

·临床研究·

减重步行训练改善脑卒中患者小腿肌肉形态结构的生物力学研究*

刘 鹏¹ 王艳君¹ 毛玉蓉¹ 黄东锋¹ 李 乐^{1,2}

摘要

目的:观察减重步行训练(BWSTT)后脑卒中患者小腿肌肉形态结构及运动功能的改变,从肌肉层次探讨BWSTT对脑卒中患者下肢运动功能影响的生物力学机制。

方法:将15例亚急性期脑卒中患者随机分为实验组(8例)和对照组(7例),实验组进行BWSTT加常规的物理治疗,对照组仅进行常规的物理治疗,并保证两组训练量相等。连续训练3周,每周5天,每天1次,每次60min。两组患者健侧、患侧在训练前后均进行以下评定:①用B型超声检测不同踝关节角度下胫骨前肌(TA)、腓肠肌内侧头(MG)的形态结构参数,包括羽状角、肌肉厚度及肌纤维长度;②用便携式肌力与关节活动测试仪测量踝关节的肌力和活动度;③下肢采用Fugl-Meyer量表(FMA)评分;④下肢采用改良Ashworth痉挛量表(MAS)评分。

结果:训练后,实验组患侧TA的羽状角、肌肉厚度和MG的肌纤维长度均显著增加($P<0.05$),而对照组小腿肌肉参数在训练前后的差异均无显著性意义($P>0.05$);训练后实验组患侧的踝关节肌力显著增加($P<0.05$),而对照组踝关节肌力在训练前后的差异无显著性意义($P>0.05$);训练后实验组下肢FMA评分显著提高($P<0.05$),下肢MAS评分显著降低($P<0.05$),而对照组下肢FMA评分和MAS评分在训练前后的差异均无显著性意义。

结论:BWSTT较传统的步态训练方法更能有效改善脑卒中患者下肢FMA评分和MAS评分及踝关节肌力,通过改变患者肌肉肌腱的形态结构可改善患者的运动功能。

关键词 脑卒中;超声;减重步行训练;运动功能;生物力学

中图分类号:R743,R730.41 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-1242(2012)-09-0792-05

Effects of body weight support treadmill training on the architectural parameters and motor function of calf muscles in stroke survivors: a biomechanical study/LIU Peng, WANG Yanjun, MAO Yurong, et al// Chinese Journal of Rehabilitation Medicine, 2012, 27(9): 792—796

Abstract

Objective: To evaluate the architectural parameters and motor function changes of calf muscles after body weight support treadmill training (BWSTT) in subacute stroke survivors, and to investigate fascicular changes as mechanisms underlying the effects of BWSTT on motor function.

Method: Fifteen subacute stroke survivors were recruited and randomly assigned to BWSTT combined with conventional physical therapy, except for conventional gait training (experimental group, $n=8$) and conventional physical therapy only (control group, $n=7$). All patients were treated in 60-min sessions every weekday for 3 weeks. The muscle architectural parameters of tibialis anterior(TA) and medial gastrocnemius(MG) including the pennation angle, thickness, and fascicle length were measured at various ankle positions using ultrasonography. The muscle strength and the joint angle were recorded by hand-hold dynamometer. Modified Ashworth scale (MAS) and the Fugl-Meyer assessment (FMA) were also evaluated. Assessments were performed at baseline and after the 3-week

DOI:10.3969/j.issn.1001-1242.2012.09.002

*基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(11yRpy22)

1 中山大学附属第一医院康复医学科,广州市越秀区中山二路58号,510080; 2 通讯作者

作者简介:刘鹏,女,博士,副主任医师;收稿日期:2012-06-08

treatment.

Result: The experimental group had larger pennation angle and thickness in TA and longer fascicle length in MG than those at baseline ($P<0.05$). However, there was no such trend in control group. Ankle muscle strength enhanced after BWSTT ($P<0.05$), but that was not found in control group ($P<0.05$). After the gait training, FMA scores improved ($P<0.05$) and MAS scores of lower limb reduced ($P<0.05$) in experimental group. However, there was no significant difference of assessment scores in control group ($P>0.05$).

Conclusion: BWSTT can improve the motor function of subacute stroke patients by changing the muscle architecture. BWSTT is feasible and more effective than conventional gait training with regard to clinical assessment scales.

