

文章编号: 1004-7220(2021)05-0783-07

基于单向流固耦合方法的循环肿瘤细胞捕获特性仿真与分析

王检耀^{1a,1b}, 庄淳², 齐世霏^{1c}, 王鸿东^{1a,1b}

(1.上海交通大学 a 海洋工程国家重点实验室, b 海洋智能装备与系统教育部重点实验室, c 生物医学工程学院, 上海 200240; 2.上海交通大学医学院附属仁济医院 胃肠外科, 上海 200120)

摘要:目的 研究循环肿瘤细胞(circulating tumor cells, CTC)在血液中的运动过程以及 CellCollector 取样针对 CTC 的捕获机理,揭示 CTC 检出数量与体内实际浓度的关系。**方法** 基于 Fluent 和 EDEM 软件,应用单向流固耦合的两相流计算方法,建立血流动力学模型及 CTC 组分运输模型,开展不同 CTC 浓度工况下的捕获特性仿真。**结果** CellCollector 取样针的 CTC 捕获数量与体内 CTC 浓度呈明显正相关。CTC 浓度较低时,只能在少数时间区间内捕获到 CTC 颗粒,捕获有一定的偶然性;随着浓度增加,CTC 捕获数在时间上的均匀性变好,同时捕获总数也随之增加。**结论** 通过拟合仿真结果,初步获得 CTC 捕获数量与体内浓度的量化解析关系,为 CellCollector 的临床使用提供理论依据及力学机制阐释。

关键词:循环肿瘤细胞;单向流固耦合;两相流;数值仿真

中图分类号: R 318.01 **文献标志码:** A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2021.05.019

Simulation and Analysis of Capture Characteristics of Circulating Tumor Cells Based on Unidirectional Fluid-Solid Interaction Method

WANG Jianyao^{1a,1b}, ZHUANG Chun², QI Shifei^{1c}, WANG Hongdong^{1a,1b}

(1a. State Key Laboratory of Ocean Engineering, 1b. Key Laboratory of Marine Intelligent Equipment & System of Ministry of Education, 1c. School of Biomedical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. Department of Gastrointestinal Surgery, Renji Hospital, Shanghai Jiao Tong University School of Medicine, Shanghai 200120, China)

Abstract: Objective To study movement process of circulating tumor cells (CTCs) in the blood and mechanism of CTC capture by CellCollector, and reveal relationship between the detected CTC numbers and the actual CTC concentration in the body. **Methods** Based on Fluent and EDEM software, the unidirectional fluid-solid interaction method was applied to establish a two-phase flow model, including the hemodynamic model and the CTC transport model, and capture simulations under different CTC concentration conditions were conducted. **Results** The number of CTCs captured by CellCollector was significantly positively correlated with the CTC concentration in the body. When the CTC concentration was low, CTCs could only be captured in several time intervals, and the capture had a certain contingency; as the concentration increased, the uniformity of CTC capture over time

收稿日期:2020-08-21; 修回日期:2020-12-01

基金项目:上海交通大学医工交叉研究基金(ZH2018QNA45)

通信作者:王鸿东,副研究员,E-mail: whd302@sjtu.edu.cn

became better, and the total number of captures also increased. **Conclusions** Through the fitting of simulation results, analytical quantitative relationship between the captured CTC number and the CTC concentration in the body is preliminarily given, which provides theoretical basis and mechanical explanation for the clinical use of CellCollector.

Key words: circulating tumor cell (CTC); unidirectional fluid-structure interaction; two-phase flow; numerical simulation

循环肿瘤细胞(circulating tumor cell, CTC)是指从肿瘤的原发病灶或者转移病灶脱离,进入血液循环系统,随之转移到远处的组织并最终参与肿瘤疾病恶化、转移、复发过程的肿瘤细胞^[1]。CTC检测在肿瘤分期及早期微转移发现^[2]、预后评估^[3-5]、指导个性化治疗^[6-7]等方面具有重要的临床意义,其在乳腺癌、结直肠癌、肺癌和前列腺癌中的应用已得到一定程度的验证^[8-11]。

