

倒走生物力学及运动控制的研究进展

陈娟,马燕红,胡海,陈康,姚叶林

【关键词】 倒走;步态;运动学;动力学;EMG;运动控制;生物力学

【中图分类号】 R49;R804.66 【DOI】 10.3870/zgkf.2018.02.021

倒走是一种流行的健身锻炼和康复训练方法^[1]。国外已有很多学者对倒走的运动学、动力学及运动控制进行了研究,发现倒走对下肢、躯干以及神经系统有其独特的作用机制^[2]。但国内对倒走的研究仅为临床疗效观察,对倒走的生物力学研究较少见。本文对倒走的临床和生物力学研究进行了综述,为今后倒走的进一步研究提供依据。

1 倒走在临床康复中的应用

倒走训练能够增加代谢,增强心肺耐力。以同样恒定速度倒走或倒跑时,摄氧量、心率及血乳酸含量均较正走或正跑高^[3]。水下倒走时心率高于正走,速度快时两者差异更明显。提示倒走对心肺功能训练效率较正走高。倒走对下腰痛及下肢骨关节疾病有良好的康复治疗作用。下腰痛患者进行倒走或倒走结合其它中医疗法可减轻腰痛并增加腰部活动范围,预防下腰痛复发^[4-6]。学者对120例腰椎间盘突出患者进行3年随访,观察倒走联合八段锦训练对预防腰痛复发的效果,发现治疗组(正规康复治疗、倒走联合八段锦训练)的复发率为21.7%,对照组(正规康复治疗)的复发率为38.3%^[6]。相比于正走,倒走髋股关节内压力较小,可作为髋股关节疼痛患者的康复训练方法,且对膝关节骨性关节炎有一定的预防作用^[7-9]。此外,倒走时足底压力分布更均匀,对糖尿病足的发病有一定预防作用^[10-11]。因此,对于糖尿病患者,倒走能预防糖尿病足、骨性关节炎以及增强心肺功能,一举多得。倒走可提高中风后偏瘫患者的步行能力,能否改善患者不对称的步态模式还存在不同观点^[12-13]。一项关于中风偏瘫患者进行为期3周,每周3次,每次40min倒走训练的研究发现,相比于对照组(力量、功能、转移活动以及步态训练),实验组(除对照组的训练

外,再加30min倒走训练)患者的步长、步速以及步态的对称性显著提高,能有效改善中风患者的步态模式^[13]。此外,有研究发现侧走比倒走训练更有利于改善患者步态模式^[12]。

倒走作为一种特殊的、有效的康复方法,相比于正走,其特有的生物力学机制值得我们深入研究。倒走与心肺功能的关系可能与两者肌肉活动水平差异相关。下腰痛患者倒走训练的作用机制尚不清楚,根据以往文献推测其可能作用机制:第一,倒走可锻炼核心肌群的力量,改善腰部血液循环及核心肌群的协调模式,已有研究表明下腰痛患者核心肌群的协调模式与正常人有显著差异^[14];第二,倒走时重心后移,脊柱受力更符合生理曲度;第三,倒走时躯干稳定性增加。倒走对下肢、躯干、及心肺功能的康复机制可从生物力学进行探究,以期更合理有效地运用倒走进行康复训练。

2 倒走的运动学特征

学者对健康人倒走与正走的步态周期,踝关节、膝关节、髌关节以及躯干的关节角度变化进行了研究,发现两者的步态周期及躯干的关节角度变化特征有明显差异,两者踝关节、膝关节、髌关节的关节角度变化基本成镜面关系,但在步态周期关键点两者差异显著,且踝关节较膝关节与髌关节更显著^[15-23]。(镜面关系即:完整步态周期中正走步态参数变化曲线与倒走时间逆转步态参数变化曲线相比,两者变化特征相同。)

