

文章编号: 1004-7220(2024)02-0332-07

建立基于 CT 影像的胆囊体积计算方法及其运动功能分析

郭佳雯¹, 宋成利¹, 顾倩芸¹, 王波², 蒋兆彦², 胡海²

(1. 上海理工大学 健康科学与工程学院, 上海 200093; 2. 同济大学附属东方医院 胆石中心, 上海 200120)

摘要:目的 评价基于 CT 影像三维重建胆囊体积计算方法的准确性, 并研究胆囊运动中的生物力学变化, 探索胆囊动力学变化与胆结石形成的关系。方法 提出一种基于 CT 影像三维重建胆囊模型来计算胆囊体积的方法, 并与椭球体法进行比较; 构建胆囊有限元模型并进行流体力学分析, 模拟胆囊出口胆囊管与胆总管汇合不同角度下及伴有结石状态下的胆囊运动功能变化。结果 比较 50 位患者的特异性胆囊模型体积和椭球体法体积, 对应平均误差分别为 7.26% 和 25.35%。梨形胆囊再充盈期最大压力、最大变形和最大流速都明显大于葫芦形胆囊。胆囊管与胆总管之间的夹角对胆汁流型影响不大, 夹角为 120° 时胆汁流速最大。伴有结石胆囊的胆汁流速小于无结石胆囊, 且在结石附近产生漩涡。结论 基于 CT 影像三维重建计算胆囊体积较传统椭球体法更准确。相对于梨形胆囊, 葫芦形胆囊的胆囊壁收缩和胆汁流速较小, 运动功能差。伴结石胆囊的胆汁流速较慢, 更易导致结石增大或新结石形成。

关键词: 胆囊; 胆结石; 体积计算; 胆汁流速; 有限元分析

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2024.02.021

Establishment of Gallbladder Volume Calculation Method and Analysis of Motor Function Based on CT Images

GUO Jiawen¹, SONG Chengli¹, GU Qianyun¹, WANG Bo², JIANG Zhaoyan², HU Hai²

(1. School of Health Science and Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. Gallstone Center, Dongfang Hospital Affiliated to Tongji University, Shanghai 200120, China)

Abstract: Objective To evaluate the accuracy of three-dimensional (3D) reconstruction of the gallbladder volume based on computed tomography (CT) images and study the biomechanical changes in gallbladder motility to explore the relationship between gallbladder dynamics and gallstone formation. **Methods** A method for calculating gallbladder volume based on CT 3D reconstruction of The gallbladder model was proposed and compared with the ellipsoid method. A finite element model of the gallbladder was constructed for fluid dynamics analysis to simulate changes in gallbladder motor function under different angles of convergence between the cystic and common bile ducts and in the presence of gallstones. **Results** The mean errors of the specific gallbladder model volume and ellipsoid volume of the 50 patients were 7.26% and 25.35%, respectively. During the refilling period, the maximum pressure, deformation, and flow velocity of the pear-shaped gallbladder were significantly higher than those of the gourd-shaped gallbladder. The angle between the gallbladder and common bile duct had little effect on the bile flow pattern, and the maximum bile flow rate was reached at an angle of 120°. The bile flow velocity of the gallbladder with calculus was lower than that of the gallbladder without calculus, and

收稿日期: 2023-09-19; 修回日期: 2023-10-25

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51735003)

通信作者: 宋成利, 教授, 博士生导师, E-mail: csong@usst.edu.cn

there was a vortex near the calculus. **Conclusions** Calculating gallbladder volume based on CT 3D reconstruction is more accurate than the ellipsoid method. Compared with a pear-shaped gallbladder, a gourd-shaped gallbladder has lower gallbladder wall contraction, bile flow rate, and poor motor function. The bile flow rate in the gallbladder is slow, which is more likely to lead to the enlargement of gallstones or the formation of new gallstones.

