

文章编号: 1004-7220(2023)04-0824-07

广泛性子宫颈切除术后子宫载荷对子宫韧带和阴道影响的有限元仿真

陈家兰, 邓卓, 米海平, 张静, 沈鑫, 邵亚娟
(陕西省人民医院 妇科, 西安 710068)

摘要:目的 应用有限元法分析广泛性子宫颈切除术后不同子宫载荷(腹压和子宫重量)时子宫阔、圆韧带和阴道的应力分布和变形情况,获得子宫韧带和阴道对子宫载荷变化的敏感度。**方法** 建立后位子宫、韧带和阴道三维几何模型并导入 ABAQUS 软件,然后设置约束、施加载荷,计算各部位的应力和变形。**结果** 广泛性子宫颈切除术后阔、圆韧带的应力和位移均有不同程度增大;阔、圆韧带和阴道的应力和变形均随子宫载荷的增大而增大,阔韧带的变形和应力主要分布于中下部(腹压变化)或中上部(子宫重量变化),圆韧带的应力与变形主要分布于中下部,阴道的应力与变形主要分布于中上部;腹压与子宫重量单独变化或同时变化时,阴道所受应力及对载荷变化的敏感度最大,阔韧带变形及对载荷变化的敏感度最大,总的应力和变形排序因载荷情况不同而略有差异,并且子宫重量比腹压对韧带和阴道的影响程度显著。**结论** 研究结果与临床资料相符,可为临床手术方案优化和发病机制探索提供指导。

关键词: 广泛性子宫颈切除术; 子宫韧带; 盆腔器官脱垂; 有限元仿真

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2023.04.028

Influences of Uterine Load on Uterine Ligament and Vagina after Radical Trachelectomy: A Finite Element Simulation

CHEN Jialan, DENG Zhuo, MI Haiping, ZHANG Jing, SHEN Xin, SHAO Yajuan
(Department of Gynecology, Shaanxi Provincial People's Hospital, Xi'an 710068, China)

Abstract: **Objective** To analyze the stress distribution and deformation of vaginas, broad ligament (BL), round ligament (RL) under different uterine loads (abdominal pressure and uterine weight) after radical trachelectomy (RT) by finite element method, and obtain the sensitivity of BL, RL and vaginas to changes in uterine loads. **Methods** The three-dimensional (3D) geometric models of the posterior uterus, BL, RL and vagina were established and imported into ABAQUS software. After the constraints were set and the loads were applied, the stress and deformation of each part were calculated. **Results** The stress and displacement of BL and RL increased in different degrees after the RT operation. The stress and deformation of BL, RL and vagina increased with the increase of uterine load. The deformation and stress of BL were mainly distributed in the middle and lower part (with abdominal pressure changing) or the middle and upper part (with uterine weight changing). The stress and deformation of RL were mainly distributed in the middle and lower part, and the stress and deformation of vagina were mainly distributed in the middle and upper part. When abdominal pressure and uterine weight changed alone or together, the vaginal stress and its sensitivity to load changes were the greatest, and the displacement of BL and its sensitivity to load change were the greatest. The order of the total stress and

收稿日期: 2022-03-27; 修回日期: 2022-04-01

基金项目: 陕西省自然科学基金(2020SF-035), 陕西省人民医院科技发展孵化基金(2021YJY-45)

通信作者: 陈家兰, 主治医师, E-mail: 578668884@qq.com

deformation was slightly different due to different load conditions, and the influence of uterine weight on ligaments and vagina was more significant than that of abdominal pressure. **Conclusions** The results are consistent with clinical data, and can provide guidance for clinical surgical plan optimization and pathogenesis exploration.

