

·临床研究·

量化评估早期系统康复对全膝关节置换患者步态的影响*

王 巍¹ 刘艳成¹ 王连成¹ 张 宽² 李耀民^{1,3}

摘要

目的:利用便携式步态分析仪(intelligent device for energy expenditure and physical activity, IDEEA)对全膝关节置换(total knee arthroplasty, TKA)患者的步态参数变化及特点进行测量,量化评估系统康复训练对TKA患者的康复效果,并对康复治疗方案的改进提供一定参考价值。

方法:将符合纳入标准的单侧膝骨关节炎(knee osteoarthritis, KOA)患者74例随机分为试验组与对照组。对照组接受骨科术后常规康复治疗,试验组接受系统化康复训练。分别于术前及术后第12周进行西安大略及麦克马斯特大学骨关节炎指数评分(Western Ontario and McMaster University Osteoarthritis index, WOMAC)、美国特种外科医院膝关节评分(The hospital for special surgery knee score, HSS)、膝关节活动度测量及步态分析。

结果:术后12周试验组患者在WOMAC评分、HSS评分及膝关节活动度方面明显优于对照组。试验组手术侧肢体摆动强度、蹬地强度、跖屈强度、步速、步频、步长、步幅在行系统康复后较对照组有明显改善。

结论:术后12周系统康复可明显减轻TKA患者膝关节疼痛,改善下肢功能;IDEEA可客观评估TKA患者康复治疗前后的步态参数,对康复治疗方案的改进提供一定参考价值。

关键词 步态分析;全膝关节置换术;早期系统康复;便携式步态分析仪

中图分类号:R685,R493 文献标识码:A 文章编号:1001-1242(2022)-09-1180-06

Evaluation of the effect of early systematic rehabilitation on gait characteristics of patients undergoing total knee arthroplasty/WANG Wei, LIU Yancheng, WANG Liancheng, et al./Chinese Journal of Rehabilitation Medicine, 2022, 37(9): 1180—1185

Abstract

Objective: To measure the changes and characteristics of gait parameters of patients with total knee arthroplasty (TKA) by using a portable gait analyzer- intelligent device for energy expenditure and physical activity (IDEEA), to quantitatively evaluate the rehabilitation effect of systematic rehabilitation training on TKA patients, and to provide some reference value for the improvement of rehabilitation treatment.

Method: Seventy-four patients with unilateral knee osteoarthritis (KOA) were randomly divided into experimental group and control group. The control group received routine rehabilitation treatment after orthopedic surgery, and the experimental group received systematic rehabilitation training. WOMAC score, HSS score, ranges of motion of the knees and gait analysis were performed before and 12 weeks after operation.

Result: After 12 weeks, WOMAC score, HSS score and ranges of motion of the knees of the experimental group were significantly better than that of the control group. Compared with the control group, the experimental group showed significant improvements in limb swing strength, ground pedal strength, plantar-flexor strength, step speed, step frequency, step length and stride length after systemic rehabilitation.

DOI:10.3969/j.issn.1001-1242.2022.09.005

*基金项目:天津市天津医院科技基金项目(TJYY1806)

1 天津医院,天津市,300211; 2 首都医科大学生物医学工程学院; 3 通讯作者

第一作者简介:王巍,男,主治医师; 收稿日期:2021-09-23

Conclusion: Our findings suggest that systemic rehabilitation can significantly reduce knee pain and improve lower limb function; IDEEA can objectively evaluate the gait parameters of TKA patients before and after rehabilitation treatment, and provide some reference value for the improvement of rehabilitation treatment.