Key words: gallbladder; gallstone; volume calculation; bile velocity; finite element analysis

胆囊是贮存和浓缩胆汁的囊状器官,能够调节胆管内外压力,是人体消化系统的重要组成部分。胆囊收缩排空功能障碍可影响人体消化功能,并增加胆囊疾病的发生率^[1]。中国经济发达地区胆囊疾病的发病率已达到 10%~12%^[2]。研究显示,胆囊运动功能障碍是胆囊结石形成的重要因素,而胆囊结石也进一步影响胆囊功能^[3]。因此,对人体胆囊进行三维建模,研究胆囊的体积和运动功能变化,对评估胆囊功能具有十分重要的临床意义。

当前,利用 3D 建模软件进行医学图像分割和三维建模已是临床医生常用的方法之一^[4]。郭艳光等^[5]运用 CAD 软件,建立具有几何与物理相似性的胆囊三维交互式模型,模拟钳夹作用下胆囊应力与应变分布。Li 等^[6]建立了胆囊力学模型,分析胆汁排空行为、胆道内的流动阻力和峰值应力。Li 等^[7]建立了椭球形胆囊有限元模型,用 1 个封闭的解析解来预测胆囊排空过程中的三维应力分布。利用 CT 影像三维重建的方法也广泛应用在肝胆外科等临床医学领域。范应方等^[8]对 4 例肝胆管结石患者 CT 影像中肝脏、胆道及胆结石进行三维重建,模拟不同手术方案。张斌等^[9]对 28 例胆囊癌患者腹部 CT 图像进行三维重建,在术前精准评估以指导术中精细操作。CT 影像能够提供高分辨率的图像,三维重建则将 CT 扫描的二维影像转化为直观的三维模型,辅助医学领域诊断分析病变、肿瘤和骨骼等细微结构,指导手术操作。

本文运用 Mimics 19.0 软件(Materialise 公司,比利时)对 CT 影像中胆囊部分进行分割,利用 Geomagic Studio(Geomagic 公司,美国)进行修复后处理,实现胆囊特异性三维重建。提出一种基于 CT 影像计算胆囊体积的方法,并与椭球体法进行比较。将胆囊模型导入 ANSYS 19.2(ANSYS 公司,美国)构建不同形状胆囊有限元模型,模拟胆囊壁受

力情况和结石对胆汁流速的影响,为胆囊疾病的临床研究与治疗提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 胆囊模型建立

CT 断层图像数据集来源于上海市东方医院的 50 位患者。该数据集为每位患者空腹条件下的 200~500 个连续腹部 CT 断层影像,断面间隔为 1.0 mm。

首先,将获得的胆囊 CT 影像数据集导入 Mimics 软件中,根据不同组织在图像中灰度不同,分割出胆囊部分,生成三维实体模型[见图 1(a)]。其次,在 Geomagic Studio 软件中进行修复后处理,使胆囊模型更加贴合人体胆囊。人体健康胆囊壁厚一般在 1.0 mm 左右^[10],故将模型抽壳厚度设为 1.0 mm,形成空心胆囊模型。最后,将胆囊模型按照形状分为梨形、葫芦形胆囊,并以 IGS 格式保存模型,便于后续利用 SolidWorks 和 ANSYS 软件进行操作[见图 1(b)]。

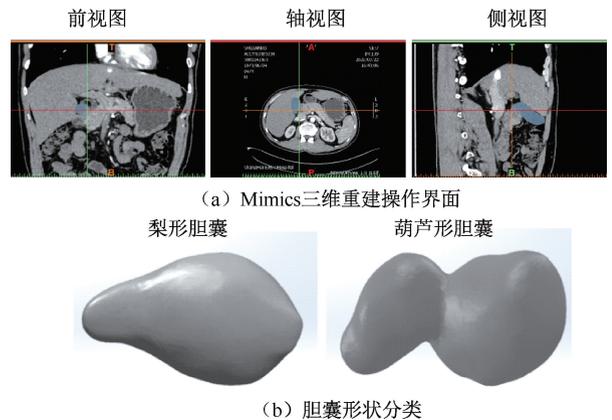


图 1 Mimics 三维重建操作界面与胆囊分类

Fig.1 Mimics 3D reconstruction interface and gallbladder classification (a) Mimics 3D reconstruction interface, (b) Classification of gallbladder shape