倒走时两者支撑相百分比无明显差异,其步速、步频、步幅较正走小^[15,19-20],但其耗能却较正走高^[3],这与能量高效利用的规律不符,其原因值得我们深入研究。此外学者发现水中倒走支撑相百分比较正走小,差异较陆地显著,可能与水中的浮力及阻力等因素相关^[16-17]。倒走踝关节背屈角度明显大于正走。学者发现倒走摆动相至承重反应相踝关节背屈角度明显大于正走摆动前相至摆动相,且踝关节活动范围正走大于倒走^[15]。另一研究发现踝关节背屈角度正走为 $(13.7 \pm 4.4)^\circ$,倒走为 $(20.8 \pm 5.5)^\circ$,趾屈角度两者无显著差异^[24]。因此,倒走可用于踝关节背屈受限的康复训练。

基金项目:国家自然科学基金项目(31270996)

收稿日期:2017-02-28

作者单位:上海交通大学附属第六人民医院,上海 200233

作者简介:陈娟(1992-),女,在读硕士,主要从事步态分析方面的研究。

通讯作者:马燕红,myhmyh2006@126.com

正走与倒走膝关节的关节角度变化曲线并非完美的镜面关系,在步态周期关键点上存在较大差异。支撑相膝关节角度变化趋势,正走为屈曲相,平台相,伸展相;而倒走几乎为单一的屈曲相^[19]。膝关节屈曲角度,正走承重反应相大于倒走初始摆动相,倒走摆动相末期大于正走摆动相早期,屈曲范围正走大于倒走^[15]。正走与倒走髌关节的角度变化存在差异,相比踝关节和膝关节其差异较小。髌关节屈曲角度,倒走足跟离地时角度大于正走足首次触地时角度;其伸展角度,倒走承重反应相小于正走摆动初始相^[15]。而水下足首次触地时髌关节屈曲角度正走大于倒走^[17]。

学者对躯干的运动学有不同见解。有学者认为倒走时脊柱活动减少,脊柱下段非常稳定,随着运动难度的增加,脊柱各节段形成整体,此外,头部及骨盆的稳定性也增加^[21]。而另有学者认为倒走会降低躯干局部动态稳定性,尤其是前后方向的稳定性^[23]。两位学者得出相反结论可能由倒走的速度、方法差异(地面和跑步机)等因素导致。脊柱稳定性下降是下腰痛发病的一个重要原因^[25]。研究证实腰托可减少腰椎的活动,前屈、后伸、侧弯及旋转分别减少了40%、27%、32%、58%,从而减轻腰痛^[26-27]。由此可知,若倒走时躯干稳定性增加,则可用于缓解腰痛^[28]。反之,则有害无利。因此,倒走时躯干的稳定性有待进一步研究,同时可结合腰背肌的活动来探索倒走与下腰痛的关系。

3 倒走的动力学特征

倒走足底压力分布更均匀^[10-11, 29]。学者对正走和倒走时足底压力分析发现,糖尿病患者倒走时的第1趾、第2~5趾、第1跖骨、足弓、足跟内侧及足跟外侧区压力峰值较正走大,第3跖骨区压力峰值明显较正走小,各区的压力峰值差距明显小于正走^[10]。糖尿病患者因感觉神经病变合并局部机械应力过高易引起足部溃疡和感染,而倒走时足底压力分布较均匀,可用于糖尿病患者的运动治疗。

健康人倒走与正走的地面反作用力存在差异^[8, 15, 19]。垂直方向地面反作用力,倒走与正走均有两个主要峰值,依次为重心加速向上和加速向下,正走时两个峰值基本对称,倒走时第一个峰值总比第二个高^[19]。表明倒走时支撑腿负重小于蹬离地面的力,正走时两者基本相同,由此可知倒走时支撑腿关节内的受力较正走小,与倒走可预防膝骨性关节炎的观点相符。足长轴方向的剪切力:正走时支撑相早期重心减速向前移动,剪切力指向后,支撑相中期和末期重心加速向前移动,剪切力指向前;倒走时支撑相早期重心减

