

## ·综述 General review·

## 孤立性肠系膜上动脉夹层血流动力学数值模拟研究进展

梅峻豪, 余海洋, 秦立昊, 朴则宇, 张嘉伟, 贾中芝

**【摘要】** 孤立性肠系膜上动脉夹层(ISMAD)在临床上并不少见。ISMAD 易导致急性肠缺血甚至肠坏死。ISMAD 发病、转归、预后与肠系膜上动脉(SMA)形态学特征、SMA 内血流变化等诸多因素有关,均可引起 SMA 内血流动力学改变。近年来计算流体力学(CFD)逐渐应用于 ISMAD 研究,进一步证实 ISMAD 与其局部流体力学因素相关。因此,利用 CFD 技术对 ISMAD 血流动力学特性进行数值模拟,有助于了解 ISMAD 发病、发展及预后的生理和病理机制。本文就 ISMAD 血流动力学数值模拟研究进展做一综述。

**【关键词】** 肠系膜上动脉;夹层;血流动力学;数值模拟

中图分类号:R543.1 文献标志码:A 文章编号:1008-794X(2023)-05-0503-05

**Research progress in numerical simulation of hemodynamics of isolated superior mesenteric artery dissection** MEI Junhao, YU Haiyang, QIN Lihao, PIAO Zeyu, ZHANG Jiawei, JIA Zhongzhi. Department of Interventional and Vascular Surgery, Affiliated Changzhou No.2 People's Hospital of Nanjing Medical University, Changzhou, Jiangsu Province 213003, China

Corresponding author: JIA Zhongzhi, E-mail: jiazhongzhi.1998@163.com

**【Abstract】** Clinically, isolated superior mesenteric artery dissection (ISMAD) is not rarely seen. ISMAD can induce acute intestinal ischemia or even intestinal necrosis. The onset, outcome and prognosis of ISMAD are related to the morphological characteristics of superior mesenteric artery (SMA) and the changes of blood flow in SMA and many other factors, all of which can cause the changes of hemodynamics in SMA. In recent years, computational fluid dynamics (CFD) has been gradually applied to the study of ISMAD, which further confirmed that certain correlations exist between ISMAD and its local fluid dynamics factors. Therefore, numerical simulation of the hemodynamic characteristics of ISMAD by using CFD technique is helpful for further understanding the physiological and pathological mechanisms of the pathogenesis, development and prognosis of ISMAD. This paper aims to make a detailed review about the research progress in numerical simulation of ISMAD hemodynamics. (J Intervent Radiol, 2023, 32: 503-507)

**【Key words】** superior mesenteric artery; dissection; hemodynamics; numerical simulation

计算流体力学(computational fluid dynamics,CFD)是利用电子计算机和离散化数值方法对流体力学问题进行数值模拟和分析,近年来已逐渐应用于动脉性疾病如主动脉夹层、主动脉瘤等血流动力学研究。孤立性肠系膜上动脉夹层(isolated superior mesenteric artery dissection,ISMAD)可引起急性肠

缺血、肠坏死,其发生发展与自身局部血流动力学密切相关,利用 CFD 方法对其血流动力学进行数值模拟研究,有助于深入了解这一过程。本文就 CFD 模拟肠系膜上动脉(superior mesenteric artery, SMA)方法、CFD 在 ISMAD 研究中的应用及其影响因素等研究进展做一综述。

DOI:10.3969/j.issn.1008-794X.2023.05.019

基金项目:常州市政府引导类计划(国际科技合作/港澳台科技合作)项目(CZ20220029),南京医科大学常州医学中心临床研究项目(CMCC202206),江苏省常州市科技计划(应用基础研究)项目(CJ20210108),江苏省医学会科研专项资金项目(SYH-3201140-0030-2021025)