Author's address Dept. of Rehabilitation Medicine, the First Affiliated Hospital, Sun Yat-sen University,

Key word stroke; ultrasound; body weight support treadmill training; motor function; biomechanical

恢复和改善偏瘫患者的步行功能是脑卒中神经康复极为重要的内容和目标^[1]。减重步行训练(body weight support treadmill training, BWSTT)能够不同程度地改善脑卒中患者的步态、步行能力、平衡能力^[1-2]。当前研究的热点和难点是BWSTT改善患者步行能力背后的肌肉肌腱生物力学变化与影响机制尚不清楚。本研究旨在从肌肉层次探讨BWSTT对脑卒中患者运动功能影响的生物力学机制。

1 对象与方法

1.1 研究对象

选择2011年3月—2012年4月在中山大学附属第一医院康复医学科住院治疗的亚急性偏瘫患者15例,随机分为实验组(8例)和对照组(7例),所有入选对象均对本研究充分理解并签署知情同意书。患者一般资料见表1。

纳入标准:以1995年全国第四届脑血管病学术

表1 两组患者一般资料比较 (x±s)

组别	例数	性别(例)		年龄(岁)	身高(cm)	体重(kg)	偏瘫侧(例)		性质(例)		病程(d)	FMA
		男	女				左	右	梗死	出血		
实验组	8	5	3	60.7±8.7	167.43±5.62	61.07±3.03	4	4	5	3	47.8±16.9	23.1±4.6
对照组	7	4	3	54.6±5.9	169.20±8.79	61.30±5.59	4	3	4	3	61.7±24.3	21.8±4.5

组间比较各项指标差异均无显著性意义 $P>0.05$ 。

会议通过的诊断要点^[3]为诊断标准,临床诊断为脑梗死或脑出血,并经CT或MRI检查证实;40岁≤年龄≤75岁;生命体征平稳;病程≤3个月;首次发病,单侧脑损害;下肢伸直痉挛性瘫痪,踝关节肌张力改良Ashworth痉挛量表(MAS)分级≥1级,踝关节肌力MMT分级≥3级,下肢简化Fugl-Meyer量表评分(Fugl-Meyer assessment, FMA)≤28分。

排除标准:小脑或双侧脑损害;明显认知障碍(MMSE≤17分)、严重心脏问题(如充血性心衰、无法可控制的高血压)等不能完成和不能配合者;下肢有骨关节疾病及神经系统疾病史的人群。

1.2 训练和治疗方案

两组患者临床用药情况基本相同。均连续训练3周,每周5天,每天1次,每次60min。实验组进行BWSTT加常规的物理治疗,第一周每日做BWSTT 20—30min,第二、三周每日做BWSTT 30—40min。根据患者运动功能损伤的具体状况决定初始减重的

程度,一般不超过患者体重的30%—40%,运动平板速度从0.2—0.5m/s开始,以后根据患者步态的恢复情况将逐步减少减重量直至患者完全负重,并逐步增加平板的运动速度至1.2m/s。对功能较差、易于疲劳的患者可采用间歇训练法,间歇的时间及频率可根据患者的耐受程度而异,通常间歇时间为3—5min,以患者主观感觉疲劳有所缓解为度。其他常规的物理治疗包括负重、牵伸训练、躯干平衡训练等,但不做传统的步态训练。对照组仅进行常规的物理治疗,主要包括:徒手牵伸、肌力训练、平衡训练、转移、上下楼梯训练以及步态训练等。

1.3 测量方法

采用便携式B型超声诊断仪(DP6600, Mindray Inc),探头频率为7.5MHz,以获取清晰的肌肉骨骼超声图像。选取不同踝关节角度下胫骨前肌(tibialis anterior, TA)、腓肠肌内侧头(medial gastrocnemius, MG)的形态结构参数,包括羽状角、肌肉厚度及肌纤

维长度;选取踝关节背屈0—15°和跖屈0—45°的活动范围。踝关节每变动15°做1次测量,共选取5个不同的踝关节角度:-15°(背屈),0°(解剖中立位),+15°(跖屈),+30°及+45°。利用B型超声技术获取不同踝关节角度下静息及最大等长收缩时的矢状面超声图像,每种状态均获取三张超声图像。同时用便携式肌力与关节活动测试仪(MicroFET3, Hoggan Inc)测量踝关节的肌力和关节角度;测试期间可给予受试者适当休息,以避免在疲劳的情况下进行测量。测量时患者取仰卧位,在膝关节伸直的情况下变动踝关节角度,测量TA时超声探头置于胫骨近端与踝之间中点的肌腹处^[4],测量MG时超声探头置于胫骨外侧髁和外踝连线中上1/3交点的肌腹处^[5]。注意超声探头应垂直于皮肤表面,通过超声导电胶充分接触皮肤而不压迫软组织。其他评测指标还包括:下肢简式FMA量表评分、下肢MAS评分。两组患侧、健侧在训练前后均评定1次,由专人完成,采用单盲的形式,评估者对患者的分组情况不知情。