Key words: radical trachelectomy; uterine ligaments; pelvic organ prolapse; finite element simulation

宫颈癌是最常见的妇科恶性肿瘤之一,严重威胁妇女的生命健康,近年来发病有年轻化趋势,而且大约 40% 宫颈癌是从育龄妇女中诊出^[1]。目前,我国晚婚晚育的现象比较普遍,并且随着二孩、三孩政策的放开,相当一部分女性在生育之前被诊断出宫颈癌。因此,生育力保存已成为妇科癌症管理中的主要问题之一^[2]。广泛性子宫切除术主要切除宫颈、阴道穹窿并切开骶、主韧带,保留宫颈内口、子宫体和附件,并重建子宫峡部和阴道的连续性,从而为宫颈癌患者保留生育能力^[3]。由于正常子宫位置的维持依赖于子宫的骶、主、阔、圆韧带,而广泛性子宫切除术切除了骶、主韧带,破坏了宫颈周围筋膜等支持结构,损伤了“3 个水平”支持理论中的顶端支持(骶、主韧带),而顶端支持缺陷是盆腔器官脱垂(pelvic organ prolapse, POP)发生的关键因素之一^[4]。由此可见,广泛性子宫切除术对子宫体生物力学稳定性(正常解剖位置和功能)的维持有直接影响,必然会对子宫韧带和阴道的应力和变形产生影响。因此,研究广泛性子宫切除术子宫载荷对子宫韧带和阴道的影响十分必要。

由于子宫及其附属韧带位于人体盆腔,进行活体在体无创的生物力学测试短期内仍无法实现。虽然可进行尸体标本的力学测试,但其组织性质与活体组织差别较大。相较之下,有限元分析法可弥补其不足。然而,目前有关子宫及其附属韧带的有限元研究,总体处于起步阶段,且集中于非广泛性子宫切除情况时骶、主韧带的研究。例如,有研究基于磁共振成像(magnetic resonance imaging, MRI)图像建立骶、主韧带三维模型^[5-8]。Luo 等^[9]建立包括阴道前后壁、宫骶韧带、会阴体和肛门括约肌等有限元模型,并据此对 POP 进行探讨。陈倩倩^[10]基于女性骨盆及盆腔主要器官的仿真三维模型,对不同腹压情况下子宫 4 对韧带应力和变形分布进行有限元分析。马辛欣等^[11]建立骶、主韧带有限元模型,分析不同腹压情况下骶、主韧带的应力分布及变形情况。另外,姜文轩等^[12]基于 MRI 数

据采用 Mimics 软件建立广泛性子宫切除术前、后骨盆、膀胱、阴道及直肠三维模型,在此基础上通过分析测量发现手术前、后动态情况下,膀胱、阴道顶端及直肠均发生向下、向后位移,并且术前和术后膀胱、阴道顶端垂直和前后方向移动度的差异均有统计学意义($P < 0.05$)。

本文建立广泛性子宫切除术后子宫、子宫阔、圆韧带和阴道的有限元模型,从生物力学角度分析广泛性子宫切除术后不同子宫载荷(腹压和子宫重量)情况下子宫韧带及阴道的应力及变形情况,为了解术后盆底功能提供力学依据,也为术后子宫脱垂的手术方案制定和优化以及 POP 发生机制的探索提供参考。

1 材料与方法

1.1 子宫、韧带和阴道三维几何模型

本文利用 SolidWorks 软件进行广泛性子宫切除术后女性(后位)子宫、阔韧带、圆韧带和阴道的三维建模(见图 1)。

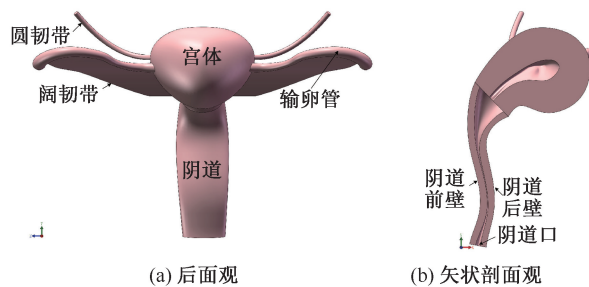


图 1 子宫、韧带和阴道三维几何模型

Fig. 1 Three-dimensional (3D) geometric model of uterus, ligaments and vagina (a) Rear view, (b) Sectional view

子宫体、宫腔和阴道参考某子宫未脱垂女性盆腔 MRI 图像和广泛性子宫切除术范围^[3],阔、圆韧带参考 MRI 图像和解剖结构形态并适当简化^[13-14]。子宫从宫颈口到宫底长度 87 mm,宫体最宽处 53 mm,宫颈口到宫颈峡部长度 29 mm,宫颈峡部宽度 26.5 mm,沿宫颈峡部切除部分宫颈;阴道呈

