

- ton's disease brain[J]. Proc Nat Acad Sci USA, 2003, 100(15):9023—9027.
- [28] Curtis MA, Waldvogel HJ, Synek B, et al. A histochemical and immunohistochemical analysis of the subependymal layer in the normal and Huntington's disease brain[J]. J Chem Neuroanat, 2005, 30(1):55—66.
- [29] Curtis MA, Eriksson PS, Faull RLM. Progenitor cells and adult neurogenesis in neurodegenerative diseases and injuries of the basal ganglia[J]. Clin Exp Pharmacol Physiol, 2007, 34(5-6):528—532.
- [30] van Dellen A, Blakemore C, Deacon R, et al. Delaying the onset of Huntington's in mice[J]. Nature, 2000, 404(6779):721—722.
- [31] Hockly E, Cordery PM, Woodman B, et al. Environmental enrichment slows disease progression in R6/2 Huntington's disease mice[J]. Ann Neurol, 2002, 51(2):235—242.
- [32] Lazic SE, Grote H, Armstrong RJ, et al. Decreased hippocampal cell proliferation in R6/1 Huntington's mice[J]. Neuroreport, 2004, 15(5):811—813.
- [33] Lazic SE, Grote HE, Blakemore C, et al. Neurogenesis in the R6/1 transgenic mouse model of Huntington's disease: effects of environmental enrichment[J]. Eur J Neurosci, 2006, 23(7):1829—1838.
- [34] Wexler NS, Lorimer J, Porter J, et al. Venezuelan kindreds reveal that genetic and environmental factors modulate Huntington's disease age of onset[J]. Proc Natl Acad Sci USA, 2004, 101(10):3498—3503.
- [35] Zhao C, Deng W, Gage FH. Mechanisms and functional implications of adult neurogenesis[J]. Cell, 2008, 132(4):645—660.
- [36] 马向阳,贾子善,槐雅萍,等.丰富环境对大鼠局灶性脑梗死后微血管新生的影响[J].国际内科学杂志,2008,35(11):629—631.
- [37] 马向阳,穆剑玲,牟兆新,等.丰富环境对大鼠局灶性脑梗死后海马区微血管新生的影响[J].中国微循环,2009,13(6):491—493.
- [38] 马向阳,牟兆新,陈俊荣,等.丰富环境对脑梗死大鼠梗死灶周围血管内皮生长因子受体的影响[J].中国康复医学杂志,2010,25(02):109—113.
- [39] Puurunen K, Jolkkonen J, Sirvio J, et al. Selegiline combined with enriched-environment housing attenuates spatial learning deficits following focal cerebral ischemia in rats[J]. Exp Neurol, 2001, 167(2):348—355.
- [40] Stairs DJ, Bardo MT. Neurobehavioral effects of environmental enrichment and drug abuse vulnerability[J]. Pharmacol Biochem Behav, 2009, 92(3):377—382.

·综述·

突发负荷变化条件下躯干肌肉运动控制策略

李 哲¹ 王 健^{1,2}

腰痛(low back pain, LBP)的病因构成复杂,病理机制各异。理论上任何接受神经末梢支配的腰椎结构、椎间盘、肌肉、韧带和神经根等都有可能成为疼痛的起源部位。流行病学和生物力学研究指出,多数情况下腰痛的发生与腰椎受到突然的、不可预知的外部负荷改变的作用有关^[1]。失足滑倒、绊倒、坠落以及弯腰用力提拉重物等突发事件均被证实是导致急性腰痛的主要外界因素,这些因素既可直接造成下背损伤,又能增加腰痛复发的概率^[2]。因此,在受到这些突发性的外部负荷改变时,腰椎稳定肌及其中枢运动控制采用何种活动模式和控制策略来维持腰椎稳定已成为当前研究的

热点。本文旨在脊柱稳定性理论基础上,探讨突发负荷改变条件下腰椎稳定肌的反应策略,为腰痛的预防和诊断研究提供科学依据。

1 脊柱稳定性理论

腰椎稳定性特指在生理和病理条件下,腰椎结构维持其与锥体之间的正常位置关系的一种腰椎结构和功能状态,与腰椎的支撑、保护等功能密切相关。系统的腰椎稳定性理论研究始于20世纪70年代,当时的研究指出,若无法维持脊柱的正常结构,就会导致关节和软组织的损伤,重复的微小损