CellCollector是德国 Gilupi GmbH 公司研发的 CTC 检测技术。该技术将取样针置于静脉中一段时间,通过功能区表面的 EpCAM 抗体捕获流经功能区的 CTC。目前,研究者从临床数据统计角度对 CellCollector 在前列腺癌、肺癌和神经内分泌肿瘤患者中的使用效果进行评估或比较,结果显示,CellCollector 具有较高的灵敏性^[12-16]。与 CellSearch 等体外检测方式相比,CellCollector 具有检测血容量较大的优势^[17-18]。

CTC 的检出数量与癌症诊断和治疗预后之间存在密切相关关系,然而目前基本都是基于临床数据统计去评估 CellCollector 的效果,而鲜有针对这一问题开展 CTC 捕获过程的定量分析研究。

随着力学理论和计算机技术的发展,数值仿真逐渐成为血流动力学分析的重要手段^[19-20]。本文采用数值仿真方法,建立血液与 CTC 的单向流固耦合模型,对 CTC 在血液中的流动过程及 CellCollector 对 CTC 的捕获过程进行仿真计算。首先,基于 Fluent 软件建立血流动力学模型,计算得到血液的稳态流场。再将流场数据导入 EDEM 软件中,在 EDEM 中建立 CTC 的离散相模型,考虑流场对 CTC 的拖曳作用,完成不同 CTC 浓度工况的仿真计算,讨论 CTC 浓度对捕获数量的影响,从而可以通过 CTC 的捕获数量反映体内肿瘤负荷水平,为 CellCollector 的临床使用提供理论依据和力学机制阐释。

1 对象与方法

1.1 研究对象

以德国 Gilupi 公司研发生产的 CellCollector 作为研究对象。CellCollector 连接并固定在留置针上,选择上肢肘部静脉穿刺停留在血液中 30 min。功能区表面的 EpCAM 抗体能够特异性捕获 30 min 内流经功能区的 CTC。其工作原理如图 1 所示。

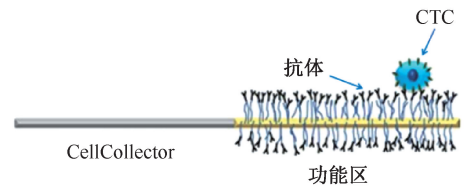


图1 CellCollector 的 CTC 捕获原理

Fig.1 CTC capture principle of CellCollector

1.2 单向流固耦合方法

为了准确表现 CTC 在流场中的运动状态,建模时将血液视为连续相流体,将 CTC 视为离散相的固体颗粒。当血液流场达到稳定后,CTC 的动态行为并不会对流场本身产生明显影响,而 CTC 主要受到血液流场的曳力发生运动,故可以只考虑单向耦合的作用。利用 Fluent 软件计算得到稳定的流场后,将流场数据导入 EDEM 软件以进行 CTC 的动力学计算。

1.2.1 流体动力学方程 将血液视为不可压缩牛顿流体,其流动满足连续性方程和 Navier-Stokes 方程:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

$$\rho_f \left[\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} \right] = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u} \quad (2)$$

式中: ρ_f 为血液密度; \mathbf{u} 为血液流动速度矢量; p 为压强; μ 为黏性系数。

1.2.2 CTC 动力学方程 血液对颗粒的曳力是 CTC 运动的主要影响因素,从而 CTC 运动方程可写为:

$$\rho_c V_c \ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{F}_f \quad (3)$$

式中: ρ_c 为 CTC 颗粒的密度; V_c 为 CTC 颗粒的体积; \mathbf{q} 为 CTC 颗粒的位移矢量; \mathbf{F}_f 为曳力矢量。

要求解式(3),关键是确定曳力项 F_f 。曳力大小可表达为:

$$F_f = \frac{1}{2} \zeta A \rho_f v^2 \quad (4)$$

式中: A 为颗粒在运动方向上的投影面积; v 为颗粒与流体之间的相对运动速度; ζ 为曳力系数,取值与雷诺数 Re 相关,一般遵循以下的规则:

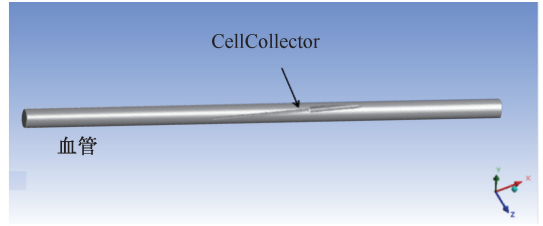
$$\zeta = \begin{cases} 24/Re, & Re \leq 1 \\ 18.5/Re^{0.6}, & 1 < Re \leq 500 \\ 0.44, & 500 < Re < 2 \times 10^5 \end{cases} \quad (5)$$

1.3 仿真模型与设置

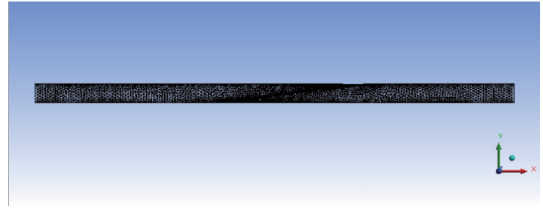
1.3.1 流场仿真设置 血液流场的计算在软件 Fluent 中进行。首先建立流域模型,将半径 $R=2$ mm、长 $L=100$ mm 三维圆柱体几何模型管道假设为肘静脉的血管部分, x 轴为血管的轴线方向,CellCollector 取样针以小角度斜插进管道至底部[见图 2(a)]。采用 ANSYS 网格划分模块对几何模型进行非结构化网格划分,并在近壁面和取样针附近区域进行网格加密,网格共含有 316 414 个单元[见图 2(b)]。

在血流动力学研究中,通常将血液简化为牛顿流体处理,能够简化模型、缩减计算量,同时取得较理想的仿真结果^[21-22]。本文设定血液为不可压缩的牛顿流体,密度为 $1\ 055\ \text{kg}/\text{m}^3$,流体动力黏度为 $3.5\ \text{mPa}\cdot\text{s}$;考虑到血管弹性对流场的速度与压力分布影响较小^[23],设置血管壁为刚性且壁面无滑移;入口设置为速度入口,血液流速为 $0.15\ \text{m}/\text{s}$;出口设置为压力出口,大小为大气压,即表压为 0;求解设置中,湍流模型采用标准的 $k-\epsilon$ 模型,控制方程的空间和时间离散均采用二阶精度格式,压力速度耦合求解采用 SIMPLE 法。

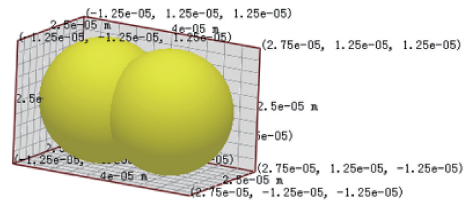
1.3.2 CTC 颗粒仿真设置 CTC 的运动与捕获过程仿真在离散元软件 EDEM 中进行。为了更接近实际肿瘤细胞纺锤形的特征,以双球形近似模拟细胞形状,单球直径为 $25\ \mu\text{m}$ (实际肿瘤细胞长度为 $40\sim 60\ \mu\text{m}$),并设定颗粒直径符合正态分布[见图 2(c)]。



(a) 流体域几何模型



(b) 流体域网格模型



(c) CTC颗粒几何模型

图2 流体域和 CTC 颗粒模型

Fig.2 Model of fluid domain and CTC particle

(a) Geometry of fluid domain, (b) Mesh of fluid domain, (c) Geometry of CTC particle

在 EDEM 中导入 Fluent 的流场速度结果文件,采用式(4)计算流体对 CTC 颗粒的曳力。同时,考虑 CTC 颗粒之间相互的碰撞,以及 CTC 与 CellCollector 取样针表面的碰撞。仿真中将颗粒和取样针之间的碰撞恢复系数设定为 0.1,使得 CTC 与取样针表面撞击后,速度衰减为小量,模拟 CTC 被捕获的效果。

