

文章编号:1004-7220(2022)05-0967-05

· 综述 ·

从生物力学角度探讨腹直肌分离

罗 香¹, 王 扬², 李月峰³, 马 瑞³

(1. 江苏大学附属镇江四院 影像科, 江苏 镇江 212003; 2. 高邮市人民医院 影像科, 江苏 高邮 225600;
3. 江苏大学医学院 影像应用研究室, 江苏 镇江 212013)

摘要: 腹直肌分离(diastasis recti abdominis, DRA)是产后并发症之一,常采用腹肌训练的方法促进其康复,但至今没有普遍可接受的训练模式及其相应理论支撑。本文从腹壁生物力学角度对 DRA 机制和康复效果进行综述,同时也分析了其争议的原因。主要原因包括腹直肌间距(inter-rectus distance, IRD)和腹肌厚度测量方法和测量部位的不统一,以及未能用生物力学方法探讨 DRA 发生机制等。因此,今后应规范 DRA 训练方法,研究 DRA 状态下的腹肌及其腱膜力学特征,为腹肌训练模式提供依据。

关键词: 腹直肌分离; 腹肌训练; 生物力学

中图分类号: R 318.01 **文献标志码:** A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2022.05.030

Diastasis Recti Abdominis from the View of Biomechanics

LUO Xiang¹, WANG Yang², LI Yuefeng³, MA Rui³

(1. Department of Imaging, Zhenjiang Fourth Hospital, Jiangsu University, Zhenjiang 212003, Jiangsu, China;
2. Department of Imaging, Gaoyou People's Hospital, Gaoyou 225600, Jiangsu, China; 3. Department of Imaging Application, School of Medicine, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, Jiangsu, China)

Abstract: Diastasis recti abdominis (DRA) is one of postpartum complications, and abdominis muscles training is often used for the rehabilitation of DRA, but universally acceptable training modes and support of corresponding theories are not available now. In this paper, the mechanism of DRA and rehabilitation effects were reviewed from biomechanical view of the abdominal wall. Meanwhile, the main reasons for the controversy were also analyzed. The measurement method and measurement sites of inter-rectus distance (IRD) and rectus abdominis muscle thickness are inconsistent; the mechanism of DRA was not studied by biomechanical method. Therefore, in the future, the prediction for training effect of DRA should be standardized, the mechanical characteristics of abdominal muscles and their aponeurosis in the status of DRA should be studied, so as to provide references for abdominal muscle training.

Key words: diastasis recti abdominis (DRA); abdominal muscle training; biomechanics

妊娠时期的腹直肌为了适应胎儿成长,表现为腹壁扩张,两侧腹直肌分离,腹白线变宽等,严重者可达 20 cm,腹直肌间距大于 5 cm,此情况称为腹

直肌分离(diastasis recti abdominis, DRA)^[1-6]。腹直肌虽为腹壁的一部分,但其病变可能影响腹壁整体功能,出现腹壁功能障碍,如腰痛、尿失禁等。因

收稿日期:2021-09-28; 修回日期:2021-12-13

基金项目:江苏省重点研发计划项目(BK2017698)

通信作者:马瑞,硕士生导师,副教授, E-mail:1000007265@ujs.edu.cn

此,全面了解腹肌的形态、功能十分必要。对 DRA 最有效的方法是腹肌的物理训练,但目前还没有定型的训练模式^[7-9]。要实施腹肌的康复训练,首先要了解相关肌肉的功能、DRA 发生机制、物理治疗依据等,而这些知识与力学密不可分。只有掌握腹壁的力学特点,才有助于指导腹肌正确的训练方法。近年来,较多学者采用力学方法研究腹肌的形态、功能^[10-20]。本文从生物力学角度对 DRA 发生机制、治疗原则等相关知识进行综述。

1 腹肌生物力学研究方法的最新进展

1.1 根据肌纤维走向,设计特定训练方法

腹前外侧壁肌有不同的走行方向,康复治疗师根据肌纤维的力学特点,设计相应运动,训练特定肌肉。例如:卷腹运动训练腹直肌,侧身卷腹训练腹外侧群肌,缩腹主要训练腹横肌等^[10-12]。