DOI:10.3969/j.issn.1001-1242.2011.06.027

1 浙江大学体育科学与技术研究所,杭州,310028; 2 通讯作者
作者简介:李哲,男,硕士研究生; 收稿日期:2010-10-26

伤可使其功能逐渐退化,进而发生背部损伤以及疼痛^[3]。之后,随着相关理论的不断深入,人们又认识到稳定性是一个变化的过程,它包括姿势的维持以及运动的控制。根据这一理论,脊柱的生物力学性质与其他系统的生物力学性质在元件寿命和系统效率上相类似,都依赖于每个部分精确的分工。有研究者指出,肌肉力量和柔韧性的缺陷,由耐力欠佳导致的疲劳,或异常神经控制都可以改变肌肉的运动模式,并最终引起组织损伤。组织损伤又进而导致脊柱稳定性下降,肌肉损伤概率增加以及永久的退行性级联^[4]。随着对疼痛理解的不断加深及大量中枢、外周途径不断被发现,人们清楚地认识到,疼痛不单单是一个生物力学现象,但在脊柱病理学和疼痛方面,生物力学仍然起着至关重要的作用。

1992年,Panjabi等提出了著名的“脊柱稳定性模型”^[5]。该模型指出脊柱稳定性主要由三个在结构上独立而在功能上相互关联的因素所决定:①骨骼和韧带结构,它们通过对活动范围的被动限制来为脊柱提供稳定性。然而,处于直立位时,它们对脊柱的稳定性支持却较少。②脊柱周围的肌肉,它们能够为椎体间提供支持和紧张度。椎体间的紧张度越高,脊柱就越稳定。中等水平的肌肉活动可以产生足够的关节紧张度和稳定性。通常情况下,较低水平的肌肉共激活(muscular coactivation)就能提供给椎体间足够的稳定性。因此,对于大多数腰痛患者,肌肉耐力的重要性远远大于绝对肌肉力量。③神经控制系统,它负责协调肌肉活动来应对可预知和不可预知的外力干扰。为了避免脊柱受到损伤,同时又不影响其正常活动,神经控制系统必须在正确的时间适度的激活合适的肌肉。Panjabi认为这三个因素是相互依赖的,每个系统都可以补偿其他系统的不足。脊柱的不稳定可能是由组织损伤,肌肉力量或耐力的不足,或肌肉控制失常所引起,然而,这种不稳定性通常是以上三个因素共同作用的结果。

脊柱周围大量肌肉对维持腰椎的稳定性和进行一定限度的腰椎活动有着重要的作用。这个系统由深层肌肉和浅层肌肉两部分构成。理论上,深层肌肉负责调节脊柱的紧张度及椎体间的关系,而浅层肌肉负责控制脊柱的运动,并应对脊柱受到的外部负荷。

关于腰部稳定性的研究,大多集中在深层肌肉系统,其中对多裂肌和腹横肌的研究最为普遍。在姿势控制和脊柱运动的过程中,多裂肌通过控制椎体间的移动,保护了关节结构,椎间盘以及周围的韧带,使其避免受到损伤。而腹横肌能够影响腰椎间的控制和胸腰筋膜紧张度,并增大腹内压,进而起到稳定脊柱的作用。此外,很多浅层肌肉(例如背阔肌,表层的脊柱旁肌以及腹部表层肌肉)也被证实能够影响腰部稳定性。

2 突发负荷条件下脊柱稳定性研究

突发负荷被认为是导致腰痛的一个危险因素。因此,在脊柱稳定性的神经肌肉机制研究中,它常被作为研究的对象^[6-7]。在突发负荷下,躯干肌肉的激活模式会直接影响脊柱承受的压力,躯干稳定性及腰痛的发生。对于导致腰痛的危险因素,除了外界刺激本身,还有很多因素,比如:肌肉反应时间的延迟,反射反馈以及预先的肌肉活动。这些因素又会依次受到疲劳^[8],身体摆动^[9],外界干扰的预知^[6],已存在的肌肉活动^[10]和预负荷^[11]的影响。同时,在腰痛患者和健康个体^[12],以及无训练史与有训练史的个体^[13]之间,这些因素也会有差别。