作者单位:213003 江苏常州 南京医科大学附属常州第二人民医院介入血管科

通信作者:贾中芝 E-mail: jiazhongzhi.1998@163.com

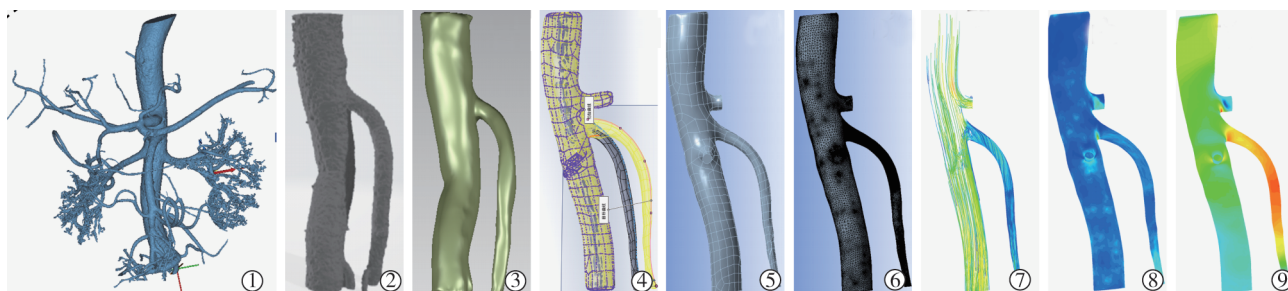
## 1 CFD 模拟肠系膜上动脉。

CFD 模拟 SMA 的主要步骤：①采集 CTA/MRA 成像中 SMA 数据，并通过医学数字成像和通信 (DICOM) 格式获取。②三维模型提取与创建。采用 Mimics、3D-Slicer 等医学影像三维重建软件，选取合适的灰度值、阈值提取目标流域；经阈值分割、区域增长及手动编辑提取感兴趣区域；利用三维运算功能将分割提取的二维断面连接，构建出初步的三维 SMA 模型。③模型修复与优化。由于 CFD 模拟对模型质量要求较高，需要对初始 SMA 模型进一步优化：将初始模型导入 Geomagic、3-Matic、Geomagic Design X 等修复软件，在固定边界条件下进行模型表面光滑处理（确保不改变初始模型主体形态前提下尽可能去除对分析结果无影响的不规则细节及血管分支，探测并填充模型内部孔洞等），使计算易于收敛。④模型再设计。根据研究需要，对完成优化的 SMA 模型进行变形处理及血管壁构建。通过以上步骤完成的基础模型为患者个性化流域 SMA 模型，为满足多样研究需求，可采用 3-Matic、Solid Works 等软件对基础模型进行编辑与再创造。此外，单一流域模型无法满足对 SMA 血管壁受力情况深入分析，需进一步完成血管壁模型构建、材料属性赋予及单向和双向流固耦合技术的选择应用。⑤模型网格划分。优化后的三维立体 SMA 模型导入 Hypermesh、ICEM-CFD 等网格划分软件，将模型划分为一定参数的多面体网格；定义模型出口平面、入口平面、管壁等面组；为获得最适网格密度，行网格无关性测试，以保证前后两次生成的网格数量下模拟结果误差 < 5%；将网格划分完成的模型设置为流体力学求解器可识别的 Mesh 网格文件。⑥条件设置及仿真计算。将 SMA 网格化模型导入有限元分析软件 Abaqus 等，检查网格，确定计算单位，定义流动方程、流体参数、边界条件加载，进行初始

化。经过多个周期迭代运算，获得研究需要的 SMA 血流动力学参数。⑦模拟结果后处理。采用 CFD-POST 等软件对模拟结果进行后处理分析。最后，结合医学理论讨论各区域血流动力学参数分布情况，进一步推测 ISMAD 形成的血流动力学因素。SMA 血管模型构建及血流动力学数值模拟流程见图 1。

## 2 CFD 在 ISMAD 研究中的应用

CFD 技术在循环系统疾病研究中广泛应用<sup>[1-4]</sup>。许多研究证实，血流动力学因素如压力、流速及壁面剪切力 (WSS) 等在循环系统疾病发病过程中发挥重要作用<sup>[5-10]</sup>。近年来，CFD 逐渐应用于 ISMAD 研究。2007 年，Jeays 等<sup>[11]</sup>基于 CFD 技术研究 SMA 内血流动力学特点，得到了 WSS、振荡剪切指数 (OSI) 等血流动力学参数分布情况；认为 SMA 刚性血管壁对内部血流状态影响较小，足够满足研究需要。2011 年，Park 等<sup>[12]</sup>首次应用 CFD 探讨 ISAMD 发病机制，通过 CFD 模型证实 SMA 近段存在血流动力学异常，即 SMA 起始部位凸面前壁存在异常机械应力；模拟 3 种 SMA-AA 夹角并测试血管内流线模式和 WSS 分布，初步证实 ISMAD 发病与 SMA 凸面前壁血流动力学异常相关。2017 年，Wu 等<sup>[13]</sup>进一步研究 SMA-AA 夹角在 ISMAD 发病中的意义，首次在超声测量边界条件下对 ISMAD 患者特异性模型进行流体分析和流固耦合研究，观察 SMA-AA 夹角 4 个角度各区间内血流流型和血管壁荷载分布，结果证实患者 SMA-AA 夹角均大于正常对照组，且 SMA 起始部位凸面前壁流速、OSI、WSS 等参数随 SMA-AA 夹角增大而增大。2020 年，王成等<sup>[14]</sup>应用 CFD 数值模拟法对比 30 例保守治疗与血管内介入治疗 ISMAD 患者前后个性化 SMA 模型内血流动力学参数变化，结果发现患者假腔内均有异常低 WSS 分布，并指出低 WSS 与假腔血栓化进程相关。这对 ISMAD 预后及治疗方案选择提供了