“S”形弯曲,始于宫颈断面,止于阴道口,前壁长 97.5 mm,后壁长 83.8 mm,宽度(Z 向)均值 30 mm,厚度(X 向)均值 10 mm,壁厚 4 mm,前后壁间距 2 mm;2条阔韧带上端始于输卵管,下端止于宫颈峡部,厚度 1 mm;2条圆韧带起于子宫双角的前面、输卵管近端下方,并向前下方伸展,截面为圆形,盆腔内长度 7 cm,直径约 3 mm。将模型导入 ABAQUS 软件并设置材料参数、边界条件和载荷,即可进行广泛性子宫颈切除术后子宫载荷变化时韧带和阴道的应力及变形计算。

1.2 有限元仿真参数

1.2.1 材料特性 根据相关文献确定子宫及各韧带的材料特性参数^[10-11]。子宫、输卵管和阴道弹性模量为 2.0 MPa,泊松比为 0.45;其中,子宫密度为 1.12 g/mm³。阔韧带和圆韧带的弹性模量分别为 4.23、5.3 MPa,泊松比均为 0.3。

1.2.2 网格划分 子宫、韧带和阴道的网格类型根据各自几何形态和 ABAQUS 软件推荐类型综合确定,控制网格密度的单元尺寸根据 ABAQUS 软件推荐数值适当取整后获得[见图 2(a)]。子宫和阴道采用 10 节点 2 次四面体单元(C3D10)进行网格划分,单元数量分别为 25 405、13 260 个;阔、圆韧带采用 8 节点线性六面体单元(C3D8R)进行网格划分,单元数量分别为 168、798 个。采用 ABAQUS 软件的网格检查工具进行各部分网格单元的形状和尺寸检查,分析检查结果表明不存在错误单元。各部分网格数量和文献[10]相近,后续相关计算结果与文献[10-11]比较接近。此外,将控制网格密度的单元尺寸缩小为本文所采用单元尺寸的 1/2 后,阔韧带、圆韧带、阴道和子宫体单元数量分别增加至 696 个(4.14 倍)、5 750 个(7.71 倍)、57 226 个(4.32 倍)和 162 434 个(6.39 倍)。并且在相同载荷条件下,阔韧带、圆韧带和阴道的最大应力分别为本文仿真结果的 1.50 倍、1.54 倍和 1.39 倍(平均为 1.48 倍),阔韧带、圆韧带和阴道的最大位移分别为本文仿真结果的 1.16 倍、1.04 倍和 1.08 倍(平均为 1.08 倍)。由此可见,单元数量增加的程度显著大于各部分应力和位移的增加程度,从而证明本文网格密度选择的合理性。

1.2.3 边界条件 阔、圆韧带和宫体之间设置绑定约束,两韧带端面设置完全固定。研究发现,阴

道前壁上 2/3 与膀胱壁间为疏松的膀胱阴道隔,下 1/3 与尿道之间为致密的尿道阴道隔,阴道后壁与直肠之间为菲薄的直肠阴道隔,且下 1/4 与肛管形成伸展性较差的会阴体^[3]。因此,本文综合考虑,设置阴道上端和宫颈断面为绑定约束,从阴道口往上 30 mm 的阴道外壁为完全固定约束[见图 2(b)]。

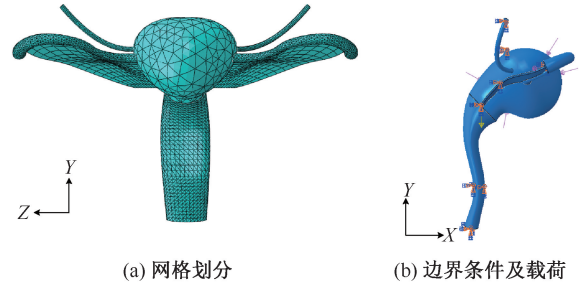


图 2 有限元模型网格划分、边界条件和载荷

Fig. 2 Meshing, boundary conditions and loads of finite element model (a) Meshing, (b) Boundary conditions and loads

