

文章编号: 1004-7220(2020)05-0455-08

# 基于躯干细化模型腰椎间盘突出症患者与健康人群在3种日常活动下的运动学差异

徐明鑫<sup>1,2</sup>, 朱紫薇<sup>2,3</sup>, 蒯声政<sup>4</sup>, 廖振华<sup>2</sup>, 刘伟强<sup>2,3</sup>

(1.清华大学 生物医学工程系, 北京 100084; 2.深圳清华大学研究院 生物医用材料及植入器械重点实验室, 广东 深圳 518057; 3. 清华大学 机械工程系, 北京 100084; 4.深圳市第二人民医院 骨科, 广东 深圳 518035)

**摘要:**目的 建立由不同腰椎节段和集成胸椎、骨盆构成的躯干细化模型,分析腰椎间盘突出症(lumbar disc herniation, LDH)患者与健康人群在3种日常活动下的运动学差异,并与采用全腰节段的躯干简略模型作对比,探讨进行LDH患者运动学分析时采用躯干细化模型的必要性。方法 使用NDI运动捕捉系统采集15名健康男性和7名男性LDH患者在水平行走、躯干前屈、对侧拾物中各节段的运动角度,分别通过两种模型比较患者与健康人群的运动学差异。结果 水平行走过程中,LDH患者胸椎节段和骨盆旋转增加,全腰节段运动角度无明显变化,但L4~5节段旋转角度显著减小;躯干前屈过程中,LDH患者所有腰椎节段屈伸角度都不同程度地减小,L3~4节段屈伸角度与健康人群差异性较大;对侧拾物过程中矢状面上的表现与躯干前屈类似,但LDH患者L3~4节段和L4~5节段侧弯角度显著低于健康人群。结论 LDH患者在日常活动中主要限制了损伤腰椎节段的运动。在某些运动中,只有躯干细化模型才能发现损伤腰椎节段的异常运动。因此,在进行LDH患者运动学分析时,有必要将腰椎细分成5个独立节段。

**关键词:**躯干细化模型;腰椎间盘突出症;日常活动;运动学

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2020.05.011

## Kinematic Differences Between Patients with Lumbar Disc Herniation and Healthy People in Three Daily Activities Based on Refined Trunk Model

XU Mingxin<sup>1,2</sup>, ZHU Ziwei<sup>2,3</sup>, KUAI Shengzheng<sup>4</sup>, LIAO Zhenhua<sup>2</sup>, LIU Weiqiang<sup>2,3</sup>

(1. Department of Biomedical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Key Laboratory of Biomedical Materials and Implant Devices, Research Institute of Tsinghua University in Shenzhen, Shenzhen 518057, Guangdong, China; 3. Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 4. Department of Orthopedics, Shenzhen Second People's Hospital, Shenzhen 518035, Guangdong, China)

**Abstract: Objective** To establish a refined model of trunk composed of different lumbar segments, lumped thoracic spine and pelvis, analyze the kinematic differences between patients with lumbar disc herniation (LDH) and healthy people during three daily activities, and to compare the refined trunk model with the simplified trunk model adopting the whole lumbar segment, and discuss the necessity of using the refined trunk model for

收稿日期:2019-10-28; 修回日期:2019-12-12

基金项目:深圳市科技计划项目(KJYY20170405161248988)

通信作者:刘伟强,教授,E-mail: weqliu@hotmail.com

kinematic analysis of LDH patients. **Methods** Motion capture system NDI was used to collect kinematic parameters of each segment from 15 healthy people and 7 male LDH patients during level walking, trunk flexion and contralateral pickup, then the kinematic differences between patients and healthy people by the two models were compared respectively. **Results** During level walking, the rotation of the thoracic segment and pelvis for LDH patients increased, while no significant change was found in motion angle of the whole lumbar segment, and the rotation angle of L4-5 segment significantly reduced. During trunk flexion, the flexion angles of all lumbar segments for LDH patients were reduced by varying degrees, and the flexion angle of L3-4 segment was significantly different from that of healthy people. During contralateral pickup, the performance on the sagittal plane was similar to that during flexion. However, the lateral bending angles of L3-4 segment and L4-5 segment for LDH patients were significantly lower than those for healthy people. **Conclusions** LDH patients mainly restrict the motion of injured lumbar segments in daily activities. During some motions, only refined model can discover the abnormal motion of injured lumbar segments. Therefore, it is necessary to subdivide the lumbar spine into 5 independent segments for analyzing the kinematic characteristics of LDH patients.