①三维 SMA 模型提取与创建，修复与优化；②构建 SMA-腹主动脉(AA)初步模型；③初步模型光滑处理；④根据研究需求，对模型进行变形再设计、模型网格划分；⑤模型表面面片创建；⑥模型体网格生成、计算仿真与结果后处理；⑦模型血流流线图；⑧壁面剪切力(WSS)分布图；⑨压强分布图

图 1 SMA 模型构建及血流动力学数值模拟流程图

预测和指导。

虽然 Jeays 等<sup>[11]</sup>首次将 CFD 技术应用于 SMA,但由于血管壁为刚性,无法实现血流与血管壁双向耦合。Park 等<sup>[12]</sup>首次将 CFD 应用于 ISMAD 疾病研究,但所应用模型缺乏仿真性,无法真实模拟 SMA 形态,且可观测数据有限,无法对 SMA 内众多参数进行综合分析。虽然 Wu 等<sup>[13]</sup>首次应用 Mimics 软件抽取 SMA 仿真模型各参数,并尽可能还原 SMA 形态特征,结合流固耦合技术对其局部血流动力学参数进行动态分析,但未能模拟出循环系统中由波传导引起的血管壁可变形性。王成等<sup>[14]</sup>基于 CFD 技术探讨 ISMAD 转归,但观测指标仍有限,未能对假腔内血流动力学变化进行深入研究。因此,CFD 技术在 ISMAD 疾病中的应用仍处于起始阶段,需要全面深入研究。

### 3 影响 CFD 在 ISMAD 研究中应用的因素

多种因素,如高血压、血液黏度、血流方式、SMA-AA 夹角、SMA 直径、血管壁材料特性、SMA 特殊解剖结构等对 ISMAD 血流动力学数值模拟产生一定影响。

#### 3.1 高血压

研究证实,WSS 是导致动脉内膜撕裂的始动因素<sup>[12]</sup>。高血压会在一定程度上影响 WSS。高血压引起红细胞变形性降低,使之更易聚集成串成团,导致血流阻力增加、流速减慢,形成血管内持续低 WSS 区域;长期低 WSS 状态会促进内皮细胞重构,导致上皮细胞间隙破坏,抗氧化与抗炎介质调节失调<sup>[15]</sup>。这可能是 SMA 内膜撕裂与夹层形成的病理基础。因此,设置流体初始黏度、模型入口速度及出口压强时,应充分考虑高血压患者特异性表现,导入个性化初始条件,以获得更真实可靠的 SMA 内血流动力学参数。

#### 3.2 血液黏度

血液黏度与 WSS、血流流动方式及壁面压力等密切相关。当黏度较高的血流进入分支血管时,局部垂直作用于血管壁面的压力明显升高,并在血管内膜形成高壁面压力分布区域,这可能进一步导致血管壁内陷,加剧内膜破裂,最终增加夹层形成风险。因此,在设置初始化条件时,应结合 ISMAD 患者基础疾病及全身情况,选择最接近的流体黏度值导入计算,从而高度仿真模拟真实 ISMAD 发病情况。