1.2 胆囊体积计算方法

胆囊体积是胆囊运动功能评估的一个重要指

标,其计算方法主要有圆柱体总和法(sum of cylinders, SOC)和椭球体法(ellipsoid, EL)。圆柱体总和法将胆囊三维影像沿纵向分割为等高厚片,并分别测量其横向直径作为圆柱体参数,利用下式计算胆囊体积^[11]:

$$V_{\text{SOC}} = \frac{\pi h E^2}{4} \sum_{i=1}^n d_i^2 \quad (1)$$

式中: V_{SOC} 为圆柱体总和法计算胆囊体积; h 为圆柱体高度; d 为圆柱体直径; E 为修正系数,

$$E = \frac{\text{投影直径} + \text{宽度}}{2} \times \frac{1}{\text{纵向投影上的最大直径}}$$

以修正胆囊弯曲引起的中心轴偏移影响。

椭球体法选取影像中胆囊的最大横截面和最大纵切面,测量其长径、宽径和纵高,利用下式进行计算^[12]:

$$V_{\text{EL}} = \frac{\pi}{6} LWH \quad (2)$$

式中: V_{EL} 为椭球体法计算胆囊体积; L 为胆囊最大长径; W 为最大短径; H 为最大纵高。

临床上一一般采用椭球体法来计算胆囊体积,由医生评估胆囊的长径、宽径和纵高,计算体积时易受主观因素影响,存在较大误差。圆柱体总和法相对复杂,具体操作比较繁琐。因此,本文提出一种基于CT影像计算胆囊体积的方法。首先,获得胆囊CT影像数据集,通过重建将其转化为可视化的胆囊三维模型;其次,将胆囊三维模型划分为有限个小的体素,其大小可以根据影像分辨率和模型复杂程度来调整,利用数值方法对每个体素进行体积积分;最后,将胆囊模型的所有体素体积累加,得到胆囊体积。

上述计算方法在临床医学影像方面有较大的应用前景。郭景仁等^[13]将实体分割为若干体素,对表面单元进行二次曲面拟合,采用积分方法计算实体体积:

$$A(w) = \frac{1}{2} \int_C (x dy - y dx) \quad (3)$$

$$V_{3D} = \sum V_i = \sum \int A(w) dw \quad (4)$$

式中: V_{3D} 为三维重建胆囊体积; V_i 为体素体积; w 为体素的位置信息; $A(w)$ 为在 w 位置处的截面积; C 为截面外部轮廓曲线。

在实际操作中,这一计算过程可以通过SolidWorks软件快速实现,降低了技术基础要求,使临床医生能够更加简单快捷地得到患者胆囊体积。

1.3 胆囊有限元模型

Chen等^[14]对形成结石的相关因素进行统计分析,发现结石的形成与胆管角度密切相关。因此,在临床医生的指导下,本文分别选择两例形状规整、易分辨的梨形和葫芦形胆囊模型,以IGS格式导入ANSYS软件中,进行网格剖分、材料属性赋值和边界条件定义,建立胆囊出口胆囊管与胆总管汇合角度不同的有限元模型,模拟再充盈期胆囊运动(见图2)。

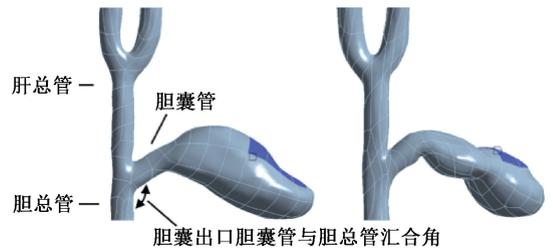


图2 胆囊有限元模型

Fig. 2 Finite element model of the gallbladder

1.3.1 胆汁流动模型 正常胆汁是典型的牛顿流体,各向同性,具有明显的黏弹性特征,其本构方程为:

$$\tau = -p\delta + 2\mu\gamma \quad (5)$$

式中: τ 为切应力张量; γ 为应变率张量; p 为静压; δ 为 Kronecker 张量^[15]。

由于压力梯度和流体结构的相互作用,胆汁在胆道内从胆囊流向十二指肠的过程可以用Windkessel模型来描述:

$$-\frac{dV}{dt} = Q \quad (6)$$

$$dV = C dp \quad (7)$$

$$Q = \frac{p - p_d}{R} \quad (8)$$

式中: Q 为流出胆囊的胆汁流量; V 为胆囊体积; C 为胆管体积; p 为胆囊压力; p_d 为十二指肠压力($p_d = 6.0 \text{ mmHg}$, $1 \text{ mmHg} = 0.133 \text{ kPa}$); R 为液压阻力^[16]。