**Key words:** refined trunk model; lumbar disc herniation (LDH); daily activity; kinematics

人体运动学分析是研究脊柱康复的一种方法,可通过量化的参数客观发现脊柱的异常运动<sup>[1]</sup>。腰椎间盘突出症(lumbar disc herniation, LDH)常会引起躯干的运动学参数异常<sup>[2-4]</sup>。因此,进行躯干运动学测量有利于帮助医生全面了解患者的异常运动特征,定制更合理的治疗方案。针对LDH患者的运动学研究中,主要关注由胸椎节段、腰椎节段和骨盆等构成的躯干,通过腰椎活、骨盆动度(range of motion, ROM)等运动学参数进行运动学分析<sup>[5-9]</sup>。但目前的多数研究均将整个腰椎节段作为一个刚性节段。刘慧等<sup>[10]</sup>对LDH合并骶髂关节紊乱患者水平行走进行步态分析,发现脊柱L4、L5的受力情况存在较大差异,运动模式并不一致。研究发现,不同腰椎的运动存在较大差异性<sup>[11-13]</sup>。而LDH患者通常会因为疼痛等原因调整运动控制策略,导致各腰椎的运动差异性进一步增大,腰椎间盘负荷增加,躯干组织受伤风险上升。因此,有必要对不同腰椎节段的运动差异性开展研究。

学者们开始采用多节段代替单一节段对腰椎运动展开分析。文献[13-14]中采用上腰-下腰节段的躯干模型发现,在坐立-站起活动中,上、下腰节段的运动角度存在显著差异性。Gomatos等<sup>[15]</sup>研究表明,在直立行走中,上、下腰节段的运动学参数在冠状面和横截面上存在显著差异。显然,把每一个腰椎节段都当成独立节段可以得到更细化的运动学参数。大部分LDH发生在下腰节段部分,因此,对上、下腰节段进一步细分,获取损伤节段更细

化的运动学参数,会帮助医生更准确地认识病情。

本文建立了由不同腰椎节段和集成胸椎节段、骨盆构成的躯干细化模型,对比分析LDH患者与健康人群在水平行走、躯干前屈、对侧拾物3种日常活动下的运动学差异,并与采用全腰节段的躯干简化模型作对比,从而证明对LDH患者进行运动学分析时采用躯干细化模型的必要性。

## 1 方法

### 1.1 实验对象

共招募15名健康男性志愿者,年龄(24.3±1.7)岁,身高(171.9±4.9)cm,体质量(67.1±10.3)kg;7名男性LDH患者,年龄(29.6±5.6)岁,身高(173.1±3.7)cm,体质量(71.5±5.5)kg。其中健康人群的纳入标准为:①未出现任何运动异常;②无任何类型的腰椎疾病历史;③近6个月无任何手术记录;④躯干无任何外观畸形和疼痛症状。LDH患者的纳入标准为:①通过X光和核磁共振拍摄被诊断为腰椎间盘突出,并由至少两名专业的脊柱外科医生进行确认;②保有基本运动功能,能进行水平行走和躯干前屈等活动。7名LDH患者中,有5名突出位置在L4~5,另外2名在L3~4和L4~5均有突出症状。所有测试者在实验前均签订知情同意书。

### 1.2 实验步骤

实验前,由脊柱外科医生帮助粘贴标记点,将运动捕捉系统配备的3D主动发光标记点粘贴在测试者的胸第1、3、5、7、9、11、12椎体的棘突(T1、T3、

T5、T7、T9、T11、T12)、胸骨角(sternal angle, STAN)、剑突(xiphoid process, XIPR)、腰第1~5椎体(L1~5)棘突以及骨盆的左侧髂后上棘(left posterior superior iliac spine, LPSIS)、右侧髂后上棘(right posterior superior iliac spine, RPSIS)、左侧髂嵴处(left iliac crest, LIC)、右侧髂嵴处(right iliac crest, RIC)、左侧髂前上棘(left anterior superior iliac spine, LASIS)、右侧髂前上棘(right anterior superior iliac spine, RASIS),具体粘贴位置如图1所示。

测试者按以下要求完成3种日常活动动作(见图2),每个日常活动重复3次:水平行走中,要求测试者在自然的情况下,以近似匀速的方式行走;躯干前倾中,要求测试者弯曲躯干部分到最大自主弯曲角,然后恢复到初始的站立姿势;对侧拾物中,要求测试者采用右手去拾取放置在左脚前方0.2 m处的物品,然后恢复到初始的站立姿势。在躯干前屈和对侧拾物中,要求测试者优先弯曲躯干,只有当测试者仅通过弯曲躯干无法完成相应的活动时,