速向后移动,剪切力指向前;支撑相中期剪切力接近零,支撑相末期重心加速向后移动,剪切力指向后。表明正走和倒走时支撑腿均在支撑相早期起制动作用,中期及末期起驱动作用。

健康人正走与倒走时踝关节力矩曲线成镜面关系^[15, 22, 30]。两者踝关节做功存在差异^[15]。踝关节正走时产生的最大功率大于倒走,吸收的最大功率小于倒走,相比于膝关节与髌关节,倒走时踝关节产生的最大功率更大。倒走时踝关节在承重反应期产生最大趾屈力矩,此时起减速、吸收震动作用。他们认为踝关节是产生推进力和吸收震动的主要关节,而不是膝关节和髌关节。因此,倒走可锻炼踝关节的同时保护膝关节及髌关节。

健康人正走与倒走时膝关节力矩曲线并非简单的镜面关系^[15, 30]。正走时膝关节最大屈曲力矩明显大于倒走,产生的最大功率与倒走无差异,吸收的最大功率大于倒走^[15]。如此,倒走用于运动锻炼可减少因膝关节内应力过高而导致的骨性关节炎的发生。此外,倒走时髌股关节内压力小于正走^[7-8],这与另一学者伸膝肌功率峰值及总功均小于正走^[31]的结论相符。因此,倒走对于髌股关节疼痛的患者是一项较好的训练方法。

健康人正走与倒走髌关节力矩变化曲线基本成镜面关系^[15, 22, 30]。正走与倒走髌关节力矩变化曲线并非完全相似,倒走力矩变化较正走简单,此外,正走时髌关节的伸髌及屈髌力矩均明显大于倒走,髌关节产生的最大功率也大于倒走^[15]。

4 倒走的肌电图特征

健康人倒走与正走大部分肌肉激活时间无显著差异,倒走肌肉活动时间普遍较正走长^[31]。股二头肌在倒走时支撑相的8%开始激活,在正走时支撑相的10%开始激活;胫骨前肌在倒走时支撑相的20%开始激活;正走与倒走时股直肌、股外侧肌、股内侧肌及腓肠肌外侧头均在足跟着地时开始激活。腓肠肌外侧头活动时间正走大于倒走,股直肌、股外侧肌、股内侧肌、股二头肌、胫骨前肌的活动持续时间均为倒走大于正走,支撑相下肢肌肉活动时间正走为45%~50%,倒走为58%~77%,此可解释倒走的高代谢水平。

健康人倒走与正走下肢肌肉活动顺序存在显著差异^[19]。正走时肌肉活动顺序:支撑相早期为臀大肌、股直肌、股外侧肌及胫骨前肌,中期为腓肠肌外侧头,末期为臀大肌;摆动相早期为股直肌及股外侧肌。倒走时肌肉活动顺序:承重期为胫骨前肌;支撑相早期为

股直肌、股外侧肌及腓肠肌外侧头,中期为臀大肌、股直肌及股外侧肌,末期为腓肠肌外侧头。两者肌肉活动顺序的差异表明倒走与正走的运动控制不同,可用于改善中风患者的运动控制。

健康人倒走与正走的肌肉活动强度存在不同观点。有学者发现倒走时下肢肌肉活动强度普遍较正走高^[19]。另有学者发现正走和倒走时的肌电峰值,比目鱼肌及股外侧肌两者相似,胫骨前肌、腓肠肌外侧头和股二头肌倒走明显较正走小,股直肌倒走较正走大^[20]。两位学者均认为股四头肌的活动强度倒走较正走高。由此可知,倒走可用于股四头肌的肌力训练。而两位学者结果不同之处可能由个体间差异、地面与跑步机的差异、或速度的差异等因素造成。因此倒走时下肢肌肉活动强度仍需进一步研究。