#### 3.3 血流方式

血流方式依据雷诺数大小分为湍流、层流等。

CFD 中流体流动方式由不同流体方程表示,其选择对血管内流体运动及管壁受力方式至关重要。既往血流模拟研究中,SMA 开口附近存在涡流<sup>[12]</sup>。此处涡流在 SMA 开口部位产生高 OSI 区,OSI 值高低体现流体流动方向与强度变化,高 OSI 表示局部 WSS 方向及大小变化较大<sup>[10]</sup>。因此,SMA 开口局部 OSI 上升,WSS 方向急剧改变,此处内膜所受切应力也随之增高;SMA 起始段内回流、涡流及二次流产生,这种局部紊乱血流对动脉内膜稳定性产生极大影响<sup>[12]</sup>;局部高 OSI 刺激还可能触发炎症细胞介导的破坏-重塑过程<sup>[16]</sup>。这些不稳定性血流动力学因素与夹层发生及进展密切相关<sup>[17]</sup>,因此在设置流动方式时应充分了解各方程的模拟计算特点,以便选择能真实反映人体 SMA 内血流状态的方程。

#### 3.4 SMA-AA 夹角

研究表明,动脉形态学特征与夹层形成及预后均有密切关系<sup>[18-19]</sup>。ISMAD 内膜撕裂口通常位于 SMA 起始弯折部位<sup>[20]</sup>。从流体力学角度分析,血管发出分支部位内侧常出现高壁面压力和 WSS 分布<sup>[21]</sup>。壁面压力和 WSS 变化剧烈程度与 SMA-AA 夹角密切相关<sup>[22]</sup>。SMA-AA 夹角较小( $<57^\circ$ )时,血流自 AA 进入 SMA 较为平顺,此时较大 WSS 作用于 SMA 下弯部后壁,该区域不易发生内膜撕裂;夹角较大( $>85^\circ$ )时,分叉处血流需明显改变方向,此时 SMA 凸面前壁所受 WSS 增大<sup>[12]</sup>,其分布与夹层形成高风险部位一致。分析 ISMAD 数据时,应充分考虑 SMA-AA 夹角和 SMA 生理弯折角度(弧度)形态学特点对 ISMAD 血流动力学的影响。

#### 3.5 SMA 直径

血流进入直径较小血管分支时,分支内 WSS 升高。有研究证实,长期处于 WSS 骤升环境时血管内膜斑块形成率显著升高,严重时造成斑块破裂并继发内膜撕裂<sup>[23]</sup>。SMA 内径为 $(0.60\pm 0.09)$  cm,有时较难清晰完整地显示。因此,使用 Mimics 软件进行分离提取时应尽可能导入层厚更薄的影像数据,以便精确重建 SMA 结构,避免周围 CT 值相近组织引起 SMA 内径扩大,影响数据可靠性。

#### 3.6 血管壁材料特性

研究表明,WSS 异常增高会引起动脉管壁内膜硬化和中膜变薄,并使平滑肌细胞、弹性蛋白及胶原纤维含量、微观结构发生改变<sup>[24]</sup>。由此产生的动脉管壁材料特性变化,如杨氏模量、泊松比、管壁平均厚度等均会对流固耦合模拟中血管壁变形及应

力产生影响。因此,未来研究中应基于组织学测定 SMA 管壁材料特性,并获得更真实参数。

### 3.7 SMA 特殊解剖结构

SMA 起始段走行于胰腺后方,由周围纤维结缔组织包裹,位置相对固定,而 SMA 远端则向下弯折走行于肠系膜内,易随体位改变发生位移。CFD 研究显示,在 SMA 固定部位至相对不固定部位移行区可观察到因血流方向突然改变产生的作用于 SMA 前壁的异常机械应力<sup>[25-26]</sup>,但夹层撕裂口位置与胰腺下缘 SMA 移行部[胰腺下缘与 SMA 夹层撕裂口间距离为(11.20±9.61) mm]并不完全一致<sup>[27]</sup>。未来研究可将流固耦合中与 SMA 胰腺上段对应的固定部分(血管壁)设为不可移动面,进一步研究此处血流动力学参数。

## 4 CFD 在 ISMAD 研究中的应用的局限性

CFD 技术可对 ISMAD 流体力学问题进行较为精确的数值模拟和参数分析,一定程度上弥补了传统影像学检查的不足,但目前该技术仍存在局限性:①CFD 数值模拟大多基于简化的血管模型,如假设血流为不可压缩的牛顿黏性流体,且血管壁为刚性等。然而在生理状态下,血液并非牛顿黏性流体,SMA 作为黏弹性管的生物特性有待进一步基于组织学予以测定,且血管壁也会与血流产生相互作用。②受到计算机软件设计限制,CFD 无法达到完全仿真匹配某些生理条件下实时变化对心率、血压、血管内径等参数模拟的影响<sup>[28]</sup>。③CFD 数值模拟计算过程中,边界条件设置对模拟结果有很大影响,而 SMA 入口和出口附近血流流量、压强等参数难以进行个性化在体测量。此外,稳态模拟和瞬态模拟各有优劣,研究中应根据实际需求选择合适的模拟方法。