1.2 测量腱膜力学参数

使用位移传感器(displacement sensor)测量人体标本腱膜弹性^[13]。采用超声亮度模式(brightness-mode)和横波弹性成像(shear wave elastography)扫描技术,测量人体腱膜变形(distortion)程度和刚度(stiffness)^[18]。

1.3 建立数值模型

以采集的人体 CT 图像测量数据为基础,建立腹壁三维有限元模型,探讨腹壁生物力学特点^[14]。

1.4 测量腹壁肌肉动态变化

用实时动态磁共振成像(magnetic resonance imaging, MRI)扫描捕捉腹壁肌肉的运动,经半自动 MRI 后处理方法,可量化腹壁前外侧肌肉的空间和时间变形,精确了解腹壁肌肉的动态变化,如肌肉面积、位移程度等,从而可对腹壁肌力学特征作出精确的判断^[19]。也有研究采用激光扫描仪扫描腹壁表面,观察腹壁肌收缩和松弛及肌肉的位移程度^[15]。

2 DRA 训练效果判断方法的研究概况

2.1 腹直肌间距测量方法和测量部位的研究

DRA 诊断通过测量两侧腹直肌内界距离而定,包括用手指宽度、卷尺、游标卡尺、超声、CT 等手段,各种手段都有其相应的作用^[1,7]。如进行初步筛选时,常用手指测量,两指宽就可诊断 DRA;也可用卷

尺、游标卡尺,达到 25 mm 可确诊;如要更科学的诊断,则采用超声测量,它已被广泛地应用于 DRA 测量,其可行性和可靠性方面都优于其他手段。但有关 DRA 测量的部位,目前存在差异。一般以脐为标志,在脐上、下 2 cm 测量两侧腹直肌之间的距离^[1,4];或在脐上 3 cm 和脐下 2~3 cm^[6,21];或在腹直肌上界、脐,以及脐上、下 4.5 cm 处测量^[22]。由此可见,腹直肌间距的测量手段和测量部位不统一,所获得实验结果也必然有差异。

2.2 腹肌厚度测量部位的研究

DRA 常通过腹部训练促进康复,训练会引起相应肌肉厚度等变化,其厚度测量是评估训练是否有效的指标,厚度改变也提示训练激活的肌肉。常用超声测量肌肉的厚度,但各研究的测量部位不一致。Ha 等^[23]在右腋中线和髂嵴最高点的交界处测量腹横肌的厚度;Porras 等^[24]在腋中线处,取肋下缘与髂嵴之间中点;Tahan 等^[25]采取的标志点与 Porras 等^[24]基本一致,但其定位在腋前线。Weis 等^[26]沿髂前上棘内侧和上方一横指处,测量腹肌厚度。Jourdan 等^[16,19]选取第 4 腰椎上缘作为测量点,认为该标志点稳定、较易辨认,并能代表腹壁核心结构的分布状况。该研究用 CT、MRI 扫描测量正常人包括肌肉厚度在内的肌形态和各肌腱膜及其白线的宽度。由此可见,各研究在腹肌厚度测量方位和选择标志点方面不统一,这也将影响对训练效果的预测。

上述测量方法的介绍似乎与力学没有直接联系,但它与力学数据采集的方法和测量部位有直接关联,如采集不规范,将直接影响对训练效果的预测。

3 腹肌训练作用及其动态变化的研究进展

纤维呈垂直方向排列的腹直肌位于腹前部正中线的两侧。腹外侧群肌由浅至深有腹外斜肌、腹内斜肌和腹横肌,它们起于下位肋骨、髂嵴及其借助于胸腰筋膜起于腰椎棘突等处,其纤维分别以外上、内下和横向的方向,向内侧均移行为腱膜。抬头和卷腹运动时,腹直肌电活动最高,即腹直肌得到最大程度的激活,也是最适合腹直肌强度训练的运动,腹直肌收缩同时会造成腹内压明显增加,并使腹直肌间距增大^[7,10];但抬头和卷腹运动使脐上