假设 CTC 颗粒与取样针表面只要发生碰撞,就认为该颗粒被捕获,故通过统计取样针表面的碰撞总次数,即得到捕获的 CTC 颗粒数。由于颗粒尺寸为微米级,故时间积分步长较小,设定为 30 ms。仿真时长与体内静置时间一致,设定为 30 min。

2 结果与分析

2.1 流场仿真结果

通过 Fluent 软件仿真得到血液流场的稳定结果,血液速度分布如图 3 所示。在入口边界处血液流速相同,随着不断地流动,血管中心区域血流速

度逐渐加快,而靠近血管壁面位置,由于受到血管壁与流体的黏性作用,流体速度有层次的减小,在垂直于血流方向的血管截面上的血流速度分布大致呈抛物线形式。

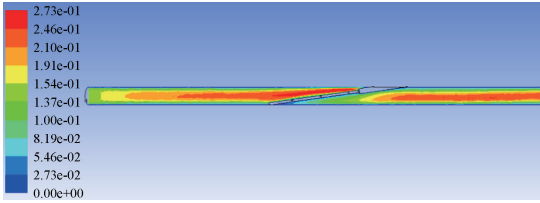


图3 血管中Z=0截面血液流速

Fig.3 Blood velocity at the Z=0 section in blood vessel

在取样针周围的流场发生明显的绕流现象,由于取样针使得流道变得狭窄,取样针前端的流速达到最大,速度峰值约为0.27 m/s。在取样针后端,流场经过充分发展后又回归成抛物线式的分布。

2.2 颗粒仿真结果

将 Fluent 仿真得到的流速结果导入 EDEM 后,进行 CTC 颗粒的动力学计算。如图4所示,某时刻血管中的 CTC 颗粒体积非常微小,且分布杂乱无

序,有类似于随机运动的特征,使得取样针对其捕获的情况难以直接预测。

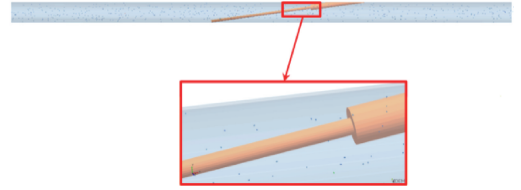


图4 某时刻 CTC 颗粒分布

Fig.4 CTC particle distributions at a certain moment

由于无法直接统计取样针上的 CTC 捕获数,因此认为 CTC 颗粒与取样针发生碰撞即为被捕获。为了得到 CTC 的体内浓度对捕获情况的影响,通过改变 CTC 颗粒在入口的注入速率,进行8个浓度工况的计算(见图5)。

将30 min总物理时长划分为等距的30个时间区间,每个时间区间代表1 min,统计每个时间区间内的 CTC 颗粒捕获数量,结果用直方图的形式呈现,以直观显示捕获数量随时间的变化趋势。CTC 浓度较低时,只能在少数时间区间内捕获到 CTC 颗