1.3.2 网格划分与材料属性定义 利用ANSYS软件自动剖分网格功能,设置单元网格尺寸为 1.0 mm ,统计得梨形胆囊流体区域共 104 305 个节点,

542 485 个单元;葫芦形胆囊流体区域共 125 627 个节点,657 190 个单元。本文设置胆囊壁、结石、胆汁的密度均为 1.225 kg/m^3 ^[17];胆囊壁弹性模量为 500 kPa ^[6],泊松比 0.49 ^[6];胆汁黏度为 2.54 g/ms ^[15]。

1.3.3 边界条件 对梨形、葫芦形胆囊有限元模型进行仿真,模拟胆囊再充盈期胆汁流入的过程。流体区域中,设定进入左右肝管的胆汁流速为 3.0 mm/s ,胆总管下方入口十二指肠乳头压力为 1.0 kPa ^[16],胆汁经胆囊颈流入胆囊内部。固体区域中,胆囊壁厚为 1.0 mm ,胆囊壁两侧施加 0.8 kPa 压力^[18];同时,为了防止胆囊模型产生的空间刚体位移,在胆囊体底部设定固定约束,模拟胆囊固定在与肝脏相连处(见图 2)。

2 结果

2.1 胆囊体积计算与分析

首先,基于 50 位患者腹部 CT 影像数据,建立胆囊模型,并根据胆囊形态分为梨形和葫芦形胆囊。采用圆柱体总和法和椭球体法分别计算胆囊体积。圆柱体总和法是目前采用的胆囊简化体积测定“金标准”,而胆囊的真实体积无法在无创的条件下获得^[19]。因此,本文以 0.2 mm 切片的圆柱体总和法计算结果作为胆囊真实体积的参照标准,进而比较椭球体法和三维重建计算胆囊体积的准确性。

依据上述计算结果分析得到,所有胆囊模型体积都小于采用椭球体法计算的体积,大于采用圆柱体总和法计算的体积。以圆柱体总和法为标准,三维重建计算胆囊体积的误差为 7.26% ;其中,梨形胆囊体积的准确性为 $(105.40 \pm 4.38)\%$,葫芦形胆囊体积准确性为 $(109.11 \pm 7.90)\%$,平均误差分别为 5.40% 和 9.11% 。椭球体法计算胆囊体积的误差为 25.35% ;其中,梨形胆囊体积的准确性为 $(119.25 \pm 14.35)\%$,葫芦形胆囊体积准确性为 $(131.45 \pm 15.87)\%$,平均误差分别为 19.25% 和 31.45% 。椭球体法计算胆囊体积的误差明显大于三维重建计算胆囊模型体积的误差。由体积散点图可以看出,基于 CT 影像三维重建的胆囊模型体积与圆柱体总和法计算的胆囊真实体积更为接近(见图 3)。

2.2 胆囊形状与胆汁流速

图 4 为胆囊再充盈期梨形、葫芦形胆囊的压力

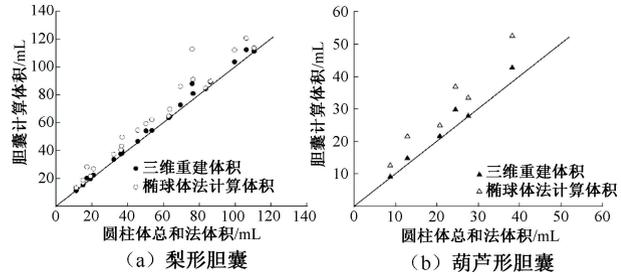


图 3 三维重建胆囊模型体积散点图

Fig. 3 Scatter plot of volume for 3D reconstructed gallbladder model (a) Pear-shaped gallbladder, (b) Gourd-shaped gallbladder