1.4 数据分析

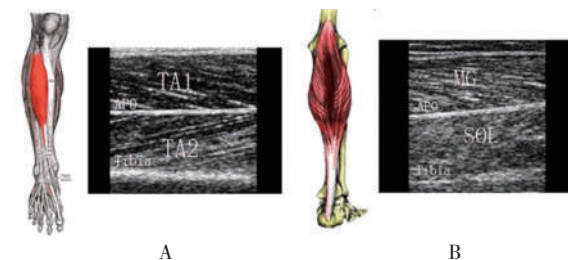
胫骨前肌为双羽状肌,既往研究已证实其在沿肌腹的矢状面超声图像上双侧的羽肌部分是对称的^[4],并且大多文献都使用单侧数据,照此在本研究中也分析靠近体表的一侧羽肌。将B型黑白超声图像导入计算机,利用图像处理软件划分肌膜、肌肉、肌腱、骨骼等不同部位,测量羽状角、肌肉厚度和肌纤维长度等参数。每一图像数据均测量3次,取其平均值进行分析以减小误差。沿肌纤维走向设定长度和角度,视野外肌纤维按平行四边形模型延长计算。如图1所示。

1.5 统计学分析

数据分析应用 SPSS 15.00 版统计软件。所测的数据以均值±标准差表示。采用组间和角度的双因素方差分析比较入组时脑卒中患者健侧、患侧肌力、肌肉参数等指标的差异,具有显著意义之后用posthoc 检验进行两两比较;采用配对 *t* 检验比较训练前后肌肉参数、肌力及FMA评分的差异;采用秩和检验比较训练前后MAS评分的差异。设定显著性水平为 $P<0.05$ 。

2 结果

图1 某受试者膝关节伸直时TA(A)、MG(B)的矢状面超声图像



TA1:胫骨前肌浅层羽肌;TA2:胫骨前肌深层羽肌;MG:腓肠肌内侧面;SOL:比目鱼肌;APO:腱膜;Tibia:胫骨

2.1 肌肉形态结构参数比较

训练前后TA、MG的形态结构参数如表2所示。经过3周的步态训练,实验组患侧TA的羽状角、肌肉厚度在静息及最大等长收缩状态下均较训练前显著增大($P<0.05$),而肌纤维长度在训练前后的差异无显著性意义($P>0.05$);实验组患侧MG的肌纤维长度在静息及最大等长收缩状态下均较训练前显著增加($P<0.05$),而羽状角及肌肉厚度在训练前后的差异均无显著性意义($P>0.05$);实验组健侧及对照组双侧TA、MG的形态结构参数在训练前后的差异均无显著性意义($P>0.05$)。

2.2 肌力比较

训练前后脑卒中患侧、健侧踝关节肌力比较如表3所示。经过3周的步态训练,实验组患侧的踝关节肌力较训练前显著增加($P<0.05$),而实验组健侧及对照组双侧踝关节肌力在训练前后的差异无显著性意义($P>0.05$)。

2.3 临床量表比较

训练前后患者下肢FMA评分、MAS评分比较如表4所示。训练后实验组下肢FMA评分较训练前显著提高($P<0.05$),下肢MAS评分较训练前显著降低($P<0.05$),而对照组下肢FMA评分和MAS评分在训练前后的差异均无显著性意义($P>0.05$)。

3 讨论

脑卒中患者常出现步行功能障碍,偏瘫侧下肢的踝关节活动受限,两侧下肢运动不对称是其典型的异常步行模式。BWSTT通过悬吊装置减少下肢的负重,并结合电动跑台强制带动患者重复产生有节律的步行,使患者可以早期进行步行训练^[6]。近

表2 训练前后TA、MG肌肉参数比较 ($\bar{x}\pm s$)