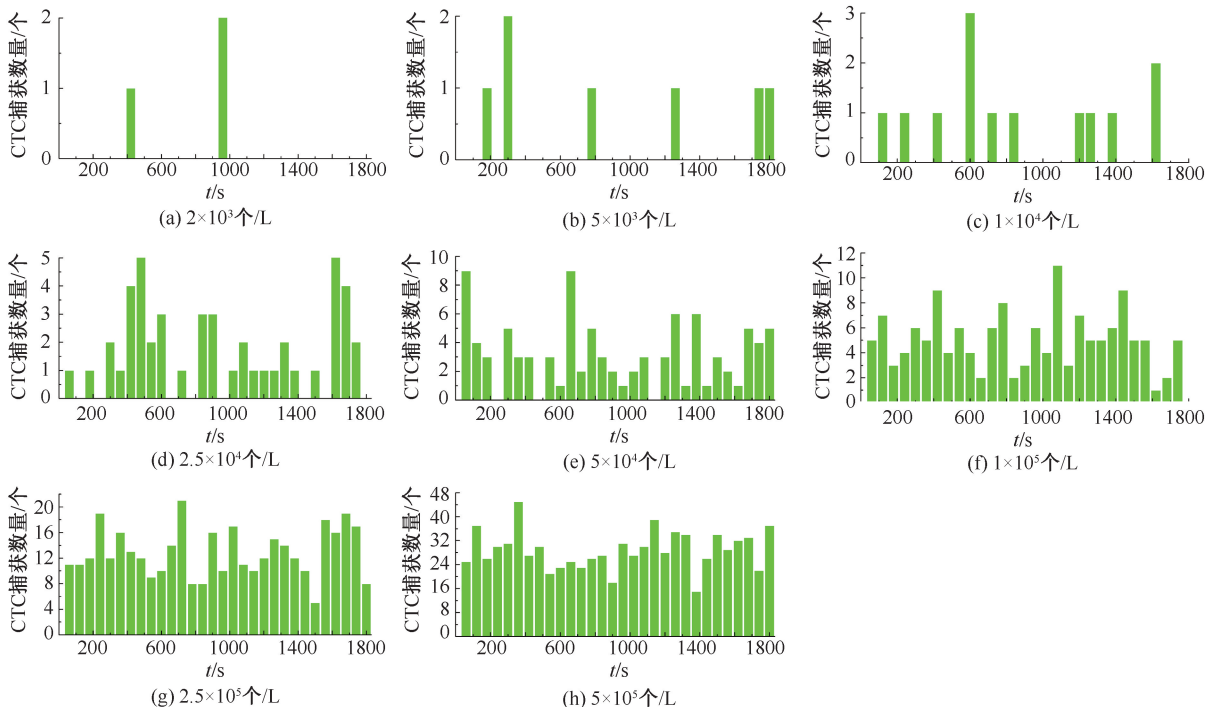


图5 不同 CTC 浓度下全时段捕获情况

Fig.5 Full-time captures under different CTC concentration (a) 2×10^3 CTCs/L, (b) 5×10^3 CTCs/L, (c) 1×10^4 CTCs/L, (d) 2.5×10^4 CTCs/L, (e) 5×10^4 CTCs/L, (f) 1×10^5 CTCs/L, (g) 2.5×10^5 CTCs/L, (h) 5×10^5 CTCs/L

粒,捕获到的颗粒数也很少,捕获有一定的偶然性。当 CTC 浓度为 2×10^3 个/L 时,30 min 内的总捕获数仅为 3 个,提示当 CTC 体内浓度低于一定的阈值时,可能导致 CTC 捕获数为 0。

随着浓度增加,CTC 捕获数量在时间上的均匀性变好,同时捕获的颗粒数也随之增加。因此,为了保证采样数的可重复性,将取样针在体内保持足够长的一段时间很有必要。

统计结果表明, 2×10^3 、 5×10^3 、 1×10^4 、 2.5×10^4 、 5×10^4 、 1×10^5 、 2.5×10^5 、 5×10^5 个/L 浓度下 30 min 内 CTC 捕获总数分别为 3、7、13、47、95、148、386、866 个。图 6 所示为捕获总数与颗粒浓度的关系曲线。可以看出,CTC 颗粒的捕获总数与颗粒浓度基本呈线性正相关。经过拟合得到 30 min 捕获数与 CTC 浓度的解析关系:

$$y = 1.7x - 5, \quad y \geq 0 \quad (6)$$

式中: y 为 30 min CTC 捕获数; x 为 CTC 的体内浓度,单位为 10^3 个/L。

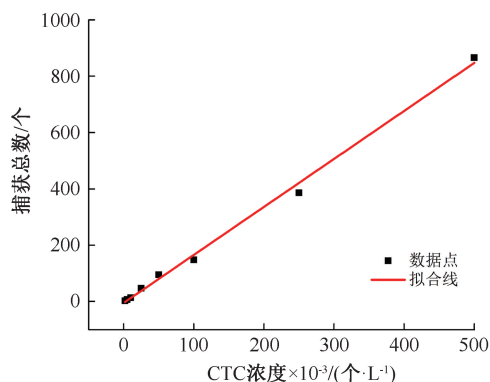


图 6 30 min 捕获总数与颗粒浓度关系

Fig.6 Relationship between capture number and particle concentration in 30 minutes