与变形分布情况。梨形胆囊最大变形出现在胆囊壁处,而葫芦形胆囊最大变形出现在胆总管下端,且梨形胆囊最大变形(8.22 mm)大于葫芦形胆囊最大变形(7.82 mm)。梨形胆囊再充盈期最大压力(71.62 kPa)明显大于葫芦形胆囊最大压力(36.07 kPa),其最大压力点都在胆囊壁处。

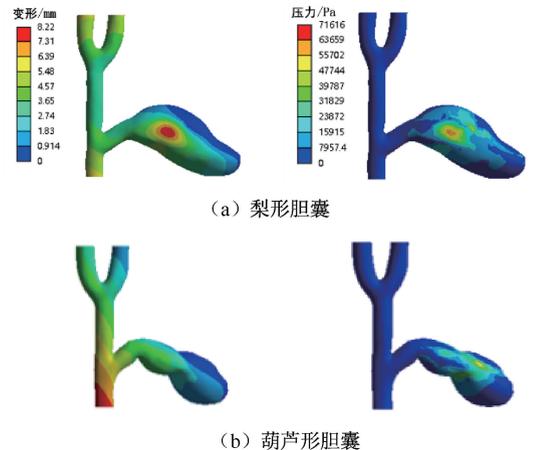


图 4 再充盈期胆囊压力与变形分布

Fig. 4 Distributions of gallbladder pressure and deformation during refilling period (a) Pear-shaped gallbladder, (b) Gourd-shaped gallbladder

分别建立梨形、葫芦形胆囊夹角 60° 、 90° 和 120° 模型,进行胆汁流速分析。结果显示,胆汁在胆囊内部均匀流动,梨形胆囊胆汁最大流速为 9.04 mm/s ,葫芦形胆囊胆汁最大流速为 8.73 mm/s 。胆囊出口胆囊管与胆总管汇合不同角度对胆汁流型影响不大,但对胆汁流速的影响较大。胆囊管与胆总管之间的夹角为 120° 时,胆汁最大流速明显大于 90° 和 60° 夹角,且最大流速都出现在肝总管处。其中,胆囊管与胆总管之间夹角 120° 的梨形胆囊最

大胆汁流速为 9.04 mm/s, 90° 夹角胆汁流速为 8.93 mm/s, 60° 夹角胆汁流速为 8.22 mm/s; 胆囊管与胆总管之间夹角 120° 的葫芦形胆囊最大胆汁流速为 8.73 mm/s, 90° 夹角胆汁流速为 7.71 mm/s, 60° 夹角胆汁流速为 7.14 mm/s (见图 5)。

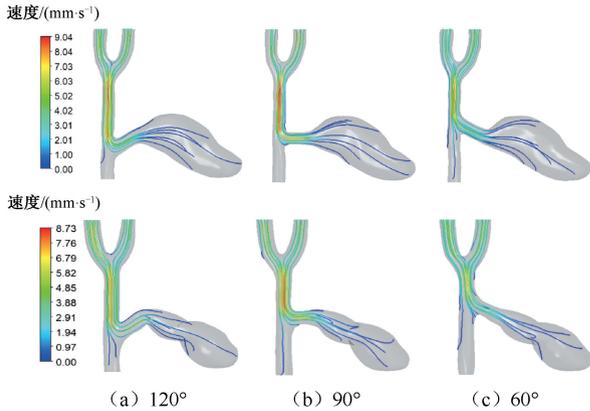


图 5 不同胆囊管与胆总管夹角胆囊再充盈期胆囊胆汁流速分布

Fig. 5 Distributions of bile flow velocity in the gallbladder with different angles between the cystic duct and the common bile duct during refilling period (a) 120° angle, (b) 90° angle, (c) 60° angle