1.2.4 载荷施加 ABAQUS 软件中有重力载荷可选,重力为密度、部件体积和重力加速度的乘积,重力方向通过 3 个重力加速度分量(方向依次为 X 、 Y 、 Z)来确定,结合模型坐标系,子宫体所受重力方向为 Y 向(图 2 中在宫颈截面处用竖直向下的黄色箭头标示),重力加速度为 9.81 m/s²。考虑到正常未孕女性子宫重量约为 50 g,孕晚期子宫重量可达 5 kg,故本文子宫重量取值分别为 1、3、5 kg。在宫体表面施加模拟腹压(见图 2 中紫色箭头),根据既往研究报道的最大 Valsalva 动作所产生腹压的第 5、50、95 百分位数(分别为 60、99、168 cmH₂O, 1 cmH₂O = 98 Pa)^[11,15-16],本文将最大 Valsalva 动作所产生的腹压确定为 3 个水平,分别为 6、10、17 kPa。

2 结果

2.1 子宫载荷单独变化对韧带和阴道的影响

各组织的弹性模量一定,当腹压作用于子宫体时,宫体表面均受到腹压作用,由于子宫体前、后壁受力面积差异使得宫体向前下(膀胱侧)移动。根据宫体的位移情况和各部位与宫体的相对位置仿真推理可知,韧带的应力和变形主要分布于中下部,其中最大应力及最大位移主要集中于各韧带下部区域;阴道的变形和应力主要分布于中上段,最大应力和最大位移于阴道后壁上部区域。具体以

腹压 10 kPa 时为例说明。

当子宫体受到腹压作用时,由于子宫体各部位受力面积差异使得子宫向前下(膀胱侧)移动,阔韧带的应力和变形主要分布于中下部,最大应力位于与盆壁连接处下部区域,最大位移集中于下部区域;圆韧带应力和变形主要分布于中下部,最大应力和最大位移均集中于与宫体连接处;阴道的应力和变形主要分布于中上段,最大位移和最大应力集中于阴道后壁上部区域(见图3)。

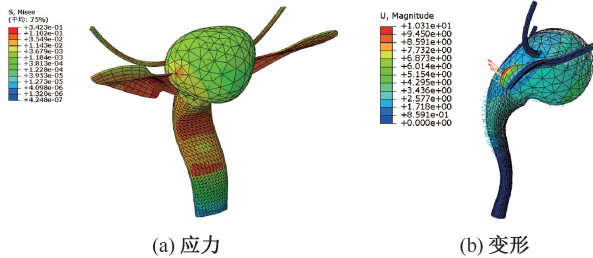


图3 10 kPa 腹压作用下韧带和阴道应力和变形分布

Fig.3 Stress and deformation distributions of ligament and vagina under 10 kPa abdominal pressure (a) Stress, (b) Deformation

妊娠期子宫体重量增加时,在重力和阔、圆韧带悬系力的综合作用,使得宫体向后下(直肠侧)移动,韧带的应力和变形主要分布于中下部或与宫体的连接处,最大应力和最大位移位于和宫体连接处;阴道的变形和应力主要分布于中上段,最大应力和最大位移位于阴道后壁上部或与宫颈断面的连接处。具体以子宫重量 3 kg 为例说明。

当宫体向后下移动时,阔韧带的应力和变形主要分布于与宫体连接处中上部,最大应力和最

大位移集中于与宫体连接处上部;圆韧带的应力和变形同样主要分布于中下部,最大应力和最大位移均集中于与宫体连接处;阴道的应力和变形亦主要分布于中上部,最大位移集中于阴道后壁与宫体连接处,最大应力集中于阴道后壁上部区域(见图4)。

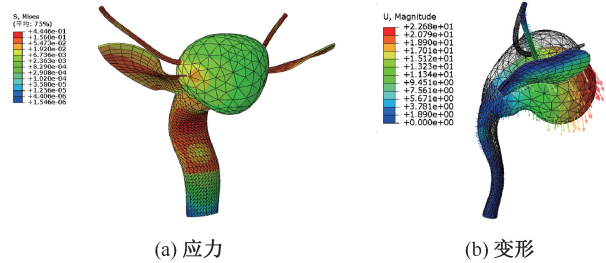


图4 3 kg 子宫重量作用时韧带和阴道应力和变形分布

Fig.4 Stress and deformation distributions of ligament and vagina under 3 kg uterus weight (a) Stress, (b) Deformation

为获得作用于宫体的载荷单独变化时阔、圆韧带和阴道的应力和变形的变化规律,选取各部位最大应力和最大位移为代表进行研究。如图5所示,曲线斜率反映各部位所受应力或位移对载荷变化的敏感度,斜率越大敏感度越大,反之则越小。