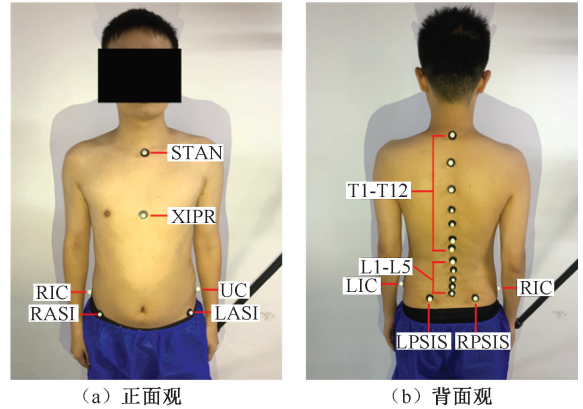


图1 标记点粘贴位置

Fig.1 Marker placement (a) Front view, (b) Back view

才被允许弯曲下肢。

实验过程中,采用由10台摄像机组成的三维运动捕捉系统(Motion Analysis公司,美国),以100 Hz采样频率采集标记点的运动轨迹,以此进行运动学参数的计算。

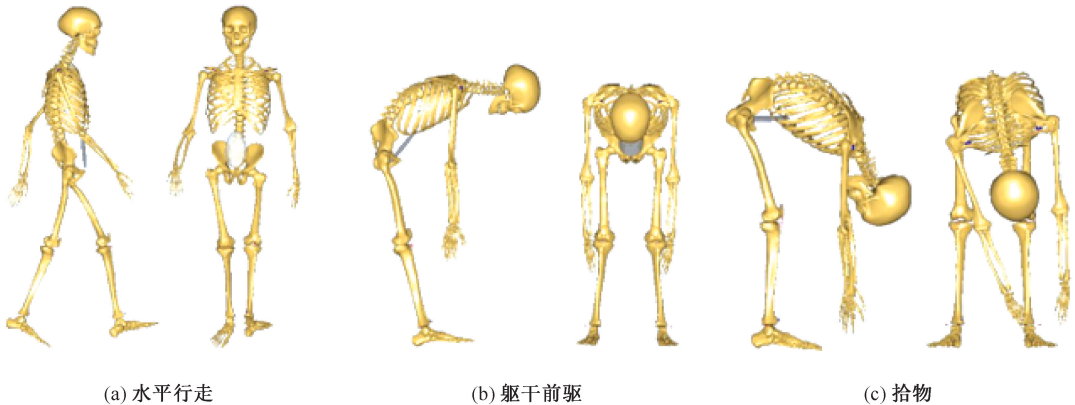


图2 不同日常活动动作示意图

Fig.2 Schematic for different activities of daily living (a) Level walking, (b) Trunk flexion, (c) Contralateral pickup

### 1.3 骨肌建模与仿真

本文的躯干细化模型以 AnyBody 软件自带模型库(AMMR 1.6)中的 gait-full-body 模型为基础模型进行修改,通过标记点驱动修改后的躯干细化模型,计算测试者各个节段在3个解剖平面上的运动角度。该躯干细化模型包括集成胸椎、5个腰椎和骨盆,各个椎体(骨盆除外)通过球铰连接。驱动方式如下:①集成胸椎由胸椎棘突上的标记点(T1、T3、T5、T7、T9、T11、T12)、CALV 和 STAN 共同驱动;②每个腰椎均由当前标记点和相邻的两个标记点

独立驱动(L5 只由两个标记点驱动);③骨盆由 LPSIS 等6个标记点共同驱动。驱动过程如图3所示,蓝球为标记点,红球为模型上的点。标记点与模型各节段上的点一一对应,通过带动节段上的点驱动节段。保持躯干细化模型集成胸椎和骨盆不变,将所有腰椎的运动角度相加即得到躯干简略模型。