的腹直肌间距显著减少,减少的原因可能是卷腹也同时增加了腹部的负荷,其重力激活腹横肌引起腹直肌间距的缩小^[9,27]。侧卷腹运动激活腹外侧群肌,其作用与纤维走行方向相一致,右侧卷腹运动激活腹内斜肌和腹横肌,左侧卷腹运动则主要激活腹外斜肌。侧卷腹运动对腹直肌没有直接影响,但可引起腹直肌间距的缩小^[1,11]。缩腹运动主要训练腹横肌,研究者关于缩腹运动对腹部康复作用仍有争议。Theodorsen 等^[28]研究发现,缩腹运动能使脐上、下的腹直肌间距增加。在缩腹时,腹外侧群肌,尤其腹横肌的横向力量向外侧拉腹直肌,将其拉向胸腰筋膜和脊柱方向,从而使两侧腹直肌间距增大。Sancho 等^[4]研究认为,腹横肌运动使腹直肌间距缩小,其腹部横向力减少腹直肌间距。因为腹横肌向内侧以腹横肌腱膜止于腹直肌鞘及其白线,其腱膜与腹直肌没有联系,它向外收缩的力量使白线张力增加,高张力的白线及其腹直肌鞘促使腹直肌向中线靠近,缩短腹部横径及其腹直肌间距。脐下腹直肌后鞘消失,产生的张力对腹直肌作用减弱,腹横肌收缩使腹直肌间距加大。上述研究发现运动使腹直肌间距增大或缩小,仅是测量数据变化,没有相应理论支撑,未能得出公认的结论。Jourdan 等^[16]重点研究腹横肌的年龄与性别差异,成人以后的腹横肌厚度及其腱膜宽度并不随年龄变化,而其他腹肌随着年龄增长变得更薄,各腱膜宽度也随年龄增大。他们认为腹横肌不随年龄变化的原因可能其作为紧身肌容纳内脏^[16];亦可解释腹横肌仅用非常低的收缩水平维持腰椎的稳定性,抵抗重力的影响,其低水平收缩可能是肌厚度不会因年龄变化的原因^[25]。腹横肌是否会运用低程度的收缩,保持白线的张力,还有待进一步探讨。与男性腹横肌面积相比,女性的腹横肌明显较大,推测可能是女性有较大的脏器面积,腹横肌为了与其适应而增大^[16,25]。

Jourdan 等^[19]通过实时动态磁共振成像捕捉腹壁肌肉的运动,在 5 s 的时间尺度上显示肌肉位移的幅度。腹外侧群肌位移幅度比较大,但该肌群的内(前)、外侧(后)的附着点位移幅度不一样,肌后部位移不超过 4 mm,而前部位移幅度最高达 25 mm。导致位移幅度不同的原因是肌肉两端至骨附着点的距离不同,内侧端远离髂嵴、肋骨和腰椎

的附着点,故收缩时向外侧位移的幅度大;该肌群的外侧端位移小,是由于靠近腰椎等骨附着点。Jourdan 等^[19]虽然不是以探讨 DRA 原因为研究目的,但其肌肉位移结果间接证明了 Sancho 等^[4]的论点,即腹外侧群肌收缩时形成了向外的横向力量。

4 腹直肌鞘和白线的力学特点与 DRA 关系

腹外侧肌向内侧移行的腱膜包绕腹直肌形成腹直肌鞘,其位于腹直肌前面的称腹直肌鞘前层,反之称后层。前层由腹外斜肌腱膜和腹内斜肌腱膜前部分构成,前层通过腱划与腹直肌紧密相贴;后层由腹内斜肌腱膜后部分和腹横肌腱膜愈合而成,其与腹直肌疏松相贴。脐下方 4~5 cm 处,鞘的后层完全转至腹直肌前面参与构成鞘的前层,即此处缺乏鞘的后层。两侧腹直肌鞘在腹部正中相互交织形成白线,故白线有 3 个不同的纤维走向,从前向后依次为斜行、横行和不规则 3 部分纤维板组成,横行纤维与腹内压相对应,而斜纤维主要参与躯干的运动^[7]。女性脐部的横纤维比斜纤维多,脐部厚度变薄,宽度增加,白线性别差异是适应妊娠期腹内压升高的结果^[7,29-30]。

Wingerden 等^[13]将分离后的腹直肌鞘前、后层样本放在位移传感器上,获得腹直肌鞘前、后层纵向和横向拉力。结果表明,腹直肌鞘后层纵向拉力明显大于横向的力,结合腹直肌鞘后层与腹直肌松散连接的解剖学特点,提示腹横肌不会使腹直肌向外侧移位,而拉鞘的后层向外侧滑到腹直肌后面,使白线处于紧张状态,造成腹直肌间距缩小。该生物力学实验结果证实了 Sancho 等^[4]的观点,腹直肌鞘前层纵向与横向拉力没有差异性,即前层对腹直肌间距缩小不起主要作用。