健康人倒走与正走下肢肌肉活动模式也存在显著差异^[19-20, 32]。除股直肌与股外侧肌外,胫骨前肌、比目鱼肌、腓肠肌外侧头、股二头肌的活动倒走与正走存在一定相位差,提示倒走与正走的肌肉活动模式存在差异,此外,倒走时下肢肌肉活动模式在个体之间也存在差异^[20]。

倒走能增加腰背肌的活动^[33-34]。与正走相比,倒走训练使中年女性的腹直肌、腹外斜肌、竖脊肌及臀大肌的肌力增强;腹直肌及腹外斜肌的肌力增强更明显^[34]。表明倒走时躯干肌的活动增强,这可能是倒走能缓解及预防腰痛的一个重要原因。实验不足之处在于没有结合倒走时的步态、骨盆和躯干的运动学对腰背肌活动模式进行分析。

5 倒走的运动控制

步行是一种节律运动。产生节律运动的神经环路被称为中枢模式发生器(central pattern generators, CPGs)。研究证明在很多脊椎动物的脊髓里都存在CPGs^[35-36]。人类可能存在相似的CPGs^[37-38]。目前认为神经环路可以共用,共用的神经环路可以通过重组参加不同的行为控制,且不同行为共用的神经环路的范围取决于肌肉活动模式或肢体运动结果的相似程度^[39]。

目前不少研究认为正走与倒走拥有同样的CPGs^[19-20, 40-41]。学者研究正走和倒走皮反射(cutaneous reflexes)相位调制模式发现,从腓肠神经到所研究的下肢肌肉之间,存在促进和抑制两种神经环路,并且这些神经环路之间活动的平衡都存在相位依赖,表明皮反射的相位依赖调制很大程度依赖于一个中枢运动程序,而倒走的运动程序同样可用于正走,但这个程序可能是逆向运行,由此造成了反射逆转时间序列

和反射抑制期的相位移位^[41]。另有学者发现虽然正走与倒走下肢肌肉活动的时间顺序和肌肉的协调组织明显不同,但正走与倒走的下肢活动(运动学)很相似,由此他们推断完全重组协同肌来逆转步态继而保持正走与倒走运动学上相似^[19],这可能是一个涉及运动控制的中央网络系统的行为学目的。

控制正走和倒走、左腿和右腿的步态模式的神经环路具有专一性^[39]。学者认为控制正走和倒走的功能网络系统是独立的,并且控制左腿和右腿的神经环路可以单独训练。这表明涉及正走和倒走运动模式生成的功能网络系统可以被独立地改变,但并非整个网络系统,在空间上是完全独立的。

关于倒走与正走的运动控制,目前学者观点不完全一致。倒走与正走是拥有完全相同的CPGs还是部分相同的CPGs,这值得大家进一步探索。若倒走与正走的CPGs部分相同,其功能网络系统是独立的,则可用倒走来纠正异常步态模式;若两者的CPGs完全相同,则倒走不能起到改善步态模式的作用。

6 小结

综上所述,倒走时下肢的运动学及动力学特征与正走基本成镜面关系,但下肢肌肉的活动强度、运动控制以及躯干的运动学特征存在争议。倒走时躯干的稳定性增加还是减小有待进一步研究。倒走训练治疗及预防下腰痛在临床上应用较广泛,但其作用机制目前还不明确。躯干的生物力学变化与下腰痛有着紧密联系,因此,从躯干的生物力学来研究倒走对下腰痛的作用机制将是我们下一个研究方向。