	实验组(n=8)		对照组(n=7)	
	患侧	健侧	患侧	健侧
TA 羽状角(°)				
静息				
训练前	6.62 ± 1.06	7.5 ± 1.77	6.65 ± 1.15	7.37 ± 1.2
训练后	7.26 ± 1.62 ^①	7.62 ± 1.58	6.77 ± 1.15	7.43 ± 1.7
最大等长收缩				
训练前	7.65 ± 2.20	9.78 ± 2.82	7.95 ± 1.17	9.54 ± 1.29
训练后	9.11 ± 1.95 ^①	9.99 ± 2.27	8.14 ± 1.12	9.61 ± 1.57
TA 厚度(cm)				
静息				
训练前	1.04 ± 0.09	1.15 ± 0.16	1.02 ± 0.16	1.14 ± 0.13
训练后	1.09 ± 0.12 ^①	1.14 ± 0.10	1.03 ± 0.13	1.1 ± 0.15
最大等长收缩				
训练前	1.16 ± 0.07	1.26 ± 0.17	1.14 ± 0.15	1.25 ± 0.13
训练后	1.21 ± 0.11 ^①	1.23 ± 0.14	1.15 ± 0.13	1.22 ± 0.17
TA 肌纤维长度(cm)				
静息				
训练前	7.42 ± 1.59	7.47 ± 2.17	7.36 ± 0.96	7.42 ± 1.5
训练后	7.37 ± 1.65	7.48 ± 1.96	7.4 ± 1.14	7.45 ± 1.39
最大等长收缩				
训练前	6.95 ± 1.65	6.39 ± 1.71	6.85 ± 0.98	6.37 ± 0.93
训练后	6.89 ± 1.76	6.34 ± 1.66	6.81 ± 1.24	6.4 ± 1.51
MG 羽状角(°)				
静息				
训练前	19.69 ± 3.15	20.38 ± 5.42	19.51 ± 4.72	19.35 ± 4.21
训练后	19.72 ± 3.79	20.87 ± 4.37	20.03 ± 0.31	19.9 ± 5.42
最大等长收缩				
训练前	27.06 ± 3.9	27.34 ± 5.45	26.86 ± 5.2	27.22 ± 6.66
训练后	28.1 ± 3.92	28.17 ± 5.89	27.95 ± 6.7	27.53 ± 7.23
MG 厚度(cm)				
静息				
训练前	1.6 ± 0.14	1.63 ± 0.29	1.62 ± 0.33	1.61 ± 0.32
训练后	1.63 ± 0.31	1.64 ± 0.32	1.59 ± 0.33	1.61 ± 0.22
最大等长收缩				
训练前	1.68 ± 0.22	1.69 ± 0.25	1.67 ± 0.21	1.7 ± 0.24
训练后	1.63 ± 0.26	1.68 ± 0.21	1.67 ± 0.24	1.68 ± 0.21
MG 肌纤维长度(cm)				
静息				
训练前	4.76 ± 1.07	5.09 ± 1.34	4.78 ± 0.6	5.18 ± 1.12
训练后	5.01 ± 1.03 ^①	5.12 ± 1.02	4.84 ± 0.93	5.1 ± 1.21
最大等长收缩				
训练前	3.7 ± 1.01	3.77 ± 1.09	3.74 ± 0.57	3.78 ± 1.08
训练后	3.74 ± 1.49 ^①	3.8 ± 0.93	3.75 ± 0.88	3.76 ± 0.64

①训练前后比较 $P<0.05$

年来大量研究表明BWSTT比传统的步态训练方法更能有效改善脑卒中患者的临床量表评分。本研究通过对亚急性期脑卒中患者进行3周的步态训练,结果显示训练后实验组患者下肢的FMA评分明显提高、MAS评分明显降低,而在对照组训练前后FMA和MAS评分无明显差异。这提示BWSTT较传统的步态训练更能有效改善患者下肢的运动功能,同时降低肌张力。此外,我们还发现经过3周的步态训练,实验组患侧踝关节肌力较训练前增加,而对照组踝关节肌力无明显改变,表明BWSTT较传统步态训练更能有效增强脑卒中患者踝关节的肌力。

表3 训练前后脑卒中患侧、健侧踝关节肌力比较 ($\bar{x}\pm s, lb$)