Author's address Department of Rehabilitation, Tianjin Hospital, Tianjin, 300211

Key word gait characteristics; total knee arthroplasty; early systematic rehabilitation; intelligent device for energy expenditure and physical activity

膝关节炎(knee osteoarthritis, KOA)是下肢最常见的骨关节炎。有研究表明,在我国50岁以上人群中,男性KOA患病率为20.4%,女性为20.3%^[1-2]。KOA引起的疼痛和僵硬会导致关节活动度降低和进行性步态功能障碍^[3]。全膝关节置换术(total knee arthroplasty, TKA)是治疗终末期重症膝关节炎最常见的方法之一,可显著减轻患者疼痛,改善膝关节功能。然而,有研究表明,与健康受试者相比,接受全膝关节置换术后患者步速降低了15%,楼梯行走速度降低了50%,跌倒风险增加了7%—40%,在6min步行测试中的表现降低了20%^[4-5]。术后早期康复介入可有效改善TKA患者下肢功能,根据TKA手术后特定的步态损伤制定侧重于改善膝关节功能和步态再训练的康复策略,可促进患者的术后恢复,并减少异常步态的发生^[6]。

临床上,康复效果的评定主要采用量表及问卷形式^[3]。但是,KOA患者的主观评分结果往往受多种外界因素限制,继而影响评估结果的准确性。步态分析可以客观地反映患者下肢功能的改善情况。定量步态分析可在步态实验室进行,如进行光学运动跟踪和分析、录像带分析、测力板和肌电图等^[7-8]。但由于成本高、实验空间特殊、技术要求高、数据分析工作繁琐等原因,这些方法在临床应用上存在一定困难。而且,从步态实验室收集步态数据有限,不能反映受试者的真实步态信息。因此,临床上需要一种便携式、可靠、低成本、省时的步态分析系统。

近年来,随着可穿戴传感器技术的进步,使得在传统步态实验室之外记录和分析步态成为可能^[9-10]。由美国公司研制的便携式步态分析仪器(intelligent device for energy expenditure and physical activity, IDEEA)配备了加速计和陀螺仪,可用于监测受试者的日常活动和步态参数,其操作方便,数据可靠,已被用于多项临床研究中^[11-13]。本研究拟根据TKA术后特定的步态损伤制定以改善

膝关节功能和步态再训练为重点的康复策略。采用IDEEA对行TKA患者术前及术后12周的步态进行功能量化评估,更准确地分析患者TKA前后的步态参数改变及康复过程中的步态变化,为TKA后康复治疗方案的制定及修改提供理论依据。

1 资料与方法

1.1 一般资料

选取天津市天津医院关节外科2019年8月—2020年11月间共74例行TKA的患者,患者入组前需在无辅助情况下可行走150m以上。采用随机数字表法将患者分为试验组和对照组,每组各37例患者。两组患者均由同组关节外科医生采用同一种术式。术后两组均接受骨科常规抗凝、消肿等治疗。试验组康复训练均由具有5年以上治疗经验的康复师给予康复治疗。本研究试验方案经过医院伦理委员会同意(批号:2019医伦审066),本研究已与所有接受临床调研的患者签订告知书。

1.2 纳入标准

①单侧膝关节炎终末期初次膝关节置换术者;②年龄在55岁—80岁之间者;③术前未伴发严重内科病变及神经官能症等可能影响术后康复的疾病者;④患者及家属签署知情同意书并愿意配合,并有能力完成康复治疗及临床调研者。

1.3 排除标准

①合并心脑血管病后遗症者;②合并精神障碍或心理疾病不能配合康复治疗者;③肿瘤及严重心、肝、肾功能异常者;④术后出现下肢静脉血栓、关节感染等影响康复治疗进程者;⑤合并其他关节病变导致下肢活动明显受限者。

1.4 治疗方法

对照组只进行常规康复治疗(如膝关节主被动活动训练、力量训练、呼吸训练等)。试验组以Dávila Castrodad IM等^[14]总结的训练方案为基础,参考

患者TKA术前膝关节评定及步态测试结果,根据全膝关节置换术后特定的步态损伤制定出以改善膝关节功能和步态再训练为重点的康复方案,为患者开据个体化处方,定期康复评估,根据评估结果调整康复方案。主要包括:躯干核心稳定训练、髌关节运动疗法、膝关节主动屈伸角度训练、重心转移训练、步态训练、下肢力量及耐力训练等。两组治疗均从术后第2天开始,术后4周内,每天治疗1次;术后4—8周,2天治疗1次;术后8—12周,每周治疗2次。