## 5 结语

随着医用 CFD 技术不断发展,ISMAD 研究中可更精确地仿真模拟 SMA 内各项血流动力学参数,从而有效弥补传统医学影像成像技术局限性,解决体内血流动力学参数难以无创测量问题,最终实现在体血流动态化模拟。CFD 在 ISMAD 研究中应用已证实,SMA 弯折部位异常血流动力学因素与 ISMAD 发病相关。相信未来以 CFD 为代表的数值模拟技术,将成为探索 ISMAD 发病机制及预测夹层转归的有效手段,对 ISMAD 预警和预后判断发挥重要作用。

## [参考文献]

- [1] Dottori J, Casciaro M, Craiem D, et al. Regional assessment of vascular morphology and hemodynamics: methodology and evaluation for abdominal aortic aneurysms after endovascular repair [J]. *Comput Methods Biomech Biomed Engin*, 2020, 23: 1060-1070.
- [2] Tang CX, Liu CY, Lu MJ, et al. CT FFR for ischemia-specific CAD with a new computational fluid dynamics algorithm: a Chinese multicenter study[J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2020, 13: 980-990.
- [3] Yoneyama Y, Isoda H, Ishiguro K, et al. Evaluation of magnetic resonance angiography as a possible alternative to rotational angiography or computed tomography angiography for assessing cerebrovascular computational fluid dynamics[J]. *Phys Eng Sci Med*, 2020, 43: 1327-1337.
- [4] Zuo H, Ling Y, Li P, et al. Patient - specific CT - based fluid - structure-interaction aorta model to quantify mechanical conditions for the investigation of ascending aortic dilation in TOF patients [J]. *Comput Math Methods Med*, 2020: 4568509.
- [5] 柏亚明, 周罗慧, 夏健明, 等. 主动脉夹层的血流动力学数值模拟研究进展[J]. *西南国防医药*, 2021, 31: 63-65.
- [6] 林亚华, 景在平, 赵志清, 等. 人胸主动脉血液脉动流的三维数值分析[J]. *第二军医大学学报*, 2006, 27: 867-875.
- [7] 刘赵森, 薛贺波, 杨 刚, 等. 主动脉瓣倾斜角度血流动力学的 PIV 实验研究[J]. *力学学报*, 2020, 52: 1811-1821.
- [8] 童建华, 王贵学. 腹主动脉瘤生物力学研究的新进展[J]. *医用生物力学*, 2016, 31: 369-375.
- [9] 张国威, 王文全, 庆开雄, 等. 个性化主动脉夹层的血流动力学数值仿真研究[J]. *中国血管外科杂志(电子版)*, 2019, 11: 37-40.
- [10] 邹燕萍, 徐 锋. 壁面切应力与颅内动脉瘤的研究进展[J]. *临床神经外科杂志*, 2021, 18: 117-120.
- [11] Jeays AD, Lawford PV, Gillott R, et al. Characterisation of the haemodynamics of the superior mesenteric artery[J]. *J Biomech*, 2007, 40: 1916-1926.
- [12] Park YJ, Park CW, Park KB, et al. Inference from clinical and fluid dynamic studies about underlying cause of spontaneous isolated superior mesenteric artery dissection[J]. *J Vasc Surg*, 2011, 53: 80-86.
- [13] Wu Z, Yi J, Xu H, et al. The significance of the angle between superior mesenteric artery and aorta in spontaneous isolated superior mesenteric artery dissection[J]. *Ann Vasc Surg*, 2017, 45: 117-126.
- [14] 王 成, 王 哲, 李凤贺, 等. 30 例自发性孤立性肠系膜上动脉夹层的血流动力学分析[J]. *重庆医科大学学报*, 2020, 45: 1371-1376.
- [15] Reneman RS, Arts T, Hoeks AP. Wall shear stress—an important determinant of endothelial cell function and structure: in the arterial system in vivo. Discrepancies with theory[J]. *J Vasc Res*, 2006, 43: 251-269.
- [16] Meng H, Tutino VM, Xiang J, et al. High WSS or low WSS? Complex interactions of hemodynamics with intracranial aneurysm

