圈系列赛双城同步开赛[EB/OL]. (2025-07-18)[2025-10-05]. <https://www.sport.gov.cn/n14471/n14487/n14524/c28895210/content.html>.
- [28] 邵峰, 闫纪红, 于子轩. 美学经济理论视角下我国的体育消费升级研究[J]. 首都体育学院学报, 2020, 32(1): 69-74.
- [29] 张瑶, 李克良. 建构·传播·动员: “苏超”赛事的文化共谋与社会融合研究[J/OL]. 体育学研究, 1-14[2025-10-11]. <https://doi.org/10.15877/j.cnki.nsic.20250714.001>.
- [30] 李赫, 刘桂海. 提振消费背景下促进虚拟体育发展的机理、阻滞及路径[J]. 体育文化导刊, 2025(8): 55-62.
- [31] 周建辰, 邹月辉. 体育数字藏品促进体育消费探索[J]. 体育文化导刊, 2024(9): 14-20+48.
- [32] 龙寰宇, 张洁玉, 钟丽萍, 等. 体育赛事“三进”活动的价值意蕴、实践样态及推进策略[J]. 湖北体育科技, 2025, 44(4): 12-16+53.
- [33] 郭江浩, 熊文. 人工智能赋能学校体育的限度及其超越: 基于技术现象学的考察[J]. 体育学刊, 2025, 32(2): 87-96.
- [34] 张大志, 张旭. 江苏省城市足球联赛激活体育消费潜力的内在机理、运行逻辑及实践路径[J]. 北京体育大学学报, 2025, 48(7): 32-39.
- [35] 陈玉萍, 刘嘉毅, 李勇. “村字号”体育赛事IP的共创动力、生成机制及培育路径研究[J/OL]. 体育学研究, 1-16[2025-10-11]. <https://doi.org/10.15877/j.cnki.nsic.20250929.001>.