### 1.4 数据处理和分析

每个测试者的每次实验均截取1个步态周期的数据,每个参数采取3次实验的平均值表示。步

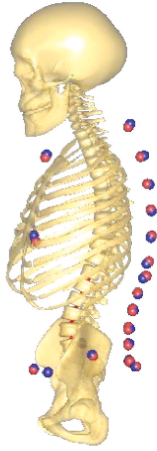


图3 模型驱动示意图

Fig.3 Schematic of model driven

态周期的定义如下:水平行走的步态周期定义为右脚后跟相邻两次着地间的时间段。躯干前屈和对侧拾物的步态周期包括前屈阶段和回复阶段,前屈阶段定义为胸椎节段相对世界坐标系由前倾 $3^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 的时间段,反之为回复阶段。若某些测试者如部分患者,前屈角度不能够达到 $90^{\circ}$ ,前屈阶段的终点和回复阶段的起点则定义为最大前倾角所对应的时刻。将1个步态周期的数据按时间归一化到 $0\% \sim 100\%$ ,躯干前屈和对侧拾物的前屈和回复阶段分别对应 $0\% \sim 50\%$ 和 $51\% \sim 100\%$ 。

各节段的运动角度和方向定义如下:骨盆3个轴面的运动角度为骨盆相对坐标系的角度。其中,坐标系 $X$ 轴定义为人体的矢状面上的水平方向,身体的前侧为正方向; $Y$ 轴定义为人体的冠状面上的水平方向,身体的左侧为正方向; $Z$ 轴定义为人体的横断面上的水平方向,垂直向上为正方向。 $L4 \sim 5$ 节段在3个轴面上的运动角度为 $L4$ 相对于 $L5$ 的欧拉旋转矩阵,依此类推,运动方向定义与世界坐标系相同。

本文首先使用 AnyBody 仿真软件计算各个节段的运动角度,进而通过 ROM 和时序图进行 LDH 患者和健康人群的运动学对比分析。ROM 表示节段运动角度在整个步态周期的峰谷值,时序图表示节段在整个步态周期内随时间变化的运动角度。除仿真外,数据处理和分析均在自行设计的 MATLAB 程序进行。采用独立样本  $t$  检验来比较健康人群和 LDH 患者 ROM 差异性,并设定显著性水平为

$P < 0.05$ , 极显著性水平为  $P < 0.01$ 。

## 2 实验结果

### 2.1 基于 ROM 的运动学对比

测试者在3种日常活动下躯干各个节段在3个平面上的 ROM 如表1~3所示。

表1 健康人群和 LDH 患者在水平行走下各节段 ROM 比较  
(\*  $P < 0.05$ , \*\*  $P < 0.01$ )

Tab.1 ROM comparison of each segment for LDH patients and healthy people during level walking ( $^{\circ}$ )

节段	矢状面		冠状面		横断面	
	健康人群	患者	健康人群	患者	健康人群	患者
胸椎	2.0±1.1	2.7±0.5	4.5±0.5	5.8±2.6	3.2±1.9	7.0±3.4*
全腰	1.7±0.6	1.9±0.9	6.7±1.4	6.1±2.7	4.1±1.4	2.9±0.4
L1~2	0.4±0.2	0.5±0.3	1.5±0.5	1.7±0.4	0.6±0.2	0.6±0.2
L2~3	0.4±0.1	0.6±0.3	1.7±0.1	1.7±0.2	0.7±0.3	0.6±0.3
L3~4	0.6±0.2	0.5±0.3	2.9±1.3	2.0±0.9	0.7±0.4	0.6±0.3
L4~5	0.4±0.1	0.6±0.3	4.8±1.0	3.8±1.5	2.4±1.2	1.7±0.7*
骨盆	2.5±0.6	4.6±2.7	5.1±1.8	5.2±0.5	7.5±1.5	16.7±6.7**

表2 健康人群和 LDH 患者在躯干前屈下各节段 ROM 比较  
(\*  $P < 0.05$ , \*\*  $P < 0.01$ )

Tab.2 ROM comparison of each segment for LDH patients and healthy people during trunk flexion ( $^{\circ}$ )

节段	矢状面		冠状面		横断面	
	健康人群	患者	健康人群	患者	健康人群	患者
胸椎	17.1±5.8	15.5±6.0	0.5±0.4	0.3±0.1	0.3±0.2	0.2±0.1
全腰	39.3±4.1	24.9±7.9*	0.9±0.3	0.4±0.3	0.5±0.2	0.2±0.1
L1~2	9.2±1.2	8.3±1.9	0.3±0.2	0.1±0.1	0.1±0.1	0.0±0.1
L2~3	11.8±1.9	9.1±4.1	0.1±0.1	0.1±0.0	0.1±0.1	0.1±0.1
L3~4	13.5±3.3	5.0±1.9**	0.2±0.2	0.1±0.3	0.1±0.1	0.1±0.1
L4~5	5.2±1.1	3.1±1.2*	0.7±0.3	0.4±0.3	0.0±0.1	0.0±0.1
骨盆	35.6±6.1	37.9±8.7	3.7±1.9	3.1±2.1	4.3±1.6	5.4±1.1