1.5 随访和评定方法

入组前建立住院患者个人信息档案,包括姓名、性别、年龄、身高、体重、联系电话、住院诊断等内容。康复治疗期间,定期回访患者病情变化和恢复情况。分别于术前1天、术后12周进行2次疗效评定。

1.5.1 采用WOMAC评分、HSS评分及膝关节活动度评估患者膝关节功能情况:西安大略及麦克马斯特大学骨关节炎指数评分(Western Ontario and McMaster University Osteoarthritis index, WOMAC)分别从疼痛、僵硬和进行日常生活的难度三大方面评估膝关节功能。本量表评定内容包括24个问题,每题分别计0—10分。将各项评分累积后计算总分,总分越高表明膝关节功能障碍越严重。美国特种外科医院膝关节评分(The hospital for special surgery knee score, HSS)主要对患者的疼痛、功能、活动度、肌力、屈曲畸形、稳定性等方面进行评分。将每一项评分累积后计算总分,评分大于85分为优秀,70—84分为良好,60—69分为一般,<60分为较差。手术侧膝关节主动屈伸活动度通过量角器由同一名治疗师测量。

1.5.2 步态参数测量:所有入组患者均采用IDEAA进行步态数据的采集与分析。IDEAA主要由一个主机和7个肢体微型传感器组成。通过粘贴在患者双大腿前侧、双踝外侧、双足底部和胸骨上的传感器采集步态信息(图1)。步态数据的测量:受试者佩戴IDEAA仪器后,在30m长的平坦路面自由来回行走120m。通过分析软件输出步态参数分析结果。共11个步态参数纳入研究,包括7个常用步态参数:单腿站立时间、双腿站立时间、步态周期时间、步速、步频、步长、步幅和4个新定义的步态参数。

1.6 统计学分析

采用与IDEAA配套的软件分析并导出数据,采用SPSS 21.0数据分析软件对所导出数据进行统计分析。定量数据以平均值±标准差表示,数据行配对 t 检验, $P<0.05$ 表示差异具有显著性意义。

2 结果

2.1 入组患者基本信息

入组74例患者中,试验组有4例未完成研究出组(3例因后期拒绝配合康复治疗及数据采集,1例因内科疾病住院无法完成检测),对照组有5例未完成研究出组(均因后期拒绝配合康复治疗及数据采集),两组患者性别、年龄、身高、体重、BMI比较,无显著性差异($P>0.05$)(表1)。

2.2 主观评分及关节活动度结果

WOMAC评分分别从疼痛、僵硬和进行日常生活的难度三大方面评估膝关节的功能(表2)。组间对比:两组评分在TKA手术前差异无显著性($P>0.05$),术后第12周评分试验组优于对照组,差异有显著性($P<0.05$)。组内对比:两组术后第12周评分均明显低于术前($P<0.01$)。

HSS评分量表主要通过通过对患者的疼痛、功能、活动度、肌力、屈曲畸形、稳定性方面进行评分(表3)。组间对比:两组HSS评分在TKA手术前差异无显著性($P>0.05$),术后第12周评分试验组优于对照组,差异有显著性($P<0.05$)。组内对比:两组术后第12周评分均明显低于术前($P<0.05$)。

术后第12周手术侧膝关节主动屈曲活动度及主动伸膝受限度数试验组均优于对照组,两组比较

图1 IDEAA结构及传感器位置



差异有显著性意义($P<0.05$),见表4—5,说明早期系统康复训练较常规治疗可明显减轻TKA患者膝关节疼痛,改善下肢功能。

2.3 步态参数变化

术前步态评估中,两组患者步态参数无显著性差异($P>0.05$)。术后12周,两组步态参数,试验组患者手术侧肢体摆动强度、蹬地强度、跖屈强度、步速、步频、步长、步幅在行系统康复12周后较对照组有显著改善($P<0.05$);而单腿支撑时间、双腿支撑时间、周期时间、抬腿强度均无显著改善($P>0.05$),见表6。试验组患者非手术侧肢体除步速、步频、步长、步幅在行系统康复12周后较对照组有显著改善外($P<0.05$),其余均无明显变化。