2.3 伴有结石胆囊的胆汁流速

廖有谋^[20] 将结石按直径尺寸分为细小结石 (<3.0 mm)、小结石 (3.0 ~ 10.0 mm)、中等结石 (10.0 ~ 20.0 mm) 和大结石 (>20.0 mm)。因此, 在 SolidWorks 中分别绘制直径为 3.0、10.0、20.0 mm 的球体来模拟胆囊结石, 置于胆囊体中, 球体与胆囊模型无相交或装配关系。仿真结果表明, 结石的存在明显影响了胆汁的流动。伴有结石的梨形、葫芦形胆囊最大流速都小于正常胆囊的最大流速, 最大流速出现在肝总管处。在结石附近, 胆汁流型明显变化, 形成漩涡。伴有结石直径为 3.0 mm 的胆囊胆汁流速最大, 直径为 10.0 mm 的胆囊胆汁流速次之, 直径为 20.0 mm 流速最小。其中, 伴有 3.0、10.0、20.0 mm 结石的梨形胆囊最大胆汁流速分别为 8.93、8.72、8.51 mm/s; 伴有 3.0、10.0、20.0 mm 结石的葫芦形胆囊最大胆汁流速分别为 8.06、7.76、7.53 mm/s (见图 6)。

3 讨论

3.1 胆囊体积计算的准确性

胆囊体积是评估胆囊运动功能的重要指标。

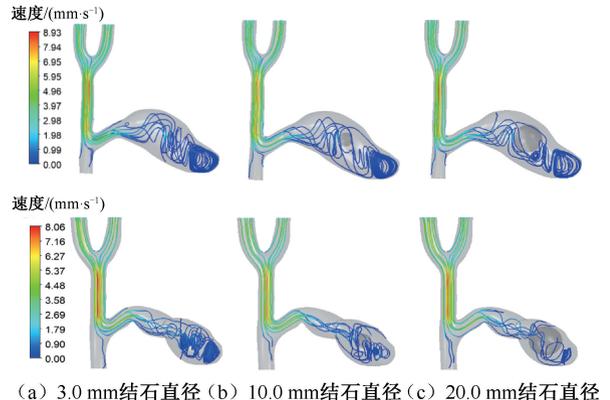


图 6 伴有不同直径结石胆囊再充盈期胆汁流速分布

Fig. 6 Distribution of bile flow velocity in the gallbladder with gallstones during refilling period (a) 3.0 mm gallstone diameter, (b) 10.0 mm gallstone diameter, (c) 20.0 mm gallstone diameter

圆柱体总和法比较繁琐、费时, 临床很少应用; 椭球体法应用简单, 但其测量不够准确^[19]。本文结果表明, 三维重建胆囊模型计算体积的方法平均误差为 7.26%, 明显小于椭球体法, 且梨形胆囊误差小于葫芦形胆囊误差, 这可能是由胆囊形状复杂程度导致。本方法充分考虑了胆囊的完整形态与其独特的曲线特征, 较圆柱体总和法更加简洁, 较椭球体法更加准确, 对临床诊断和监测胆囊疾病、评估胆囊功能和预测疾病风险具有重要意义。

但本方法仍存在一定的误差, 推测原因如下:

① Mimics 三维重建结果受到原始影像质量的限制, 原始 CT 影像中的噪声、伪影或图像不清晰等反映在重建后的胆囊模型上, 导致误差; ② Mimics 三维重建过程中需要设定阈值、平滑度和体素等参数, Geomagic 对模型进行修复时也需要设定去除钉状物、面片多少等参数, 不同的参数会导致重建结果出现主观误差。随着医学影像技术的发展和计算机软件的更新, 图像质量优化, 采用自动化和数字化技术调整参数, 基于 CT 影像三维重建的方法将更加准确。

3.2 胆囊形状对胆囊壁受力和胆汁流速的影响

等效应力与总变形能够体现胆囊壁肌肉的运动状态。本文发现, 梨形胆囊的压力集中区域和变形最大区域出现在胆囊体两侧, 胆囊管、胆总管和肝总管处压力和变形都较小, 胆囊外壁肌肉处于舒张状态。而葫芦形胆囊仿真结果出现了变形和压