表3 健康人群和 LDH 患者在对侧拾物下各节段 ROM 比较  
(\*  $P < 0.05$ , \*\*  $P < 0.01$ )

Tab.3 ROM comparison of each segment for LDH patients and healthy people during contralateral pickup ( $^{\circ}$ )

节段	矢状面		冠状面		横断面	
	健康人群	患者	健康人群	患者	健康人群	患者
胸椎	22.5±7.3	20.6±5.7	10.9±4.0	7.9±2.5	5.3±2.9	4.4±3.9
全腰	30.0±2.5	16.3±3.5*	18.6±6.3	10.0±3.9	8.3±3.8	4.2±0.9
L1~2	7.3±1.3	5.3±1.3	3.5±1.7	3.5±0.4	1.6±0.6	1.1±0.5
L2~3	8.1±0.6	5.3±1.3*	4.2±1.5	3.1±1.3	2.0±0.8	1.0±0.2
L3~4	11.1±1.4	4.9±0.9**	6.9±2.1	1.3±0.4**	2.0±0.7	0.9±0.1
L4~5	3.7±0.6	2.6±0.6	8.4±4.0	5.6±2.9*	3.0±2.0	1.6±0.8
骨盆	33.6±7.5	47.1±8.4*	15.6±9.6	14.6±8.3	27.0±13.8	27.8±16.8



在水平行走过程中,横断面上 LDH 患者的全腰节段与健康人群并无明显差异,但 L4~5 节段的旋转角显著小于健康人群,而骨盆则表现出更大的旋转。在躯干前屈过程中,矢状面上 LDH 患者全腰节段、L3~4 节段和 L4~5 节段前倾角 ROM 都显著减小。在对侧拾物过程中,矢状面上各节段的表现与躯干前屈类似,但在冠状面上 L3~4 和 L4~5 侧弯角的 ROM 显著减小。

## 2.2 基于时序图的运动学对比

测试者在3种日常活动下躯干各个节段在3个平面上的时序图如图4~6所示。其中,红色实线和红色阴影分别表示 LDH 患者运动学参数的均值和1个标准差,绿色实线和绿色阴影分别表

示健康人群运动学参数的均值和1个标准差。在水平行走过程中,LDH 患者 L4~5 节段旋转角度波形波动范围较小,骨盆旋转角度的波形波动范围较大。在躯干前屈过程中,LDH 患者腰部各节段的屈伸角度在1个步态周期内的均值明显低于健康人群,其中 L3~4、L4~5 节段的屈伸角度最明显;而骨盆前倾角度的均值在1个步态周期内都明显高于健康人群。在对侧拾物过程中,矢状面上各节段的波形表现与躯干前屈类似。冠状面上,LDH 患者 L3~4 节段和 L4~5 节段在侧弯角度在1个步态周期内的均值明显低于健康人群,而骨盆侧倾角度的均值略高于健康人群。