当腹压从小增大时,阔、圆韧带和阴道的应力和位移均相应增大,其中阴道所受的应力最大,阔韧带的位移最大,圆韧带所受应力和位移均最小;阴道所受应力对腹压变化最敏感且其敏感度略大于阔韧带,并且显著大于圆韧带,阔韧带位移对腹压变化的敏感度最大且显著大于阴道和圆韧带[见图5(a)]。当子宫重量逐渐增大时,阔、圆韧带和阴道所受应力和位移亦随之增大,最大应力

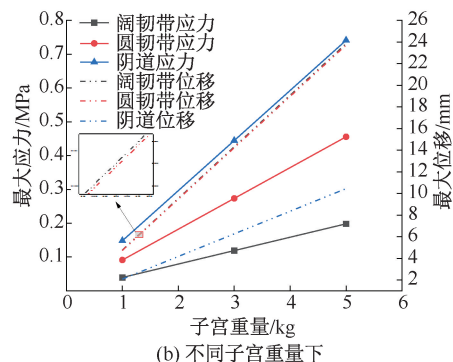
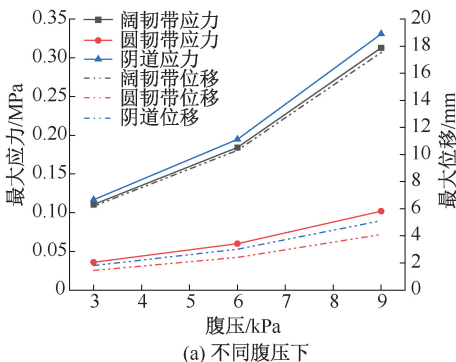


图5 不同子宫载荷下韧带和阴道应力和位移变化

Fig.5 Changes of stress and displacement of ligaments and vagina under different uterine loads (a) Under different abdominal pressures, (b) Under different uterine weights

对子宫重量变化的敏感度排序为阴道>圆韧带>阔韧带,而最大位移对子宫重量变化的敏感度排序为阔韧带>圆韧带>阴道。其中,阔韧带和圆韧带位移及对子宫重量变化的敏感度十分接近[见图5(b)]。

表1 正交仿真试验结果

Tab. 1 Results of orthogonal simulation test

载荷		最大应力/MPa			最大位移/mm		
重量/kg	腹压/kPa	阔韧带	圆韧带	阴道	阔韧带	圆韧带	阴道
1	6	0.141	0.123	0.265	6.538	5.134	3.394
1	10	0.215	0.145	0.343	10.66	5.588	4.463
1	17	0.344	0.183	0.479	17.88	6.644	6.553
3	6	0.203	0.304	0.561	15.23	14.48	7.406
3	10	0.277	0.325	0.639	15.94	14.73	8.275
3	17	0.406	0.363	0.775	18.58	15.31	9.935
5	6	0.265	0.486	0.858	24.72	23.93	11.54
5	10	0.339	0.507	0.936	25.38	24.14	12.34
5	17	0.468	0.543	1.072	26.63	24.58	13.87

结果表明,子宫重量(W)和腹压(p)同时增加时,阔、圆韧带和阴道所受应力和位移均增大,并且最大应力和最大位移均大于腹压或子宫重量单独作用时。阴道所受应力最大,而阔韧带的位移最大,这与两种载荷单独变化时一致,而总体的最大应力或最大位移则因载荷情况不同而略有差异,说明腹压和子宫重量变化对阔、圆韧带及阴道的应力和位移均有直接影响。为了解两种载荷对子宫韧带和阴道应力和变形影响的主次,并进行各部位应力和变形的预测,对试验结果进行方差

表2 阴道最大应力和最大位移的方差分析结果

Tab. 2 Variance analysis results of vaginal maximum stress and maximum displacement

项目	最大应力/MPa					最大位移/mm				
	自由度	平方和	均方差	F	P	自由度	平方和	均方差	F	P
模型	2	0.598	0.299	9.33×10^7	0	3	102.038	34.013	2385.11	0
W	1	0.528	0.527	16.5×10^7	0	1	88.835	88.835	6229.45	0
p	1	0.070	0.070	2.20×10^7	0	1	11.067	11.067	776.05	0
$W * p$	—	—	—	—	—	1	0.179	0.179	12.52	0.017
误差	6	0	0	—	—	5	0.071	0.006	—	—
合计	8	0.598	—	—	—	8	100.152	—	—	—