随着科技发展,用超声亮度模式进行横波弹性成像扫描,可测量腹白线的刚度和变形程度等力学指标。Beamish 等^[18]选用 20 例女性,由 DRA (11 例)和正常对照(9 例)2 组构成,每组又做静止、抬头、和半卷腹 3 种运动,用上述技术比较 2 组在各种运动状态下的腹白线刚度和变形指数。结果发现,DRA 患者的白线刚度低、变形明显,做抬头和半卷腹运动时,白线刚度、变形更加严重。该结果提示 DRA 患者的白线在形态学和力学上发生了改变,运动使症状加重。在正常测试者中,做抬头

和半卷腹运动时,白线刚度增加,这可能是由于腹外侧壁肌肉产生的拉力使完整的白线绷紧。轻度 DRA 患者做半卷腹运动时,白线刚度增加,提示轻度症状的白线没有实质性损害。由此可见,腹直肌间距和白线变形之间的关系要比腹直肌间距和白线刚度更明显一些。了解这一变量关系可能有助于评估 DRA 患者的功能,并通过康复促使白线发生力学功能指标的变化。在训练任务中,减少白线的变形可能是康复的目标。该结果也提示,白线的形态学和力学改变是 DRA 病变之一,在重症 DRA 病人中,抬头及其卷腹运动可能会使症状加重,即该运动不适合重症病人的训练,其推论与 Sancho 等^[4]的结果相左。

5 存在问题与展望

(1) 目前,有关 DRA 研究的水平不高,原因之一是对生物力学研究方法重视不够。随着孕妇盆部姿势的变化,脊柱、盆腹生物力学特性也随之改变^[31-32]。同样,探讨 DRA 发生原因以及治疗也离不开生物力学研究。例如:DRA 发生过程是腹壁力学变化的过程;康复训练也是依据腹肌的力学作用特点而设计。发生 DRA 后,病人腹壁的结构、功能和力学特征必然随之改变。Jourdan 等^[19]对腹外侧群肌进行动态分析,获得腹肌收缩位移的程度,有助于了解腹肌正常功能以及 DRA 机制,但该研究没有针对 DRA,而是正常的腹肌功能。后续研究可采用力学方法重点探讨 DRA 在运动时各腹肌功能变化,分析 DRA 与运动的关系。Beamish 等^[18]采用超声横波弹性成像扫描技术探讨正常与 DRA 及其在抬头和卷腹运动状态下的腱膜力学特点。因为腹横肌对 DRA 的康复更为重要,若后续能探讨缩腹状态下腹直肌鞘和白线的变形指数、刚度及其与腹横肌关系,其获得的证据支持腹横肌作用可能更直接一些。由此可见,引进生物力学的方法及其理念对于探讨 DRA 发生机制非常必要。

(2) DRA 康复训练尚无普遍接受的治疗性运动方案,其中争议较大的原因之一是评价方法差异造成。两侧腹直肌间距的测量分别是用手指、卡尺、超声等手段,方法不统一,所获得的数据也没有可比性^[1,7,21]。即使是常见的超声,但测量部位不一致^[1,4,6,21-22]。例如:脐上 3 cm 与 2 cm 所获数据

将会影响数据的可比较性。此外,测量标志点的选择也会影响数据可信性,如软组织(脐)易受外界影响而不稳定。腹肌厚度变化可反映 DRA 训练的效果,目前有关肌厚度测量虽有较多的研究,但选择测量部位不统一^[23-26],所选的标志点不一致^[16,19],将直接影响研究者对训练效果的判断。此外,有关 DRA 状态下的腹肌形态、功能的研究尚处于起步阶段。由此可见,要解决 DRA 训练模式的争议,统一测量方法是其解决问题的途径之一。在此基础上,对 DRA 在不同运动状态下用稳定的标志点探讨肌肉厚度、长度,腱膜宽度等变化,分析运动与肌肉相应关系的指标,提出最适合腹肌康复的运动。

参考文献:

- [1] GLUPPE SB, ENGH ME, BO K. Immediate effect of abdominal and pelvic floor muscle exercises on interrecti distance in women with diastasis recti abdominis who were parous [J]. *Phys Ther*, 2020, 100(8): 1372-1383.
- [2] CORVINO A, ROSA D, SBORDONE C, *et al*. Diastasis of rectus abdominis muscles: Patterns of anatomical variation as demonstrated by ultrasound [J]. *Pol Radiol*, 2019, 84: e542-e548.
- [3] OLSSON A, KIWANUKA O, WILHELMSSON S, *et al*. Cohort study of the effect of surgical repair of symptomatic diastasis recti abdominis on abdominal trunk function and quality of life [J]. *BJS Open*, 2019, 3(6): 750-758.
- [4] SANCHO MF, PASCOAL AG, MOTA P, *et al*. Abdominal exercises affect inter-rectus distance in postpartum women: A two-dimensional ultrasound study [J]. *Physiotherapy*, 2015, 101(3): 286-291.
- [5] VELJOVIC F, STRAUS S, KARABDIC I, *et al*. Spinal column and abdominal muscles loading in pregnant women dependent on working postures [J]. *Acta Inform Med*, 2019, 27(1): 54-57.
- [6] 竺佳晟, 李金辉. 产后腹直肌分离的评估与治疗研究进展 [J]. *中华物理医学与康复杂志*, 2019, 41(10): 793-796.
- [7] CARLSTEDT A, BRINGMAN S, EGBERTH *et al*. Management of diastasis of the rectus abdominis muscles: Recommendations for Swedish National Guidelines [J]. *Scand J Surg*, 2021, 110(3): 452-459.
- [8] GUSTAVSSON C, ERIKSSON-CROMMER M. Physiotherapists' and midwives' views of increased inter recti abdominis distance and its management in women after childbirth [J]. *BMC Womens Health*, 2020, 20(1): 37-45.
- [9] PASCOAL AG, DIONISIO S, CORDERRO F, *et al*. Inter-rectus distance in postpartum women can be reduced by isometric contraction of the abdominal muscles: A preliminary case-control study [J]. *Physiotherapy*, 2014,