【参考文献】

- [1] Pope MH, Novotny JE. Spinal biomechanics[J]. *Journal of Biomechanical Engineering*, 1993, 115(4B): 569-574.
- [2] Hoogkamer W, Meyns P, Duysens J. Steps forward in understanding backward gait: from basic circuits to rehabilitation[J]. *Exerc Sport Sci Rev*, 2014, 42(1): 23-29.
- [3] Flynn TW, Connery SM, Smutok MA, et al. Comparison of cardiopulmonary responses to forward and backward walking and running[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 1994, 26(1): 89-94.
- [4] Dufek J, House A, Mangus B, et al. Backward walking: A possible active exercise for low back pain reduction and enhanced function in athletes[J]. *Journal of Exercise Physiology Online*, 2011, 14(2): 17-26.
- [5] 王良兴. 针刺牵引结合倒走锻炼治疗腰椎间盘突出80例[J]. *福建中医药*, 2010, 41(3): 37-37.
- [6] 张苏婉, 程肖芳, 余松, 等. 倒走运动联合八段锦锻炼对预防腰椎间盘突出症复发的临床观察[J]. *河北中医*, 2013, 35(9): 1302-1303.
- [7] Flynn TW, Soutas-Little RW. Patellofemoral joint compressive

- forces in forward and backward running[J]. *J Orthop Sports Phys Ther*, 1995, 21(5): 277-282.
- [8] Roos PE, Barton N, van Deursen RW. Patellofemoral joint compression forces in backward and forward running[J]. *J Biomech*, 2012, 45(9): 1656-1660.
- [9] Sussman DH, Alrowayeh H, Walker ML. PATELLOFEMORAL JOINT COMPRESSIVE FORCES DURING BACKWARD AND FORWARD RUNNING AT THE SAME SPEED[J]. *Journal of Musculoskeletal Research*, 2000, 4(2): 107-118.
- [10] 高晓晓, 吕肖锋, 刘霞, 等. 糖尿病患者前行与倒走走底压力的变化[J]. *中华糖尿病杂志*, 2013, 5(4): 216-220.
- [11] 王坤, 吕肖锋, 武晋晓, 等. 2型糖尿病患者正、倒走走底生物力学分析[J]. *解放军医药杂志*, 2013, 11(1): 38-42.
- [12] Kim CY, Lee JS, Kim HD. Comparison of the Effect of Lateral and Backward Walking Training on Walking Function in Patients with Poststroke Hemiplegia: A Pilot Randomized Controlled Trial [J]. *Am J Phys Med Rehabil*, 2017, 96(2): 61-67.
- [13] Yang YR, Yen JG, Wang RY, et al. Gait outcomes after additional backward walking training in patients with stroke: a randomized controlled trial[J]. *Clin Rehabil*, 2005, 19(3): 264-273.
- [14] Ghamkhar L, Kahlaee AH. Trunk muscles activation pattern during walking in subjects with and without chronic low back pain: a systematic review[J]. *PM R*, 2015, 7(5): 519-526.
- [15] Lee M, Kim J, Son J, et al. Kinematic and kinetic analysis during forward and backward walking[J]. *Gait & Posture*, 2013, 38(4): 674-678.
- [16] Cadenas-Sanchez C, Arellano R, Vanrenterghem J, et al. Kinematic Adaptations of Forward And Backward Walking on Land and in Water[J]. *J Hum Kinet*, 2015, 49(1): 15-24.
- [17] Cadenas-Sánchez C, Arellano R, Taladriz S, et al. Biomechanical characteristics of adults walking forward and backward in water at different stride frequencies[J]. *Journal of Sports Sciences*, 2015, 34(1): 1-8.
- [18] Cipriani DJ, Armstrong CW, Gaul S. Backward walking at three levels of treadmill inclination: an electromyographic and kinematic analysis[J]. *J Orthop Sports Phys Ther*, 1995, 22(3): 95-102.
- [19] Grasso R, Bianchi L, Lacquaniti F. Motor patterns for human gait: backward versus forward locomotion[J]. *J Neurophysiol*, 1998, 80(4): 1868-1885.
- [20] van Deursen RW, Flynn TW, McCrory JL, et al. Does a single control mechanism exist for both forward and backward walking? [J]. *Gait Posture*, 1998, 7(3): 214-224.
- [21] Nadeau S, Amblard B, Mesure S, et al. Head and trunk stabilization strategies during forward and backward walking in healthy adults[J]. *Gait & Posture*, 2003, 18(3): 134-142.