动态情况下的脊柱稳定性对于保护整个系统,尤其在未知的突发负荷作用下,使之避免受伤,起着至关重要的作用。躯干稳定性由三个子系统构成,分别是被动子系统,主动子系统和反射子系统^[5]。研究表明,随着躯干前屈^[14]和压力负荷^[15]的增大,被动子系统(即椎间盘,韧带和关节面)对脊柱稳定的贡献也随之增加,相反的,当身体越接近直立位时,它的贡献呈降低趋势^[16]。躯干拮抗肌的预激活能够增加躯干的内部紧张度,从而减少突发负荷对躯干的扰动^[11]。它虽然增加了躯干的紧张度,使整个系统更加稳定,但会产生额外的代谢消耗^[17]和增加的作用于脊柱被动组织的负荷^[18]。突发负荷下,反馈反射对躯干紧张度和稳定性也起到至关重要的作用。然而,突发负荷之前的躯干肌肉预激活可以增加内部紧张度,从而减少对反馈反射的需求^[19]。相关研究强调在未知突发负荷下,反射子系统和主动子系统对于稳定躯干的重要性需进行比较^[10,17]。

仅由韧带和脊椎组成的结构是不稳定的,在很小的压力负荷下就会变形。突发外力可以对脊柱稳定性产生威胁,从而增加脊柱受伤的危险性。躯干肌的主动收缩可以有效地稳定脊柱^[5]。Vera-Garcia FJ等^[20]的研究发现,施加于受试者的后向负荷突然释放,腹部肌肉预先的共激活可以显著增加脊柱稳定性,同时减少了腰椎的移动,但却增加了脊柱的压力负荷。对于背部肌肉和腹内斜肌,腹部肌肉的预激活可以降低其频率和振幅,并使肌肉活动延迟。类似的,竖脊肌的预激活也可以增加躯干紧张度,同时减少维持躯干稳定肌肉的神经信号输入,但竖脊肌的最大肌电图(electromyography, EMG)水平不随预激活的增加而增大,较低或中等水平的共激活可能会为躯干不稳和脊椎抗压能力低的患者带来益处。Dupeyron A^[21]等的研究发现,当腰部肌肉处于疲劳状态时,突然施加于躯干一个向前的大负荷,可引起竖脊肌振幅峰值的增大以及反应时间的轻微降低,即通过神经肌肉系统控制策略的改变来代偿肌肉疲劳后肌力的下降;在可预期的状态下,为了减少突发负荷对躯干的扰动,腰部肌肉会在负荷作用于躯干之前被激活。有趣的是,腰部肌肉的预激活不

会受到疲劳因素的影响。

3 突发负荷改变条件下躯干肌肉的控制策略

3.1 突发负荷条件下身体姿势对运动控制的影响

面对突发负荷时,不同的身体姿势对腰部肌肉控制策略及腰椎稳定性有不同程度影响。Brown SH等^[10]通过实验证明,在突发负荷下,受试者处于卧位时,腰部会产生大幅度移位(前屈时平均最大腰部偏移超过被动限制的50%,侧屈时超过70%)。其偏移程度远远大于反射应答活跃时的表现^[19]。这表明,躯干内部紧张度不能够有效预防脊椎将受到的有害移位。在外力扰动下,反射对于稳定躯干起到至关重要的作用。研究表明,当应对外界负荷时,大约42%的躯干紧张度来自于反射作用^[7]。Mawston GA等^[22]发现,在弯腰的姿势下,突发扰动造成关节移位的程度要小于直立位。与直立位相比,弯腰姿势下的扰动可导致臀部和腰部肌肉反应时间的缩短,其原因可能是由增加的系统紧张度引起。当腰椎前屈时,其周围韧带组织的紧张度随之增加,并开始阻止脊柱的前屈活动。随着被动子系统紧张度的增加,能量可以由外力作用点快速转移到躯干和骨盆,最后转移至下肢。然而,有研究表明,与直立位相比,弯腰体位下,外部负荷或许更容易造成脊柱的损伤。例如,当腰椎接近最大前屈位时,脊柱两侧肌肉群的几何形状和激活水平发生改变,从而有可能使其限制躯干前屈的能力下降^[23]。CHOW DH等^[24]的研究指出,任何起重(lifting)姿势下,负荷的突然释放都会引发一种“踝”应答反应,即下肢前侧肌肉最先收缩,随后依次是躯干前侧肌肉收缩,躯干后侧肌肉放松,最后是下肢后侧肌肉放松。Chow DH等^[25]还发现,对于弯腰起重(stoop lifting),较低的负荷释放高度可以显著增加姿势扰动和脊柱负荷。在较低的释放高度下,导致跌倒或蹒跚的平均负荷要显著低于较高的释放高度。如果不能保证负荷的安全性,身体位于较高水平也许可以降低由负荷的突然释放导致的受伤概率。