- initiation, growth, and rupture: toward a unifying hypothesis [J]. AJNR Am J Neuroradiol, 2014, 35: 1254-1262.
- [17] Qin H, Wei L, Zhang B, et al. Clinical medical decision-making of acute aortic intramural hematoma: a non-randomized retrospective case study [J]. J Intervent Med, 2020, 3: 132-135.
- [18] Liu L, Wang W, Lu Q, et al. Morphology of the ascending aorta: a study on 114 Chinese patients [J]. J Intervent Med, 2018; 22-27.
- [19] Shen Y, Zhang SM, Zhu GL, et al. Risk factors of distal segment aortic enlargement after complicated type B aortic dissection [J]. J Intervent Med, 2019, 2: 154-159.
- [20] 中国医师协会介入医师分会外周血管介入专业委员会. 孤立性肠系膜上动脉夹层诊治专家共识 [J]. 中华放射学杂志, 2021, 55: 352-358.
- [21] 王晓曦, 刘宏斌, 胡小忠, 等. 冠状动脉局部血流动力学参数分析及斑块预警研究 [J]. 解放军医学院学报, 2013, 34: 617-620.
- [22] 潘 敏, 王 凯, 李绍钦, 等. 肠系膜上动脉-腹主动脉夹角在孤立性肠系膜上动脉夹层中的意义 [J]. 介入放射学杂志, 2022, 31: 87-90.
- [23] Jou LD, Lee DH, Morsi H, et al. Wall shear stress on ruptured and unruptured intracranial aneurysms at the internal carotid artery [J]. AJNR Am J Neuroradiol, 2008, 29: 1761-1767.
- [24] Salmasi MY, Pirola S, Sasidharan S, et al. High wall shear stress can predict wall degradation in ascending aortic aneurysms: an integrated biomechanics study [J]. Front Bioeng Biotechnol, 2021, 9: 750656.
- [25] Hirai S, Hamanaka Y, Mitsui N, et al. Spontaneous and isolated dissection of the main trunk of the superior mesenteric artery [J]. Ann Thorac Cardiovasc Surg, 2002, 8: 236-240.
- [26] Solis MM, Ranval TJ, McFarland DR, et al. Surgical treatment of superior mesenteric artery dissecting aneurysm and simultaneous celiac artery compression [J]. Ann Vasc Surg, 1993, 7: 457-462.
- [27] Tomita K, Obara H, Sekimoto Y, et al. Evolution of computed tomographic characteristics of spontaneous isolated superior mesenteric artery dissection during conservative management [J]. Circ J, 2016, 80: 1452-1459.
- [28] 常清华, 刘仁光, 李长军, 等. 减慢呼吸频率对原发性高血压患者心率变异性和血压变异性的影响 [J]. 中国心脏起搏与心电生理杂志, 2016, 30: 224-228.
- (收稿日期: 2022-02-23)  
(本文编辑: 边 倍)

· 消 息 ·

## 2022 年度林贵-刘子江优秀介入论文奖获奖名单

2022 年度林贵-刘子江优秀介入论文奖在南京正大天晴制药有限公司支持下, 经过本人申请, 编辑部初审, 邀请国内各介入专业专家评审, 共评选出 2022 年度在《介入放射学杂志》和《介入医学杂志(英文)》上发表的优秀论文 7 篇, 其中一等奖 1 篇, 二等奖 2 篇, 三等奖 4 篇。现将名单公布如下。

### 一等奖(1 篇)

刘焕等. Evaluation of using a double helical, closed-cell stent-retriever (Skyflow) for thrombectomy procedures in acute arterial occlusion: a preclinical study and a clinical trial

### 二等奖(2 篇)

刘一铭等. 携  $^{125}\text{I}$  粒子三链营养管近距离放射治疗晚期食管癌的近期疗效评价

李腾飞等. 巴马小型猪动脉粥样硬化性颈动脉狭窄模型建立的技术探讨

### 三等奖(4 篇)

卢莹莹等. 经皮骶骨成形术联合射频消融术治疗骶骨转移瘤的临床疗效评价

白耀威等. 血小板减少症患者经颈静脉肝内门体分流术安全性和预后分析

孔 健等. Complications from Port-a-cath System Implantation in Adults with Malignant Tumors A 10-year Single-center Retrospective Study

王朝阳等. Dynamic changes in liver function after transjugular intrahepatic portosystemic shunt in patients with cirrhosis