	训练前	训练后	t值	P值
踝背屈肌力				
实验组				
患侧	11.02 ± 6.32	18.82 ± 9.60	-4.78	<0.05
健侧	32.10 ± 7.32	30.24 ± 9.37	0.985	>0.05
对照组				
患侧	10.58 ± 5.62	12.52 ± 5.73	-1.928	>0.05
健侧	29.09 ± 7.45	27.59 ± 9.18	0.687	>0.05
踝跖屈肌力				
实验组				
患侧	21.05 ± 9.20	25.93 ± 14.69	-2.144	<0.05
健侧	42.46 ± 12.60	40.40 ± 16.94	0.47	>0.05
对照组				
患侧	19.21 ± 9.85	21.63 ± 9.85	-1.348	>0.05
健侧	39.37 ± 8.51	38.90 ± 12.62	0.202	>0.05

表4 两组患者训练前后下肢FMA、MAS评分比较 ($\bar{x}\pm s$)

	训练前	训练后	P值
FMA评分			
实验组	23.14 ± 4.63	25.57 ± 4.69	<0.05
对照组	21.8 ± 4.49	24.2 ± 2.95	>0.05
MAS评分			
实验组	1.64 ± 0.24	1.48 ± 0.59	<0.05
对照组	1.21 ± 0.24	1.14 ± 0.59	>0.05

本实验尝试从肌肉的形态结构方面探讨BWSTT改善患者步行能力的运动生物力学机制。已有大量研究证实训练可以使肌肉形态结构发生适应性改变^[7-12]。Blazeovich等^[9]对运动员进行为期5周的抗阻训练,发现在肌腹处测得的股直肌厚度从2.08—2.4cm增加至2.5—2.58cm,肌纤维长度从10.6—16cm增加至14.7—21.6cm,但羽状角在训练前后无明显差异。Pincivero等^[10]的研究表明经过规律性的伸膝训练,股四头肌出现明显的形态变化和肌电变化。Mileva等^[11]的研究也表明震动结合伸膝训练后股四头肌的形态及收缩效能显著提高。Lee等^[12]通过对脑瘫患儿进行为期5周的强化手功能训练,用超声测得的桡侧腕伸肌及肱三头肌的肌肉横截面积增大。与上述结果相一致,本研究结果发现经过3周的BWSTT,TA的羽状角及厚度较训练前增大,MG的肌纤维长度较训练前增加。这些说明BWSTT对亚急性期脑卒中患者的肌肉形态结构改善有促进作用。力量训练使肌肉羽状角增大,这已被认为是由于训练使肌纤维肥大所致^[13]。羽状角增大,提示肌肉横截面积增大,肌肉的发力潜能增加^[14]。肌纤

维长度增加,提示肌肉收缩速度可能因此而增快。然而,肌肉的形态结构不单独决定肌肉的功能,神经肌肉相互作用也影响运动方式和肌力^[15]。因此下一步实验将结合神经电生理参数以及三维步态分析,以期能阐明步态改善的神经因素和肌肉因素的相关关系。

入组本研究的患者下肢功能损害较轻,试验中初始的减重程度小于40%体重。有研究表明减重量过多,患肢抗重力肌得不到有效刺激和锻炼,不利于功能的恢复^[16]。在保证正确的步态模式和安全性前提下,一旦患者下肢功能进步,则应尽快减少减重,使患肢体最终达到完全负重。电动平板的运动速度及坡度可以根据患者的病情进行调整,有文献报道,理想的速度应接近普通的步行速度^[17]。患者开始进行BWSTT时,常常需要治疗师用手帮助其控制患侧下肢,比较耗费人力。由于康复需求的增加,治疗师供给短缺,寻找节省人力的替代方法显得十分重要。已有研究小组证实将BWSTT与功能性电刺激^[18]、生物反馈疗法^[19]等结合有更好的疗效,还可以缓解治疗师的压力。

在本研究实验组患者中未发现严重不良反应,部分患者在治疗初期出现血压轻度升高,心悸、疲劳等现象,但通过调整减重量、平板速度、训练时间等,症状均能得到有效控制。本研究中,训练结束时平板速度均值可达到0.58m/s,所有患者在3周训练结束时均不需要减重。所以亚急性期脑卒中患者进行BWSTT是安全有效的。尽管对于应用BWSTT治疗脑卒中患者的报道较多,但对介入时间、减重量、平板运动速度及训练时间等方面未有定论,也缺乏大样本、多中心的随机对照研究^[16]。本课题脑卒中病例入选标准严格,因此例数较少。将来会收集更多临床病例,扩大样本量。