3.2 突发负荷条件下腰痛患者的躯干肌肉控制策略

在突发负荷条件下,腰痛患者会表现出与健康个体不同的肌肉应答策略。Radebold A等^[12]在比较了腰痛患者组和健康对照组在不同方向去负荷(load release)作用下肌肉应答类型的差异后发现,腰痛患者组的肌肉反应时间较健康对照组均明显延长,其原因可能是脊柱周围的软组织损伤造成本体感受器不可逆的破坏,从而影响伤害感受器和本体感受器的应答,使之无法对突发负荷做出快速的反射反应。因此,机体会通过肌肉募集类型的改变来代偿肌肉反应时间的延迟。在较高的负荷水平下,所有受试者均表现出参与应答肌肉数目的增加和肌肉反应时间的降低;应对不同方向的突发负荷时,腰痛患者组主动肌“关闭”的数目和拮抗肌“开启”的数目均显著少于健康对照组,并且腰痛患者组还会出现主

动肌与拮抗肌的共收缩,其可能原因是共收缩使腰痛患者的关节稳定性得到提高,作为一种代偿机制,共收缩还能保护腰椎使之避免受到损伤^[12]。然而,在面对突发负荷时,神经肌肉控制策略的改变可能会导致腰痛患者的进一步损伤,从而增加个体罹患慢性腰痛的可能性^[26]。Cholewicki J等^[26]发现,最终罹患下背损伤的个体在损伤之前应对突发负荷时,就表现出腹部肌肉的延迟“关闭”,以及参与应答的腹部肌肉数量的增加。因此,通过肌肉应答策略的不同可以预测个体将来是否会罹患下背损伤。Gregory DE等^[27]的研究表明,虽然长时间地站立会使很多人感到下背不适,但它似乎不会对个体在突发负荷下的肌肉应答策略产生显著影响。然而,那些由于长时间站立最终罹患下背不适的个体则表现出参与应答的伸肌数量的增加以及激活程度的升高。一旦不适产生,参与应答的腹部肌肉数量也会随之增加。因此通过分析突发负荷下机体不同的应答策略,可以对个体最终罹患下背不适的可能性进行有效预测。

此外,腰痛患者对突发负荷的反应存在性别差异。Sung PS等^[28]将男女各18例腰痛患者作为被试,使其站立于测力台,然后从一定高度释放重球,并最终落于被试手持托盘上,通过分析被试受到的地面反作用力(ground reaction force, GRF),发现女性腰痛患者组平均标准化GRF振幅值明显高于男性腰痛患者组。研究还发现,预期作用对女性腰痛患者平衡能力的影响要大于男性。女性患者组在可预知突发负荷的状态下,其标准化的GRF振幅值明显低于不可预知时的振幅值,而男性患者组则无明显差异。上述研究结果表明,在突发负荷作用下,男性维持姿势稳定的能力要强于女性,尤其在对外部负荷无预期时最为明显。

4 小结

本文系统介绍了当前关于突发负荷对躯干肌肉运动控制策略和腰椎稳定性影响的研究进展,旨在探索突发负荷下躯干肌肉的活动特性,进而为预防腰部损伤以及合理安排腰痛患者的康复训练提供科学的指导和依据。然而,目前大多数研究只局限于定性分析,无法精确预测突发负荷下的躯干反应(即躯干肌肉力量,脊柱负荷以及稳定性),因此,对其进行定量分析必定会成为未来研究的新趋势。

参考文献

- [1] Manning DP, Mitchell RG, Blanchfield LP. Body movements and events contributing to accidental and nonaccidental back injuries[J]. Spine, 1984, 9(7):734—739.
- [2] Omino K, Hayashi Y. Preparation of dynamic posture and occurrence of low back pain[J]. Ergonomics, 1992, 35(5—6): 693—707.
- [3] Farfan HF. Muscular mechanism of the lumbar spine and the