3 讨论

TKA术后,患者疼痛和关节活动度可得到显著改善,但行走过程中膝关节的正常生物力学功能并不能完全恢复,其它下肢关节可能会发生代偿^[15-16]。TKA手术后观察到的异常步态可能是保留术前异常步态模式与手术干预共同作用的结果^[17]。因此,TKA患者术后治疗策略应该侧重于术后系统康复治疗,通过加强步态再训练以进一步改善膝关节功能。

通过对TKA术后患者WOMAC评分、HSS评分、膝关节活动度的分析发现,康复治疗12周后试验组主观评分及关节活动度较对照组明显改善。由

表1 两组患者一般资料 (n=65, $\bar{x}\pm s$)

组别	年龄(岁)	性别(例)		体重(kg)	身高(m)	BMI
		男	女			
试验组	64.23±4.77	8	29	68.75±7.38	1.62±0.12	26.8±2.46
对照组	65.14±3.92	10	27	66.93±6.44	1.69±0.09	26.1±2.23

表2 两组患者术后12周WOMAC评分比较 (n=65, $\bar{x}\pm s$)

组别	手术前	术后12周	P值
试验组	87.27±24.14	23.34±11.97	0.003
对照组	85.94±23.69	31.72±13.72	0.001
P值	0.473	0.027	

表3 两组患者术后12周HSS评分比较 (n=65, $\bar{x}\pm s$)

组别	手术前	术后12周	P值
试验组	66.23±8.21	85.35±9.92	0.013
对照组	67.57±7.93	71.65±11.47	0.009
P值	0.632	0.021	

表4 两组患者术后12周膝关节主动屈曲活动度比较 (n=65, $\bar{x}\pm s$)

组别	手术前	术后12周	P值
试验组	67.88±6.23	121.33±7.92	0.005
对照组	69.44±7.82	98.66±4.71	0.021
P值	0.27	0.014	

表5 两组患者术后12周膝关节主动伸膝受限度数比较 (n=65, $\bar{x}\pm s$)

组别	手术前	术后12周	P值
试验组	9.02±5.71	2.67±2.12	0.02
对照组	8.76±5.90	6.52±3.15	0.03
P值	0.38	0.01	

此表明,术后12周的系统康复可有效减轻患者关节疼痛及僵硬程度,提高日常生活能力。有研究表明,KOA患者步行速度会表现出不同程度的降低^[18-19],并且,受累侧肢体的单腿支撑时间明显低于对侧肢体^[20]。其原因可能是患者行走过程中采用一种止痛的步态模式,通过减少膝关节力矩和关节负荷来缓解膝关节疼痛^[21-22]。本研究中,试验组与对照组患侧相比单侧肢体单腿支撑时间及双腿支撑时间均无显著性差异,考虑是由于当引起受累侧肢体步态异常的畸形、疼痛等因素通过TKA消除后,受累侧肢体的单腿支撑时间得到明显延长,与对侧肢体差异不显著所致^[23]。

与其它研究结果一致,我们观察到试验组双侧平均步态速度明显高于对照组^[24-26]。其原因可能是,系统化康复治疗加强了下肢力量及稳定性,膝关节负荷明显降低,膝关节功能得到进一步改善。本研究表明,系统化康复治疗可明显增加患者双侧肢体的步长,双侧的不对称性进一步减少。KOA患者健侧及患侧步长均表现出不同程度的缩短,但发生机制并不完全相同。在健侧,可能是由于患侧支撑相时间缩短及力量稳定性下降引起的健侧摆动时间减少所致;在患侧,步长缩短可能与膝关节活动度降低及力量下降有关,步长缩短可间接减轻关节疼痛和髌股关节应力^[27-28]。本研究试验组中,我们术后早期即进行步态训练与指导,强化下肢关键肌群的力量及耐力训练,增加关节活动度。步长的改变考虑与下肢稳定性增加及疼痛改善有关。