- 100(4): 344-348.
- [10] MADOKORO S, MASAMI YOKOGAWA M, MIAKI H. Effect of the abdominal draw-in maneuver and bracing on abdominal muscle thickness and the associated subjective difficulty in healthy individuals [J]. *Healthcare*, 2020, 8(4): 496-506.
- [11] CROMMERT ME, BJERKEFORS A, TARASSOVA O, *et al.* Abdominal muscle activation during common modifications of the trunk curl-up [J]. *Exercise J Strength Cond Res*, 2021, 35(2): 428-435.
- [12] CATANIA B, ROSS T, SANDELLA B, *et al.* Clinical assessment and thickness changes of the oblique and multifidus muscles using a novel screening tool and exercise program: A randomized controlled trial [J]. *J Sport Rehabil*, 2020, 30(3): 384-394.
- [13] WINGERDEN JPV, RONCHETTI I, SNEIDERS D, *et al.* Anterior and posterior rectus abdominis sheath stiffness in relation to diastasis recti; Abdominal wall training or not [J]. *J Bodyw Mov Ther*, 2020, 24(1): 147-153.
- [14] PAVAN PG, TODROS S, PACHERA P, *et al.* The effects of the muscular contraction on the abdominal biomechanics: A numerical investigation [J]. *Comput Methods Biomech Biomed Engin*, 2019, 22(2): 139-148.
- [15] TODROS S, CESARE N, PIANIGIANI S, *et al.* 3D surface imaging of abdominal wall muscular contraction [J]. *Comput Methods Programs Biomed*, 2019, 175: 103-109.
- [16] JOURDAN A, SOUCASSE A, SCEMAMA U, *et al.* Abdominal wall morphometric variability based on computed tomography: Influence of age, gender, and body mass index [J]. *Clin Anat*, 2020, 33(8): 1110-1119.
- [17] YUKSEL O, GEZER NS, CANDIA AE, *et al.* Cross-sectional areas of rectus abdominis and psoas muscles reduces following surgery in rectal cancer patients [J]. *Support Care Cancer*, 2020, 28(5): 2397-2405.
- [18] BEAMISH N, GREEN N, ELYSE NIEUWOLD E, *et al.* Differences in linea alba stiffness and linea alba distortion between women with and without diastasis recti abdominis: The impact of measurement site and task [J]. *J Orthop Sports Phys Ther*, 2019, 49(9): 656-665.
- [19] JOURDAN A, TROTTER AL, DAUDE P, *et al.* Semiautomatic quantification of abdominal wall muscles deformations based on dynamic MRI image registration [J]. *NMR Biomed*, 2021, 34(e4470): 1-12.
- [20] 詹晓彤, 陈强, 李志勇. 基于 OpenSim 的腰部肌骨系统在体前屈状态下生物力学分析 [J]. *医用生物力学*, 2019, 34(1): 27-34.
- ZHAO XT, CHEN Q, LI ZY. OpenSim-based biomechanical analysis of lumbar musculoskeletal system under forward flexion [J]. *J Med Biomech*, 2019, 34(1): 27-34.
- [21] 王洁, 王鑫璐, 顾娇娇, 等. 超声检查评估产后早期女性腹直肌及盆底结构与功能 [J]. *中国介入影像与治疗学*, 2020, 17(1): 39-42.
- [22] KESHWANI N, MATHUR S, MCLEAN L. The impact of exercise therapy and abdominal binding in the management of diastasis recti abdominis in the early postpartum period: A pilot randomized controlled trial [J]. *Physiother Theory Pract*, 2021, 37(9): 1018-1033.
- [23] HA SY, SHINB D. The effects of curl-up exercise in terms of posture and muscle contraction direction on muscle activity and thickness of trunk muscles [J]. *J Back Musculoskelet Rehabil*, 2020, 33(5): 857-863.
- [24] PORRAS VA, REGUERA MDC, MORALES PB, *et al.* Comparison of the abdominal wall muscle thickness in female rugby players versus non-athletic women: A cross-sectional study [J]. *Medicina*, 2020, 56(8): 1-9.
- [25] TAHAN N, KHADEMI-KALANTARI K, MOHSENI-BANDPEI MA, *et al.* Measurement of superficial and deep abdominal muscle thickness: An ultrasonography study [J]. *J Physio Anthropol*, 2016, 35(17): 1-5.
- [26] WEIS CA, NASH J, TRIANO JJ, *et al.* Ultrasound assessment of abdominal muscle thickness in women with and without low back pain during pregnancy [J]. *J Manipulative Physiol Ther*, 2017, 40(4): 230-235.
- [27] DEPLEDGE J, MCNAIR P, ELLIS R. Exercises, Tubigrip and taping: Can they reduce rectus abdominis diastasis measured three weeks post-partum? [J]. *Musculoskelet Sci Pract*, 2021, 53: 102381.
- [28] THEODORSEN NM, STRAND LI, BO K. Effect of pelvic floor and transversus abdominis muscle contraction on inter-rectus distance in postpartum women: Cross-sectional experimental study [J]. *Physiotherapy*, 2019, 105(3): 315-320.
- [29] BENJAMIN DR, FRAWLEY HC, SHIELDS N, *et al.* Relationship between diastasis of the rectus abdominis muscle (DRAM) and musculoskeletal dysfunctions, pain and quality of life: A systematic review [J]. *Physiotherapy*, 2019, 105(1): 24-34.
- [30] CAVALLI M, BRUNI PG, LOMBARDO F, *et al.* Original concepts in anatomy, abdominal-wall surgery, and component separation technique and strategy [J]. *Hernia*, 2020, 24(2): 411-419.
- [31] 欧阳钧, 钱蕾, 孙培栋. 脊柱生物力学研究的回顾与展望 [J]. *医用生物力学*, 2021, 36(2): 169-176.
- OUYANG J, QIAN L, SUN PD. Retrospect and prospect on researches of spine biomechanics [J]. *J Med Biomech*, 2021, 36(2): 169-176.
- [32] 徐文静, 王红雨, 江勇, 等. 孕期盆腹生物力学改变对女性盆底功能的影响 [J]. *医用生物力学*, 2021, 36(2): 330-334.
- XU WJ, WANG HY, JIANG Y, *et al.* Effects of pelvic biomechanical changes on female pelvic floor dysfunction [J]. *J Med Biomech*, 2021, 36(2): 330-334.