

基于状态空间重构的跑步偏离量化方法

彭宇轩, 李翰君

(北京体育大学 运动人体科学学院, 北京 100091)

摘要:

[引言] 跑步作为一种流行的运动形式,其下肢损伤问题日益受到关注。传统下肢运动损伤范式如“冲击力范式”和“过度旋前”范式受到质疑,因其与损伤风险的关系不明确,且缺乏流行病学支持。近年来,“习惯运动路径”(Habitual Motion Path, HMP)范式被提出,强调跑者在执行特定任务时会遵循一种特定的、习惯性的运动轨迹,这一轨迹被认为是关节运动阻力最小的路径。然而,现有研究在量化 HMP 方面仍存在挑战,Run Signature 系列方法虽然提供了一种量化思路,但仍未得到学界广泛认可。本研究旨在应用非线性动态分析与聚类算法,量化下肢运动轨迹偏离,为 HMP 假说提供新证据。

[方法] 本研究共纳入 53 名受试者(对照组 25 名,髌股疼痛综合征组(Patellofemoral Pain Syndrome, PFP) 28 名),每名受试者在两种跑鞋条件下完成测试,采用 Qualisys 视频系统与 Theia3D 软件进行无标记动作捕捉。数据采集包括两种跑鞋条件下、固定速度 14 km/h 的跑步运动学数据,以及受试者以舒适姿势和速度完成的下蹲动作(HMP 基线数据)。原始数据预处理后,基于 nonlinearTseries 包进行非线性动态分析。采用自相关函数法(ACF)和平均互信息法(AMI)确定时间延迟参数,利用 Cao 算法选取最优嵌入维数,对膝关节角度时间序列进行状态空间重构。计算习惯运动路径偏离指标(HMP_X_DIV、HMP_Y_DIV、HMP_Z_DIV)、关联维数(corrDim 函数)、样本熵(sampleEntropy 函数),以及递归定量分析的 11 项指标(rqa 函数: REC、DET、LAM、ENTR 等)。运用 Ward.D2 层次聚类法对非线性指标分组,采用独立样本 t 检验分析组间差异。

[结果] 本研究的主要结果如下(* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$): (1) 成功开发了基于非线性动态分析与聚类算法的新方法,实现了下肢运动轨迹偏离的量化分析。(2) 习惯运动路径偏离指标显示: X 轴偏离(PFP: 0.007 ± 0.195 vs. CON: -0.022 ± 0.214), Y 轴偏离(PFP: -1.446 ± 3.073 vs. CON: -1.891 ± 2.632), Z 轴偏离(PFP: -4.552 ± 3.807 vs. CON: -4.624 ± 3.961),三个维度均无统计学显著差异($p > 0.05$),表明两组在膝关节三维运动轨迹偏离上的系统性差异不明显。(3) 系统复杂性指标表明: 关联维数(PFP: 1.311 ± 0.078 vs. CON: 1.334 ± 0.081 , $p = 0.047^*$), 样本熵(PFP: 0.260 ± 0.051 vs. CON: 0.273 ± 0.057 , $p = 0.077$),对照组的关联维数显著高于 PFP 组,而样本熵呈边缘显著差异。(4) 递归定量分析揭示: 递归率 REC (PFP: 0.0014 ± 0.0007 vs. CON: 0.0015 ± 0.0003 , $p = 0.686$), 确定性 DET (PFP: 0.993 ± 0.005 vs. CON: 0.994 ± 0.004 , $p = 0.292$), 层流性 LAM (PFP: 0.694 ± 0.236 vs. CON: 0.773 ± 0.165 , $p = 0.005^{**}$), 其中 LAM 显示对照组显著高于 PFP 组,反映两组在运动轨迹层流性特征上存在显著差异。(5) 递归定量分析的其他指标显示: RATIO (PFP: 788.74 ± 278.10 vs. CON: 712.22 ± 189.53 , $p = 0.022$) 和 Lmean (PFP: 21.68 ± 13.58 vs. CON: 18.89 ± 4.01 , $p = 0.045$) 均显示 PFP 组显著高于对照组,表明 PFP 组在递归结构的复杂性方面表现出不同特征。(6) 基于非线性指标聚类分析将 53 名受试者分为三类,各聚类中 PFP 组与对照组分布呈现显著层次化: 聚类一 (CON: 60% vs.

PFP: 40%), 聚类二 (CON: 48.3% vs. PFP: 51.7%), 聚类三 (CON: 10% vs. PFP: 90%), 验证了非线性指标在区分运动损伤风险方面的有效性。

[结论] 本研究为下肢运动轨迹偏离的量化分析提供了创新方法, 对验证 HMP 假说和理解下肢损伤机制具有重要价值。研究结论表明: (1)基于 nonlinearTseries 包的非线性动态分析指标能有效区分 PFP 患者与健康对照组, 其中层流性 LAM 为最显著的区分指标, 对照组显著高于 PFP 组; 关联维数同样显示对照组高于 PFP 组, 表明健康个体的运动模式具有更高的确定性和结构化特征; (2)递归定量分析中的 RATIO 和 Lmean 指标显示 PFP 组显著高于对照组, 反映 PFP 患者在递归结构复杂性方面表现出不同的动力学特征; (3)聚类分析结果呈现显著的层次化分布特征, 验证了非线性指标在运动损伤风险识别中的有效性; (4)习惯运动路径偏离指标(HMP_DIV)在三个维度上均未达到统计学显著差异, 提示该指标检测 PFP 运动模式差异的敏感性有限。

关键词: 运动生物力学; 非线性动力学; 状态空间重构; 习惯运动路径; 聚类分析

作者简介:

彭宇轩(1999-06), 男, 广东深圳人, 硕士, 运动生物力学研究, Email: pengyx@bsu.edu.cn

导师简介:

李翰君(1983-01), 男, 山西太原人, 博士, Email: 2291@bsu.edu.cn。运动生物力学研究。研究方向为神经肌肉骨骼模型、动作技术分析诊断、损伤生物力学、动作学习与控制。主授课程包括运动生物力学、动作学习与控制、高等数学。曾获北京市高校青年教学名师奖、北京高等学校优秀专业课主讲教师等荣誉奖项。