IDEEA可测量下肢瞬时力量改变。抬腿强度主要反映摆动相起始时股四头肌的力量变化;摆腿

表6 两组患者术后12周步态平均变量 (n=65, $\bar{x}\pm s$)

步态参数	手术侧			非手术侧		
	试验组	对照组	P值	试验组	对照组	P值
单腿支撑时间(ms)	424.6±37.2	420.6±37.2	0.464	432.5±70.2	437.5±74.6	0.248
双腿支撑时间(ms)	123.9±58.1	126.9±62.1	0.728	181.4±43.5	176.2±57.3	0.391
周期时间(s)	1.21±0.16	1.20±0.13	0.092	1.10±0.17	1.12±0.12	0.087
抬腿强度(G)	1.49±0.44	1.42±0.41	0.064	1.37±0.29	1.39±0.31	0.095
摆动强度(G)	0.62±0.20	0.53±0.12	0.000	0.64±0.23	0.54±0.20	0.877
蹬地强度(G)	1.18±0.41	1.02±0.29	0.010	1.33±0.27	1.24±0.23	0.727
跖屈强度	2.97±0.70	2.77±0.81	0.007	2.93±0.52	2.84±0.68	0.442
步速(m/min)	56.28±10.58	52.24±11.43	0.002	55.89±9.24	49.19±10.11	0.011
步频(steps/min)	107.43±14.25	103.27±15.14	0.019	107.42±12.71	105.42±11.64	0.012
步长(m)	0.48±0.06	0.46±0.07	0.000	0.47±0.07	0.44±0.05	0.018
步幅(m)	0.94±0.26	0.91±0.16	0.011	0.93±0.11	0.90±0.11	0.022

注:G为重力加速度,9.8m/s。

强度则反映了屈膝肌群在肢体摆动相时的力量变化;蹬地强度反映了腓绳肌与足背屈肌群在摆动相末期到支撑相早期的力量变化;跖屈强度反映了由小腿三头肌收缩而产生的跖曲力量改变^[29]。本研究中,试验组患侧肢体蹬地强度、跖屈强度及摆腿强度较对照组均明显改善,而抬腿强度两组间无显著性差异。

研究表明,TKA术后患者踝关节跖屈和背屈峰值力矩显著增加,推动腿部向前摆动,部分代偿受损的膝关节功能^[28]。髌关节屈曲挛缩及髌关节伸展受限在老年人中很常见,导致步长和步速降低^[30-32]。髌关节后伸不足可能引起踝关节发力不足,使踝关节活动受限。推动身体向前移动,需要髌膝踝共同发力。因此,要提高TKA术后患者的步行能力,除了针对膝关节的康复外,还需要增加髌关节和踝关节的力量与稳定训练^[33]。本研究中,我们强化了髌、踝关节力量、稳定及核心耐力训练,试验组患侧肢体蹬地强度、跖屈强度及摆腿强度较对照组明显改善考虑与此有关。抬腿强度主要反映摆动相起始时股四头肌的力量变化,本研究中,两组间抬腿强度无显著性差异。有证据表明,在膝关节不稳定时,术前过度强化股四头肌会加重膝关节压力,加重疼痛^[34]。因此,本研究中试验组患者并没有强化股四头肌的力量训练,只进行了常规的股四头肌力量及耐力训练。然而,TKA术后患者病变的膝关节已更换成假体,术后康复阶段需要强化股四头肌等膝关节周围肌肉力量来稳定膝关节,降低假体磨损,增加假体使用年限^[35]。后期康复方案修订中需要进一步优化膝关节周围肌肉力量训练方案,加强股四头肌力量训