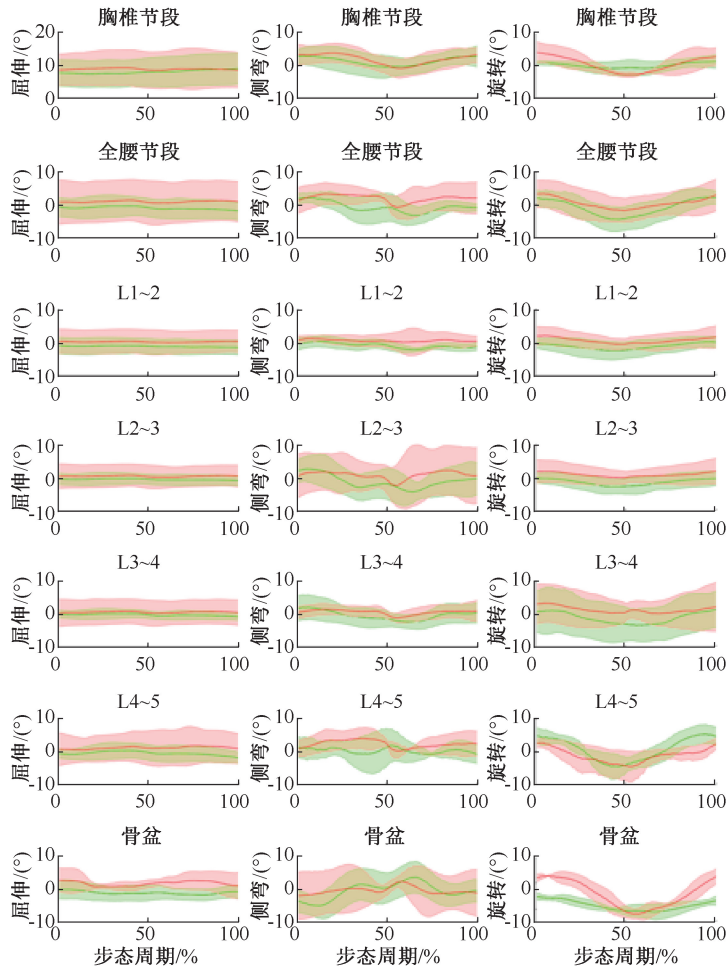


图4 LDH患者与健康人群水平行走时在1个完整步态周期内各节段运动波形

Fig.4 Kinematic waveform of each segment for LDH patients and healthy people in one complete gait cycle during level walking

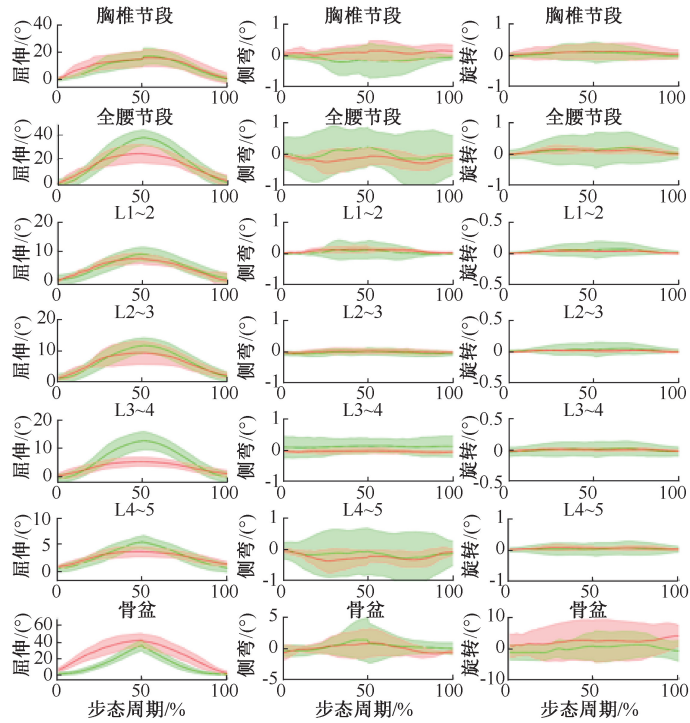


图5 LDH患者与健康人群躯干前屈时在1个完整步态周期内各节段运动波形  
Fig.5 Kinematic waveform of each segment for LDH patients and healthy people in one complete gait cycle during trunk flexion

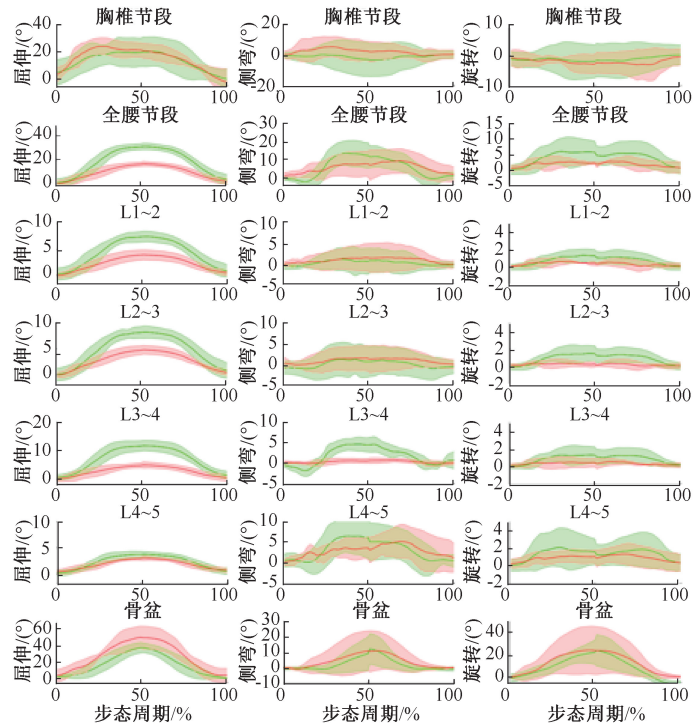


图6 LDH患者与健康人群对侧拾物时在1个完整步态周期内各节段运动波形  
Fig.6 Kinematic waveform of each segment for LDH patients and healthy people in one complete gait cycle during contralateral pickup