通过本实验的研究表明,BWSTT较传统的步态训练方法更有效改善脑卒中患者下肢的运动功能、痉挛情况及踝关节肌力,通过改变患者肌肉肌腱的形态结构改善患者的运动功能。

参考文献

- [1] Hesse S, Bertelt C, Jahnke MT, et al. Treadmill training with partial body weight support compared with physiotherapy in nonambulatory hemiparetic patients[J]. *Stroke*, 1995, 26(6): 976—981.
- [2] McCain KJ, Pollo FE, Baum BS, et al. Locomotor treadmill training with partial body-weight support before overground gait in adults with acute stroke: a pilot study[J]. *Arch Phys Med Rehabil*, 2008, 89(4): 684—691.
- [3] 全国第四届脑血管病学术会议. 脑卒中患者神经功能缺损程度评分标准[J]. *中华神经内科学杂志*, 1996, 2(6): 381.
- [4] Maganaris CN, Baltzopoulos V. Predictability of in vivo changes in pennation angle of human tibialis anterior muscle from rest to maximum isometric dorsiflexion[J]. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 1999, 79(3): 294—297.
- [5] Ikezoe T, Mori N, Nakamura M, et al. Atrophy of the lower limbs in elderly women: is it related to walking ability[J]? *Eur J Appl Physiol*, 2011, 111(6): 989—995.
- [6] Trueblood PR. Partial body weight treadmill training in persons with chronic stroke[J]. *NeuroRehabilitation*, 2001, 16(3): 141—153.
- [7] Duclay J, Martin A, Duclay A, et al. Behavior of fascicles and the myotendinous junction of human medial gastrocnemius following eccentric strength training[J]. *Muscle Nerve*, 2009, 39(6): 819—827.
- [8] Blazevich AJ. Effects of physical training and detraining, immobilization, growth, and aging on human fascicle geometry[J]. *Sports Med*, 2006, 36: 1003—1017.
- [9] Blazevich AJ, Gill ND, Bronks R, et al. Training-specific muscle architecture adaptation after 5-wk training in athletes[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2003, 35(12): 2013—2022.
- [10] Pincivero DM, Coelho AJ, Campy RM. Contraction mode shift in quadriceps femoris muscle activation during dynamic knee extensor exercise with increasing loads[J]. *J Biomech*, 2008, 41(15): 3127—3132.
- [11] Mileva KN, Kadr M, Amin N, et al. Acute effects of a vibration-like stimulus during knee extension exercise[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2006, 38(7): 1317—1328.
- [12] Lee DR, You JH, Lee NG, et al. Comprehensive Hand Repetitive Intensive Strengthening Training (CHRIST)-induced morphological changes in muscle size and associated motor improvement in a child with cerebral palsy: an experimenter-blind study[J]. *NeuroRehabilitation*, 2009, 24(2): 109—117.
- [13] Aagaard P, Andersen JL, Dyhre-Poulsen P, et al. A mechanism for increased contractile strength of human pennate muscle in response to strength training: changes in muscle architecture[J]. *J Physiol*, 2001, 534(Pt. 2): 613—623.
- [14] Thom JM, Morse CL, Birch KM, et al. Influence of muscle architecture on the torque and power-velocity characteristics of young and elderly men[J]. *Eur J Appl Physiol*, 2007, 100(5): 613—619.
- [15] Blazevich AJ, Gill ND, Deans N, et al. Lack of human muscle architectural adaptation after short-term strength training[J]. *Muscle Nerve*, 2007, 35(1): 78—86.
- [16] Hesse S. Treadmill training with partial body weight support after stroke: a review[J]. *NeuroRehabilitation*, 2008, 23(1): 55—65.
- [17] Hesse S, Werner C, Paul T, et al. Influence of walking speed on lower limb muscle activity and energy consumption during treadmill walking of hemiparetic patients[J]. *Arch Phys Med Rehabil*, 2001, 82(11): 1547—1550.
- [18] Field-Fote E.C. Combined use of body weight support, functional electric stimulation, and treadmill training to improve walking ability in individuals with chronic incomplete spinal cord injury[J]. *Arch Phys Med Rehabil*, 2001, 82(6): 818—824.
- [19] Lunenburger L, Colombo G, Riener R. Biofeedback for robotic gait rehabilitation[J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2007, 4: 1.