练。

另外,对于健侧肢体来说,步速、步幅及步长较对照组均有明显改善,表明步态模式并不是由一侧肢体决定的,两侧肢体会互相影响。因此,TKA术后,康复方案制定一定要考虑整体,不可以只进行患侧治疗。

综上所述,早期系统化康复治疗可改善TKA术后患者步态模式,有效减轻患者膝关节疼痛和僵硬程度。但是,TKA术后12周,患者仍以双侧不对称步态为特征。本研究的样本量相对较小,康复及随访时间相对较短,因此需要本研究小组后续进一步增加样本量及随访时间,从而提出更加有效与科学的康复方案以便在临床推广。

参考文献

[1] Chaganti RK, Lane NE. Risk factors for incident osteoarthritis of the hip and knee[J]. Curr Rev Musculoskelet Med, 2011,4(3):99—104.

[2] 胡军,陆翊超,惠宇坚,等. 中老年膝原发性骨关节炎患病率及危险因素分析[J]. 江苏医药,2015,41(14):1640—1643.

[3] Whittle MW. Clinical gait analysis: a review[J]. Hum Movement Sci,1996,15(3):369—387.

[4] Levinger P, Menz HB, Morrow AD, et al. Lower limb biomechanics in individuals with knee osteoarthritis before and after total knee arthroplasty surgery[J]. J Arthroplasty, 2013,28(6):994—999.

[5] Bade MJ, Kohrt WM, Stevens-Lapsley JE. Outcomes before and after total knee arthroplasty compared to healthy adults[J]. J. Orthop Sports Phys Ther,2010,40(9):559—567.

[6] Zanasi S. Innovations in total knee replacement: new trends in operative treatment and changes in peri-operative management[J]. Eur Orthop Traumatol,2011,2(1—2):21—31.