### 3 讨论

了解LDH患者日常活动时的运动学特征能够帮助医生更好地进行病情评估。但目前多数研究人员将整个腰椎节段视为单个刚性部分,忽略了不同腰椎节段的差异性。因此,本文将每个腰椎作为独立部分建立躯干细化模型,对比分析LDH患者与健康人群在3种日常活动下的运动学差异,旨在揭示以全腰节段为基础的躯干简化模型可能会忽略掉的一些运动学规律,改善脊柱的运动学研究方法。

本文研究的两种躯干模型,胸椎节段和骨盆的建模方式一致,主要区别在于躯干细化模型对腰椎节段进行细分。在3种日常活动中,从整体上看,LDH患者胸椎节段和骨盆运动角度的增加代偿了腰椎运动角度的减小,该结果与文献[2-4]中的研究结论一致。由于疼痛,LDH患者通常在日常活动中表现出受限的运动特征,他们采用不同的运动控制策略来缓解疼痛,并补偿不同日常活动中有限的节段或关节运动。

在水平行走过程中,Seay等<sup>[16]</sup>研究发现,在横断面上,LDH患者整个腰部的旋转有所降低,并通过增加骨盆的旋转角度作为代偿。Gomatos等<sup>[15]</sup>将腰椎节段分为上、下腰节段,同样发现LDH患者腰椎在横断面上的旋转角度减小,且下腰节段旋转角度小于上腰节段。本实验结果支持了上述研究结论,并且进一步发现腰椎旋转运动受限的主要是损伤的L4~5节段。与Jose等<sup>[7]</sup>的研究结论一致,本文发现,在躯干前屈过程中,LDH患者各节段的前屈角度显著降低,这主要由于前屈时可进一步促使髓核向后移位,并增加对受压神经根的牵拉,容易导致较剧烈的疼痛,从而使前屈活动受限。此外,本实验还发现,L3~4节段降低幅度最明显,推测L3~4节段承担了主要的屈伸运动,并且本实验中LDH患者损伤位置为下腰椎。在对侧拾物过程中,除了矢状面上与躯干前屈有相同的表现外,冠状面上LDH患者L3~4和L4~5节段的侧弯角度也有明显降低,并出现相应的骨盆代偿,推测该结果与本研究采用躯干细化模型有关。

综上所述,LDH患者腰部运动角度的降低主要来自损伤节段运动功能的下降。躯干简化模型只

能在运动幅度较大的躯干前屈和对侧拾物的矢状面上发现差异性,并且无法定位到损伤节段。将整个腰椎分为上腰和下腰节段的分析方法在一定程度上考虑了节段间的差异性,但同样存在如下局限性:①该方法定义L1~3为上腰节段,L3~5为下腰节段,但一些运动中L2~3和L3~4节段承担了较多的运动,该方法模糊了这两个节段的运动信息;②LDH中下腰椎发病率最高,该方法无法细化到损伤节段。而在临床上,获取损伤节段的详细运动信息可以更好地帮助病情的评估。躯干细化模型中将每个腰椎都当成独立的部分,能详细地进行损伤节段的运动学分析,有助于医生充分认识患者的腰椎运动和病情评估。

本研究的局限性如下:①受试的LDH患者数量较少,测试对象需进一步扩大。但在健康人群和LDH患者间发现了显著差异( $P < 0.05$ ),且时序图波形表现出的差异性明显;②采用粘贴在皮肤的标记点来驱动骨骼模型中的节段运动,虽然由三维空间坐标计算出的角位移能够反映椎骨屈伸、侧弯、旋转的角位移,但皮肤与椎骨之间的距离会导致角位移存在一定误差。因此,在完成数据采集后,根据AnyBody软件中修改后的模型进行光标点坐标的校准,并利用3个点的驱动方式替代1个点的驱动方式,减小了随机误差。

### 4 结论

本研究将每个腰椎当成独立部分建立细分躯干模型,对比分析15名健康男性和7名LDH患者在水平行走、躯干前屈、对侧拾物3种日常活动下的运动学差异,并对比躯干细化模型和躯干简化模型。LDH患者在3种日常活动中主要限制了损伤腰椎节段的运动。在某些运动中,只有躯干细化模型才能发现损伤腰椎节段的异常运动。因此,在进行LDH患者的运动学分析时,有必要将腰椎细分成5个独立节段。

#### 参考文献:

- [1] 蔡宗远,王少白,李国安.人体运动分析的发展与应用回顾[J].医用生物力学,2016,31(4):362-368.  
CAI ZY, WANG SB, LI GA. Human motion analysis: A review of its development and applications [J]. J Med Biomech, 2016, 31(4): 362-368.