力分离的现象,其最大压力出现在胆囊外壁,最大变形出现在胆总管下端(见图4)。

Luo 等^[21]研究发现,从力学角度来看,胆道系统可以被认为是一个“泵”系统。在这一系统中,胆囊提供胆汁流动的动力,其运动功能与胆道压降、胆汁流速和流动阻力关系密切。Mercadier 等^[22]进一步研究表明,形成结石的主要原因是胆汁淤积和胆道狭窄。Marks 等^[23]研究显示,较小的胆汁流速可能会造成胆汁淤积,胆汁内胆固醇成分饱和度改变,胆结石的形成是由胆汁中胆固醇饱和度增加引起。本文发现,胆囊压力和变形最大处都集中在胆囊体两侧,这也体现了胆囊运动的动力由胆囊体的收缩舒张来提供。葫芦形胆囊的压力与变形都小于梨形胆囊,其胆汁流速也较小,即葫芦形胆囊的“泵”功能减弱,相对于梨形胆囊更易形成胆结石。

胆管走行差异会导致胆汁流出阻力增加。曹亚文等^[24]研究发现,人体胆道系统中胆囊出口胆囊管与胆总管汇合夹角多为钝角,这与本文研究结果一致。胆囊管与胆总管的夹角为钝角时胆汁流速最大,说明钝角夹角在胆囊运动中会排出更多的胆汁,胆汁淤积的可能性就会减小,不易生成结石。

3.3 结石存在对胆汁流速的影响

张智惠等^[25]研究表明,成分异常胆汁易在胆囊底部形成漩涡区域,而漩涡导致的胆汁溶质向心性积聚是形成结石的原因之一。本文有限元结果表明,结石的存在明显改变了胆汁的流速和流型,伴有结石的胆汁流速明显小于无结石的胆汁流速,而胆汁流线在结石附近形成了漩涡,可能会导致结石生长或在附近形成新的结石。同时,伴有结石直径为 3.0 mm 的胆囊胆汁流速最大,且胆汁流速随结石尺寸增大而减小。本文认为,导致这一结果的主要原因如下:①较大尺寸的结石会阻塞胆汁流动,限制胆汁的流动;②较大尺寸的结石更容易引发胆囊炎症,从而造成胆囊收缩能力下降,胆汁流速变慢。

4 结论

本文建立了患者特异性胆囊模型,提出一种基于 CT 影像的胆囊体积计算方法,通过研究其生物力学变化,探究胆囊形状和结石对胆囊运动功能的影响。通过三维重建的胆囊模型体积明显比椭球体法计算体积更加准确,更接近患者真实胆囊体

积,可用于胆囊运动功能的临床诊断。相对于梨形胆囊,葫芦形胆囊的胆囊壁收缩和胆汁流速都较小,运动功能较差。另外,伴结石胆囊的胆汁流速较慢,更易导致结石增大或新结石形成。

后续的研究工作将获取更多患者的临床数据,扩大样本量,建立脂餐后胆囊模型,模拟排空期胆囊运动。同时,将胆囊三维模型与临床结合,使临床医生能够直观清晰地获取患者胆囊形态和胆汁流速等物理学信息,评估胆囊运动功能并选择合适的治疗手段。

利益冲突声明:无。

作者贡献声明:郭佳雯负责研究设计、数据分析及论文撰写;宋成利负责论文写作指导与修改和研究指导;顾倩芸、王波协助研究数据采集;蒋兆彦、胡海负责论文审阅及修改。

参考文献:

- [1] 张玲, 邹多武. 胆道动力障碍性疾病[J]. 胃肠病学和肝病学杂志, 2019, 28(4): 368-370.
- [2] 邹宁, 刘晓红. 胆囊运动功能不良[J]. 临床消化病杂志, 2003(2): 84-86.
- [3] JOSE B. Clinical aspects of gallbladder motor function and dysfunction [J]. *Curr Gastroenterol Rep*, 1999, 1(2): 91-94.
- [4] 苏奎, 赵若晗, 刘博强, 等. 基于 Mimics 的 CT 三维重建应用分析[J]. 软件, 2020, 41(3): 66-68.
- [5] 郭艳光, 吕毅, 缪骥, 等. 胆囊三维有限元力学模型的构建[J]. 第二军医大学学报, 2012, 33(9): 974-977.
- [6] LI WG, LUO XY, HILL NA, et al. Correlation of mechanical factors and gallbladder pain [J]. *Comput Math Method M*, 2008, 9(1): 27-45.
- [7] LI WG, LUO XY, HILL NA, et al. A mechanical model for CCK-induced acalculous gallbladder pain [J]. *Ann Biomed Eng*, 2011, 39(2): 786-800.
- [8] 范应方, 项楠, 方驰华. 基于 MI-3DVS 的数字化微创技术在肝胆管结石诊治中的应用[J]. 南方医科大学学报, 2011, 31(10): 1669-1674.
- [9] 张斌, 刘进, 曹宽, 等. CT 影像三维重建在胆囊癌根治性切除中的应用研究[J]. 现代医药卫生, 2020, 36(24): 3972-3974.
- [10] LI WG, HILL NA, OGDEN RW, et al. Anisotropic behaviour of human gallbladder walls [J]. *J Mech Behav Biomed Mater*, 2013(20): 363-375.
- [11] EVERSON GT, BRAVERMAN DZ, JOHSON ML, et al. A critical evaluation of real-time ultrasonography for the