- [22] Blazkiewicz M. Muscle force distribution during forward and backward locomotion[J]. *Acta Bioeng Biomech*, 2013, 15(3): 3-9.
- [23] Wu Y, Xiao F, Gu DY. Local dynamic stability of the trunk segments and lower extremity joints during backward walking[D]. *Engineering in Medicine and Biology Society*, 2015.
- [24] Soda N, Ueki T, Aoki T. Three-dimensional Motion Analysis of the Ankle during Backward Walking[J]. *J Phys Ther Sci*, 2013, 25(6): 747-749.
- [25] Panjabi MM. Clinical spinal instability and low back pain[J]. *Journal of Electromyography & Kinesiology Official Journal of the International Society of Electrophysiological Kinesiology*, 2003, 13(4): 371-379.
- [26] Grob D, Dvorak J, Panjabi MM, et al. External fixator of the cervical spine—a new diagnostic tool[J]. *Unfallchirurg*, 1993, 96(8): 416-421.
- [27] Panjabi MM, Lydon C, Vasavada A, et al. On the understanding of clinical instability[J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 1994, 19(23): 2642-2650.
- [28] Olerud S, Sjostrom L, Karlstrom G, et al. Spontaneous effect of increased stability of the lower lumbar spine in cases of severe chronic back pain. The answer of an external transpeduncular fixation test[J]. *Clin Orthop Relat Res*, 1986, 20(3): 67-74.
- [29] 郝卫亚, 陈严, 胡水清. 儿童倒走走底压力的分布特征研究[J]. *力学与实践*, 2008, 10(3): 56-59.
- [30] Winter DA, Pluck N, Yang JF. Backward walking: a simple reversal of forward walking? [J]. *Journal of Motor Behavior*, 1989, 21(3): 291-305.
- [31] Flynn TW, Soutas-Little RW. Mechanical power and muscle action during forward and backward running[J]. *J Orthop Sports Phys Ther*, 1993, 17(2): 108-112.
- [32] Jansen K, De Groot F, Massaad F, et al. Similar muscles contribute to horizontal and vertical acceleration of center of mass in forward and backward walking: implications for neural control [J]. *J Neurophysiol*, 2012, 107(12): 3385-3396.
- [33] 吕晓梅, 赵焕彬, 张海涛. 健身反向走的生物力学分析[J]. *中国体育科技*, 2008, 15(3): 139-143.
- [34] 汪乾春. 反向走对人体平衡和核心肌群表面肌电影响的实验研究[D]. 成都: 成都体育学院, 2015.
- [35] Griener A, Dyck J, Gosgnach S. Regional distribution of putative rhythm-generating and pattern-forming components of the mammalian locomotor CPG[J]. *Neuroscience*, 2013, 25(5): 644-650.
- [36] Duysens J, Van de Crommert HW. Neural control of locomotion: The central pattern generator from cats to humans[J]. *Gait Posture*, 1998, 7(2): 131-141.
- [37] Dimitrijevic MR, Gerasimenko Y, Pinter MM. Evidence for a Spinal Central Pattern Generator in Humans[J]. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1998, 86(1): 360-376.
- [38] Calancie B, Needham-Shropshire B, Jacobs P, et al. Involuntary stepping after chronic spinal cord injury. Evidence for a central rhythm generator for locomotion in man[J]. *Brain*, 1994, 117(5): 1143-1159.
- [39] Choi JT, Bastian AJ. Adaptation reveals independent control networks for human walking[J]. *Nat Neurosci*, 2007, 10(8): 1055-1062.
- [40] Mehdizadeh S, Arshi AR, Davids K. Quantifying coordination and coordination variability in backward versus forward running: Implications for control of motion[J]. *Gait Posture*, 2015, 42(2): 172-177.
- [41] Duysens J, Tax AA, Murrer L, et al. Backward and forward walking use different patterns of phase-dependent modulation of cutaneous reflexes in humans[J]. *Journal of Neurophysiology*, 1996, 76(1): 301-310.