方差分析结果表明:①最大应力预测模型的 F 值大于 $F_{0.05}(6, 2) = 19.3295$ 且 $P < 0.05$,最大位移预测模型的 F 值远大于 $F_{0.05}(5, 3) = 9.0135$ 且 $P < 0.05$,说明两个预测模型比较显著。其中, R^2 表示回归模型与仿真数据的吻合度,最大应力预测模

2.2 子宫载荷同时变化对韧带和阴道的影响

为了获得腹压和子宫重量同时增大时阔、圆韧带和阴道的应力和变形分布,进行正交模拟仿真试验,并记录各部位的最大应力和最大位移。仿真试验结果如表1所示。

分析,利用二次数学回归方法^[17]建立其预测模型:

$$y' = y - \varepsilon = \beta_0 + \sum_{i=1}^2 \beta_i x_i + \sum_{i=1}^2 \sum_{j=i+1}^2 \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^2 \beta_{ii} x_i^2 \quad (1)$$

式中: y' 为目标估计值; x_i 为影响因素; ε 为仿真误差; β 为模型系数。

本文以阴道为例进行说明。阴道最大应力和最大位移的方差分析结果(置信系数为0.05)如表2所示。

型的 R^2 和 $R^2(\text{adj})$ 均为100%,最大位移预测模型的 R^2 和 $R^2(\text{adj})$ 分别为99.93%和99.89%,两个预测模型的 $R^2(\text{adj})$ 均不小于99.89%,表明模型与仿真数据吻合度很好,并且 R^2 和 $R^2(\text{adj})$ 非常接近,表明模型非常可靠,可以用来预测阴道的最大应力

和最大位移。② 最大应力模型各项 $F > 19.3295$ 且 $P < 0.05$, 最大位移模型各项 $F > 9.0135$ 且 $P < 0.05$, 说明所对应项对预测目标的影响显著, 并且 F 值越大影响程度也越大。据此可知, 子宫重量对阴道应力或位移的影响程度大于腹压。根据表 2 中的方差分析结果, 可得到如下腹压和子宫重量同时作用时阴道最大应力和最大位移的回归预测模型:

$$S_v = -0.000101 + 0.148225W + 0.019464p \quad (2)$$

$$U_v = -0.502 + 2.1537W + 0.3008p - 0.01897Wp \quad (3)$$

3 讨论

我国宫颈癌的发病率逐年增长且呈现年轻化趋势, 许多婚育年龄的宫颈癌患者有强烈的保留生育功能的愿望, 故而广泛性宫颈切除术应运而生并应用于临床。广泛性宫颈切除术会切除了对子宫起重要支持作用的骶、主韧带(顶端支持), 并将阴道断面与宫颈断面缝合, 不仅影响子宫的生物力学稳定性, 还会导致子宫韧带和阴道应力分布和形状的改变。因此, 本文通过有限元法对广泛性宫颈切除术后子宫载荷变化时阔、圆韧带和阴道应力和变形分布进行研究。本文所取腹压为最大Valsalva动作时腹压的不同水平, 所选子宫重量代表初、中和晚孕期时的子宫重量。结果表明, 随着腹压增大和子宫重量增加, 广泛性宫颈切除术后阔、圆韧带和阴道的应力和变形也会相应增加, 韧带和阴道损伤的可能性也会增加, 使得子宫或阴道脱垂的可能性增大, 从而引起盆底功能障碍性疾病。

本文通过有限元法研究广泛性宫颈切除术后子宫载荷单独或同时变化时子宫韧带和阴道的应力和变形分布, 结果表明:

(1) 广泛性宫颈切除术对子宫韧带的应力和变形有直接影响。依据整体理论可知, 女性盆底是一个由骨骼、结缔组织、器官所组成的相互关联的整体^[18]。其中, 盆腔器官生物力学稳定性(正常生理位置和功能)的维持依赖于盆底支持组织(肌肉、筋膜和韧带等)的复杂平衡, 盆腔器官支持组织的退化或损伤等可导致其生物力学特性的变化, 进而影响盆腔器官的生物力学稳定性。广泛性子宫