- [ 2 ] DOLAN P, ADAMS MA. Influence of lumbar and hip mobility on the bending stresses acting on the lumbar spine [J]. *Clin Biomech*, 1993, 8(4): 185-192.
- [ 3 ] ELLISON JB, ROSE SJ, SHARMAN SA. Patterns of hip rotation range of motion: A comparison between healthy subjects and patients with low back pain [J]. *Phys Ther*, 1990, 70(9): 537-541.
- [ 4 ] ESOLA MA, MCCLURE PW, FITZGERALD GK, *et al.* Analysis of lumbar spine and hip motion during forward bending in subjects with and without a history of low back pain [J]. *Spine*, 1996, 21(1): 71-78.
- [ 5 ] LAIRD RA, GILBERT J, PETER K, *et al.* Comparing lumbo-pelvic kinematics in people with and without back pain: A systematic review and meta-analysis [J]. *BMC Musculoskel Dis*, 2014, doi: 10.1186/1471-2474-15-229.
- [ 6 ] KIM MH, YOO WG. Comparison of the lumbar flexion angle and repositioning error during lumbar flexion-extension in young computer workers in Korea with differing back pain [J]. *Work*, 2015, 51(2): 223-228.
- [ 7 ] JOSE JRF, RIBEIRO MA. Influence of hamstring tightness in pelvic, lumbar and trunk range of motion in low back pain and asymptomatic volunteers during forward bending [J]. *Asian Spine J*, 2015, 9(4): 535-540.
- [ 8 ] VAISEY M, GAZZI L, PUTZIE F, *et al.* Measurement of lumbar spine functional movement in low back pain [J]. *Clin J Pain*, 2014, 31(10): 876-885.
- [ 9 ] TATSUYA I, JUNZI K, AKIRA H, *et al.* Kinetic and kinematic variables affecting trunk flexion during level walking in patients with lumbar spinal stenosis [J]. *PloS One*, 2018, 13(5): e0197228.
- [ 10 ] 刘慧, 张喜林, 周楠, 等. 步态仿真下腰椎间盘退变合并骶髂关节紊乱的有限元分析[J]. *医用生物力学*, 2017, 32(1): 46-53.
- LIU H, ZHANG XL, ZHOU L, *et al.* Finite element analysis of lumbar disc degeneration with sacroiliac joint disorder by gait simulation [J]. *J Med Biomech*, 2017, 32(1): 46-53.
- [ 11 ] AHMADI A, MARUF N, BETAS H, *et al.* Kinematic analysis of dynamic lumbar motion in patients with lumbar segmental instability using digital video fluoroscopy [J]. *Eur Spine J*, 2009, 18(11): 1677-1685.
- [ 12 ] QAHTANI RS, JONES MD, THEOBALD PS, *et al.* Investigating the contribution of the upper and lower lumbar spine, relative to hip motion, in everyday tasks [J]. *Man Ther*, 2015, doi: 10.1016/j.math.2015.09.014.
- [ 13 ] PARKINSON S, CAMPBELL A, DANCERS W, *et al.* Upper and lower lumbar segments move differently during sit-to-stand [J]. *Man Ther*, 2013, 18(5): 390-394.
- [ 14 ] MITCHELL T, O' SULLIVAN PB, BURNETT AF, *et al.* Regional differences in lumbar spinal posture and the influence of low back pain [J]. *BMC Musculoskel Dis*, 2008, doi: 10.1186/1471-2474-9-152.
- [ 15 ] GOMATOS SP, BROCK T, DELURKS A, *et al.* Lumbar spine kinematics during walking in people with and people without low back pain [J]. *Gait Posture*, 2015, 42(4): 539-544.
- [ 16 ] SEAY JF, EMMERIK REA, HAMILL J. Influence of low back pain status on pelvis-trunk coordination during walking and running [J]. *Spine*, 2011, 36(16): E1070-1079.