- position of power and efficiency[J]. *Orthop Clin North Am*, 1975,6(1):135—144.
- [4] Sahrman SA. Diagnosis and treatment of movement impairment syndromes[M]. Minneapolis:St. Louis, Mosby: Mosby Inc, 2002.51—119.
- [5] Panjabi MM. The stabilizing system of the spine[J]. *Spinal Disord*, 1992, 5(4):383—389.
- [6] Brown SH, Haumann ML, Potvin JR. The responses of leg and trunk muscles to sudden unloading of the hands: implications for balance and spine stability[J]. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*, 2003, 18(9):812—820.
- [7] Moorhouse KM, Granata, KP. Role of reflex dynamics in spinal stability: intrinsic muscle stiffness alone is insufficient for stability[J]. *J Biomech*, 2007, 40(5):1058—1065.
- [8] Wilder DG, Aleksiev AR, Magnusson ML, et al. Muscular response to sudden load. A tool to evaluate fatigue and rehabilitation[J]. *Spine*, 1996, 21(22):2628—2639.
- [9] Arashanapalli M, Wilson SE. Paraspinal muscle vibration alters dynamic motion of the trunk[J]. *J Biomech Eng*, 2008, 130(2):1—7.
- [10] Brown SH, McGill SM. The intrinsic stiffness of the in vivo lumbar spine in response to quick releases: implications for reflexive requirements[J]. *J Electromyogr Kinesiol*, 2009, 19(5): 727—736.
- [11] Andersen TB, Essendrop M, Schibye B. Movement of the upper body and muscle activity patterns following a rapidly applied load: the influence of pre-load alterations[J]. *Eur J Appl Physiol*, 2004, 91(4):488—492.
- [12] Radebold A, Cholewicki J, Panjabi MM, et al. Muscle response pattern to sudden trunk loading in healthy individuals and in patients with chronic low back pain[J]. *Spine*, 2000, 25(8):947—954.
- [13] Pedersen MT, Essendrop M, Skotte JH, et al. Training can modify back muscle response to sudden trunk loading[J]. *Eur Spine*, 2004, 13(6):548—552.
- [14] Arjmand N, Shirazi-Adl A. Model and in vivo studies on human trunk load partitioning and stability in isometric forward flexions[J]. *J Biomech*, 2006, 39(3): 510—521.
- [15] Shirazi-Adl A. Analysis of large compression loads on lumbar spine in flexion and in torsion using a novel wrapping element[J]. *J Biomech*, 2006, 39(2):267—275.
- [16] El-Rich M, Shirazi-Adl A, Arjmand N. Muscle activity, internal loads, and stability of the human spine in standing postures: combined model and in vivo studies[J]. *Spine*, 2004, 29(23):2633—2642.
- [17] Franklin TC, Granata KP. Role of reflex gain and reflex delay in spinal stability—a dynamic simulation[J]. *J Biomech*, 2007, 40(8):1762—1767.
- [18] Arjmand N, Shirazi-Adl A, Parnianpour M. Relative efficiency of abdominal muscles in spine stability[J]. *Comput Methods Biomech Biomed Engin*, 2008, 11(3):291—299.
- [19] Cholewicki J, Simons AP, Radebold A. Effects of external trunk loads on lumbar spine stability[J]. *J Biomech*, 2000, 33 (11):1377—1385.
- [20] Vera-Garcia FJ, Brown SH, Gray JR, et al. Effects of different levels of torso coactivation on trunk muscular and kinematic responses to posteriorly applied sudden loads[J]. *Clinical Biomechanics*, 2006, 21(5):443—455.
- [21] Dupeyron A, Perrey S, Micallef JP, et al. Influence of back muscle fatigue on lumbar reflex adaptation during sudden external force perturbations[J]. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 2010, 20(3):426—432.
- [22] Mawston GA, McNair PJ, Boocock MG. The effects of prior exposure, warning, and initial standing posture on muscular and kinematic responses to sudden loading of a hand-held box[J]. *Clinical Biomechanics*, 2007, 22(3):275—281.
- [23] McGill SM, Hughson RL, Parks K. Changes in lumbar lordosis modify the role of the extensor muscles[J]. *Clin Biomech*, 2000, 15(10):777—780.
- [24] Chow DH, Cheng IY, Holmes AD, et al. Postural perturbation and muscular response following sudden release during symmetric squat and stoop lifting[J]. *Ergonomics*, 2005, 48(6): 591—607.
- [25] Chow DH, Cheng AC, Holmes AD, et al. The effects of release height on center of pressure and trunk muscle response following sudden release of stoop lifting tasks[J]. *Applied Ergonomics*, 2003, 34(6):611—619.
- [26] Cholewicki J, Silfies SP, Shah RA, et al. Delayed trunk muscle reflex responses increase the risk of low back injuries[J]. *Spine*, 2005, 30(23):2614—2620.
- [27] Gregory DE, Brown SH, Callaghan JP. Trunk muscle responses to suddenly applied loads: do individuals who develop discomfort during prolonged standing respond differently[J]. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 2008, 18(3): 495—502.
- [28] Sung PS, Park HS. Gender differences in ground reaction force following perturbations in subjects with low back pain [J]. *Gait Posture*, 2009, 29(2):290—295.