颈切除手术切除宫颈、阴道穹窿并切开骶、主韧带, 导致宫体及阔、圆韧带和相连的阴道应力和位移发生变化。与广泛性宫颈切除术前相比^[19], 相同载荷情况下, 术后阔韧带的最大应力和最大位移分别为术前的 2.24 倍和 1.05 倍, 圆韧带的最大应力和最大位移分别为术前的 1.23 倍和 1.26 倍。由此可见, 广泛性宫颈切除术后阔韧带和圆韧带对子宫的支持作用均有不同程度的增强。

(2) 子宫载荷增加均会引起子宫韧带和阴道的变形。在做Valsalva动作时, 阔韧带的应力和变形主要分布于中下部, 最大应力和最大位移对应地主要集中于下部区域, 而妊娠期子宫重量增加时, 阔韧带的应力和变形主要分布于中上部, 最大应力和最大位移也相应地集中于上部区域。由此可见, 阔韧带的变形和应力分布因载荷类型而不同。本文推测, 两种载荷引起宫体移动方向的差异, 腹压作用时为前下(膀胱侧), 而子宫重量增加时为后下(直肠侧)。然而, 圆韧带和阴道的应力与变形分布基本不变。圆韧带的变形和应力主要分布于中下部, 最大应力和最大位移集中于与宫体连接处, 而阴道的应力和变形主要分布于中上部, 最大应力和最大位移集中于阴道后壁上部区域, 并可利用式(2)、(3)进行阴道应力和位移的预测。子宫韧带应力和变形的预测方法类似, 这可为广泛性宫颈切除术后子宫脱垂的手术方案制定和优化提供力学依据和数据支持。本文还发现, 腹压和子宫重量同时增加时, 阔、圆韧带和阴道的应力和变形均随之增大, 并且子宫重量比腹压对韧带和阴道的影 响程度显著, 这一结果与妊娠是POP发生的危险因素而腹压可能诱发或加重POP相符合^[20]。

(3) 子宫韧带和阴道对子宫载荷的变化均比较敏感。广泛性宫颈切除术后, 在相同载荷条件下, 阴道所受应力及对载荷变化的敏感度最大, 阔韧带位移及对载荷变化的敏感度最大, 各部位总的应力和变形排序因载荷情况而略有差异。本文发现, 相同载荷条件下, 未行广泛性宫颈切除术时宫骶韧带应力及对载荷变化的敏感度最大, 这与广泛性宫颈切除术后明显不同^[19]。由此可见, 广泛性宫颈切除术后缝合到宫颈的阴道代替骶、主韧带的作用来维持子宫的生理位置, 印证了骶、主韧带垂直悬吊支持子宫及阴道上1/3的顶端支持是盆

底最为主要的支持力量^[4,11]。广泛性子宫切除术若发生子宫脱垂,进行术前评估时可参考式(3)确定阴道悬吊的矫正量,阔、圆韧带矫正量的确定方法类似。

4 结论

本文基于女性盆腔 MRI 图像构建子宫三维模型,参考 MRI 图像并按照阔、圆韧带和阴道的解剖结构及与子宫的相对位置进行韧带和阴道的三维建模,所建模型可靠性较高。广泛性子宫切除术对子宫韧带的应力和变形有直接影响,术后子宫载荷增大可引起阔、圆韧带和阴道上部较大的变形和应力,这是造成韧带和阴道损伤的原因之一,而盆底功能障碍性疾病发生的原因是相关支持组织损伤或松弛导致的解剖结构改变^[18]。因此,本文结果可为子宫脱垂机制的研究提供力学依据,也为术后子宫脱垂的手术方案制定和优化提供数据参考,以及为其他 POP 发生机制的研究提供方法借鉴。本研究也存在一定的局限性:对阔、圆韧带和阴道的形态结构进行一定简化,没有考虑直肠阴道隔和膀胱阴道隔对阴道的支持作用以及子宫重量变化时体积的改变,后续研究将在这些方面进行改进,以期对子宫脱垂的发病机制和临床治疗提供更多更加可靠的数据。

参考文献:

[1] ROY R. Vaginal radical trachelectomy: An oncologically safe fertility-preserving surgery. An updated series of 72 cases and review of the literature [J]. *Gynecol Oncol*, 2004, 94(3): 614-623.