- [7] Hanlon M, Anderson R. Real-time gait event detection using wearable sensors[J]. *Gait Posture*, 2009, 30(4): 523—527.
- [8] Backhouse MR, Hensor EM, White D, et al. Concurrent validation of activity monitors in patients with rheumatoid arthritis[J]. *Clin Biomech*(Bristol, Avon), 2013, 28(4): 473—479.
- [9] González RC, López AM, Rodríguez-Uría J, et al. Real-time gait event detection for normal subjects from lower trunk accelerations[J]. *Gait Posture*, 2010, 31(3): 322—325.
- [10] Kim SC, Kim JY, Lee HN, et al. A quantitative analysis of gait patterns in vestibular neuritis patients using gyroscope sensor and a continuous walking protocol[J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2014(11): 58.
- [11] Zhang K, Werner P, Sun M, et al. Measurement of human daily physical activity[J]. *Obes Res*, 2003, 11(1): 33—40.
- [12] Zhang K, Pi-Sunyer FX, Boozer CN. Improving energy expenditure estimation for physical activity[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2004, 36(5): 883—889.
- [13] Gorelick ML, Bizzini M, Maffiuletti NA, et al. Test-retest reliability of the IDEEA system in the quantification of step parameters during walking and stair climbing[J]. *Clin Physiol Funct Imaging*, 2009, 29(4): 271—276.
- [14] Dávila Castro IM, Recai TM, Abraham MM, et al. Rehabilitation protocols following total knee arthroplasty: a review of study designs and outcome measures[J]. *Ann Transl Med*, 2019, 7(Suppl 7): S255.
- [15] Milner CE. Is gait normal after total knee arthroplasty? systematic review of the literature[J]. *J Orthop Sci*, 2009, 14(1): 114—120.
- [16] McClelland JA, Webster KE, Feller JA. Gait analysis of patients following total knee replacement: a systematic review[J]. *Knee*, 2007, 14(4): 253—263.
- [17] Andriacchi TP, Galante JO, Fermier RW. The influence of total knee-replacement design on walking and stair-climbing[J]. *J Bone Joint Surg Am*, 1982, 64(9): 1328—1335.
- [18] Broström EW, Esbjörnsson AC, von Heideken J, et al. Gait deviations in individuals with inflammatory joint diseases and osteoarthritis and the usage of three-dimensional gait analysis[J]. *Best Pract Res Clin Rheumatol*, 2012, 26(3): 409—422.
- [19] Seeger JB, Schickschneit JP, Schuld C, et al. Change of gait in patients with lateral osteoarthritis of the knee after mobile-bearing unicompartmental knee arthroplasty[J]. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2015, 23(7): 2049—2054.
- [20] Mootanah R, Hillstrom HJ, Gross KD, et al. Stance and single support time asymmetry identify unilateral knee OA and the involved limb: the multicenter osteoarthritis study[J]. *Osteoarthritis Cartilage*, 2013(21): S246—S247.
- [21] Sagawa Y Jr, Armand S, Lubbeke A, et al. Associations between gait and clinical parameters in patients with severe knee osteoarthritis: a multiple correspondence analysis[J]. *Clin Biomech*(Bristol, Avon), 2013, 28(3): 299—305.
- [22] Creaby MW, Bennell KL, Hunt MA. Gait differs between unilateral and bilateral knee osteoarthritis[J]. *Arch Phys Med Rehabil*, 2012, 93(5): 822—827.
- [23] 周萌, 曹光磊, 张宽, 等. 便携式步态分析仪量化评价全膝关节置换患者的步态特征[J]. *中国矫形外科杂志*, 2015, 23(7): 615—619.
- [24] Oberg T, Karsznia A, Oberg K. Basic gait parameters: reference data for normal subjects, 10-79 years of age[J]. *J Rehabil Res Dev*, 1993, 30(2): 210—223.
- [25] Peel NM, Kuys SS, Klein K. Gait speed as a measure in geriatric assessment in clinical settings: a systematic review[J]. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci*, 2013, 68(1): 39—46.
- [26] Hollman JH, McDade EM, Petersen RC. Normative spatio-temporal gait parameters in older adults[J]. *Gait Posture*, 2011, 34(1): 111—118.
- [27] Hatfield GL, Hubley-Kozey CL, Astephen Wilson JL, et al. The effect of total knee arthroplasty on knee joint kinematics and kinetics during gait[J]. *J Arthroplasty*, 2011, 26(2): 309—318.
- [28] Levinger P, Menz HB, Morrow AD, et al. Lower limb biomechanics in individuals with knee osteoarthritis before and after total knee arthroplasty surgery[J]. *J Arthroplasty*, 2013, 28(6): 994—999.
- [29] Perry J, Burnfield JM. Gait analysis: normal and pathological function[M]. 2nd ed. Thorofare: SLACK Incorporated, 2010: 551.
- [30] Kerrigan DC, Todd MK, Della Croce U, et al. Biomechanical gait alterations independent of speed in the healthy elderly: evidence for specific limiting impairments[J]. *Arch Phys Med Rehabil*, 1998, 79(3): 317—322.
- [31] Lee LW, Zavarei K, Evans J, et al. Reduced hip extension in the elderly: dynamic or postural?[J]. *Arch Phys Med Rehabil*, 2005, 86(9): 1851—1854.
- [32] Riley PO, DellaCroce U, Kerrigan DC. Effect of age on lower extremity joint moment contributions to gait speed[J]. *Gait Posture*, 2001, 14(3): 264—270.
- [33] Kerrigan DC, Xenopoulos-Oddsson A, Sullivan MJ, et al. Effect of a hip flexor-stretching program on gait in the elderly[J]. *Arch Phys Med Rehabil*, 2003, 84(1): 1—6.
- [34] Petterson SC, Barrance P, Buchanan T, et al. Mechanisms underlying quadriceps weakness in knee osteoarthritis[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2008, 40(3): 422—427.
- [35] 宫良丰, 齐志明, 李庆, 等. 本体感觉强化训练联合肌力训练对全膝关节置换术患者下肢功能恢复的影响[J]. *中国医师杂志*, 2019, 21(2): 261—263.