- study of gallbladder volume and contraction [J]. *Gastroenterology*, 1980, 79(1): 40-46.
- [12] WYLIE JD, WILLIAM JG, REDA MA, *et al.* Sonographic measurement of gallbladder volume [J]. *Am J Roentgenol*, 1985, 145(5): 1009-1011.
- [13] 郭景仁, 王艳林, 于蕾. 基于三维激光扫描数据的不规则实体表面积和体积计算方法[J]. *山东理工大学学报(自然科学版)*, 2014(6): 73-78.
- [14] CHEN GY, WU J, XIAO L, *et al.* Right posteroinferior bile duct angulation correlates with bile duct stone occurrence in patients with hepatolithiasis [J]. *Abdom Radiol*, 2020, 45(10): 3103-3108.
- [15] 危小燕, 杨瑞芳, 吴云鹏. 胆汁流变特性与分类及本构方程[J]. *重庆大学学报(自然科学版)*, 1992(5): 17-24.
- [16] KUCHUMOV AG, KAMALTDINOV MR, SAMARTSEV VA, *et al.* Patient-specific simulation of a gallbladder refilling based on MRI and ultrasound *in vivo* measurements [C]// *Proceedings of Russian Conference on Mathematical Modelling in Natural Sciences*. Perm: AIP Publishing LLC, 2020.
- [17] 洪治国, 李杨, 程卓鑫. 胆囊结石患者并发胆总管结石的术前预测研究现状[J]. *微量元素与健康研究*, 2023, 40(3): 65-68.
- [18] 王冰, 蔡爱露, 刘守君, 等. 三维超声测定胆囊容积效果的评价[J]. *中华超声影像学杂志*, 2002(9): 54-55.
- [19] LI WG. Ultrasound image based human gallbladder 3D modelling along with volume and stress level assessment [J]. *J Med Biol Eng*, 2020, 40(1): 112-127.
- [20] 廖有谋. 胆囊的细小结石[J]. *国外医学. 外科学分册*, 1984(2): 106-107.
- [21] LUO XY, LI WG, BIRD N, *et al.* On the mechanical behavior of the human biliary system [J]. *World J Gastroenterol*, 2007, 13(9): 1384-1392.
- [22] MERCADIER M, FINGERHUT A. Strictures of the intrahepatic bile ducts [J]. *World J Surg*, 1984, 8(1): 15-21.
- [23] MARKS JW, BONORRIS GG, SCHOENFIELD LJ. Effects of ursodiol or ibuprofen on contraction of gallbladder and bile among obese patients during weight loss [J]. *Digest Dis Sci*, 1996, 41(2): 242-249.
- [24] 曹亚文, 李恩泽, 王平, 等. 基于三维可视化技术的肝胆管角度与VI段胆管结石形成的相关研究[J]. *中华肝胆外科杂志*, 2022, 28(3): 181-184.
- [25] 张智惠, 宋成利, 张凯, 等. 胆囊三维建模与运动功能分析[J]. *医用生物力学*, 2022, 37(6): 1133-1137.
- ZHANG ZH, SONG CL, ZHANG K, *et al.* Three-dimensional modeling and motor function of gallbladder [J]. *J Med Biomech*, 2022, 37(6): 1133-1137.