[2] MAKAR AP, TROPÉ C. Fertility preservation in gynecologic cancer [J]. *Acta Obstet Gn Scan*, 2015, 80(9): 794-802.

[3] 郎景和, 张晓东. 妇产科临床解剖学[M]. 2版. 济南: 山东科学技术出版社, 2020.

[4] DELANCEY J. Structural support of the urethra as it relates to stress urinary incontinence: The hammock hypothesis [J]. *Am J Obstet Gynecol*, 1994, 170(5): 1713-1723.

[5] RAMANAH R, BERGER MB, CHEN L, *et al*. See it in 3D!: Researchers examined structural links between the cardinal and uterosacral ligaments [J]. *Am J Obstet Gynecol*, 2012, 207(5): 437. e1-437. e7.

[6] CHEN L, RAMANAH R, HSU Y, *et al*. Cardinal and deep

uterosacral ligament lines of action: MRI based 3D technique development and preliminary findings in normal women [J]. *Int Urogynecol J*, 2013, 24(1): 37-45.

[7] 黄璐, 刘萍, 彭程, 等. 在体女性主韧带及宫骶韧带数字化三维模型构建及其意义 [J]. *中国实用妇科与产科杂志*, 2014, 30(6): 453-456.

[8] 杨晓红, 徐惠成, 陈伟, 等. 子宫脱垂患者骶主韧带 MR 三维重建模型的研究 [J]. *第三军医大学学报*, 2012, 34(6): 546-550.

[9] LUO J, BETSCHART C, CHEN L, *et al*. Using stress MRI to analyze the 3D changes in apical ligament geometry from rest to maximal Valsalva: A pilot study [J]. *Int Urogynecol J*, 2014, 25(2): 197-203.

[10] 陈倩倩. 子宫附属韧带维持子宫正常位置的有限元仿真研究 [D]. 上海: 复旦大学, 2014.

[11] 马辛欣, 尚诗瑶, 谢冰, 等. 有限元模型仿真计算不同工况下宫骶韧带和主韧带的应力分布及变形状况 [J]. *中华妇产科杂志*, 2016, 51(2): 114-119.

[12] 姜文轩, 陈春林, 刘萍, 等. 广泛性子宫切除术后台盆器官位置改变的静动态 MRI 评估 [J]. *中华妇产科杂志*, 2020, 55(6): 408-411.

[13] 蒋静雯. 数字技术对子宫圆韧带形态学研究 [D]. 石家庄: 河北医科大学, 2017.

[14] 谢幸, 孔北华, 段涛, 等. 妇产科学 [M]. 9版. 北京: 人民卫生出版社, 2018.

[15] CHEN L, ASHTON-MILLER JA, DELANCEY J. A 3D finite element model of anterior vaginal wall support to evaluate mechanisms underlying cystocele formation [J]. *J Biomech*, 2009, 42(10): 1371-1377.

[16] DELANCEY J, MORGAN DM, FENNER DE, *et al*. Comparison of levator ani muscle defects and function in women with and without pelvic organ prolapse [J]. *Obstet Gyn*, 2007, 109(2 Pt 1): 295-302.

[17] KUMAR A, KUMAR V, KUMAR J. Multi-response optimization of process parameters based on response surface methodology for pure titanium using WEDM process [J]. *Int J Adv Manuf Tech*, 2013, 68(9-12): 2645-2668.

[18] PETROS PP. 罗来敏, 译. 女性骨盆底: 基于整体理论的功能、功能障碍及治疗 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2007.

[19] 陈家兰, 邓卓, 沈鑫, 等. 腹压和子宫重量对子宫韧带影响的有限元仿真研究 [J]. *医用生物力学*, 2022, 37(6): 1127-1132.

CHEN JL, DENG Z, SHEN X, *et al*. The influence of abdominal pressure and uterine weight on uterine ligaments by finite element simulation [J]. *J Med Biomech*, 2022, 37(6): 1127-1132.

[20] MIEDEL A, TEGERSTEDT G, MÆHLE-SCHMIDT M, *et al*. Nonobstetric risk factors for symptomatic pelvic organ prolapse [J]. *Obstet Gyn*, 2009, 113(5): 1089-1097.