以上分析给出了理想条件下 CTC 捕获数量与体内 CTC 浓度的关系。而实际情况下,CTC 与取样针表面抗体发生作用时,并非一碰撞就能捕获,可能还需要满足一定的速度和角度约束。并且,已经被捕获的 CTC 可能会因为血液流动或者与其他颗粒相作用而脱落,从而实际的 CTC 捕获数应该要低于计算值。因此,仿真结果可以给出 CTC 捕获的大致趋势和规律,但还难以精确反映实际的捕获数量,需要进一步细化化学模型,并结合体外装置试验和临床试验数据进行模型修正。

3 讨论

CTC 是液体活检重要标志物之一,CTC 的检出数量能够实时反映患者体内的肿瘤负荷水平,帮助临床医生监控病程及治疗情况,对于肿瘤的疗效评估、病情监测、耐药析因、预后判断、肿瘤个体化治疗用药指导等方面都具有重大的临床意义。德国 Gilupi 公司研发生产的 CellCollector 是一种体内 CTC 捕获技术,其对 CTC 的检出数量与癌症诊断和治疗预后之间存在密切关系。目前已有研究基本基于临床数据统计评估 CellCollector 的效果,而鲜有针对这一问题开展 CTC 捕获过程的定量分析研究。

随着计算机技术的快速发展,数值仿真逐渐成为血流动力学分析的重要手段。研究者可以直观地获得三维流场细节以及详尽的血流动力学参数,如血流运动状态和压强分布等,对临床具有一定的指导意义。本文采用数值仿真方法对 CellCollector 的 CTC 捕获特性进行研究分析,探索 CTC 在血液中运动及捕获的微观机理,得到 CTC 捕获数与体内肿瘤细胞浓度的定量关系。

为了准确表现 CTC 在流场中的运动状态,本文在建模时将血液视为连续相流体,将 CTC 视为离散相的固体颗粒。分别在 Fluent 和 EDEM 软件中建立血流动力学模型和 CTC 颗粒运动模型,并通过流体曳力公式表示血液对 CTC 颗粒的作用,形成单向流固耦合的两相流仿真模型。通过调整 CTC 在入口的注入速率改变血液中的 CTC 浓度,对不同浓度工况下的 CTC 捕获情况进行仿真,得到取样针 CTC 捕获数与体内 CTC 浓度的关系。

结果表明,CTC 浓度较低时,CellCollector 只能在少数时间区间内捕获到 CTC 颗粒,捕获到的颗粒数也很少,捕获有较大的偶然性。当 CTC 体内浓度低于一定阈值时,可能导致 CTC 无法检出。随着 CTC 浓度增加,CTC 捕获数量在时间上的均匀性变好,同时捕获数也随之增加。CTC 的捕获总数与体内 CTC 浓度基本呈线性正相关,仿真结果初步给出了两者的量化关系,反映了 CTC 捕获的趋势和规律,可以为 CellCollector 的临床使用提供一定参考依据。然而,本研究局限于一些简化条件,相比于实际的 CTC 捕获情况仍有差距,还无法为深入该问题探讨提供充分的数据支撑。

4 结论

本文建立了血液和 CTC 的两相流数值仿真模型,对 CellCollector 的 CTC 检测数与体内肿瘤负荷水平的关系进行定量分析,给出初步的解析关系与结论。由于条件、数据和理论方面的不足,本研究尚存在很大的局限性,例如:未使用脉动的入口速度作为边界条件以及未考虑血管弹性对流场分布的影响、抗体与 CTC 的黏附和脱落效应、CTC 与其他细胞如白细胞、红细胞间的作用力。后续研究中,一方面需要深入力学机制,细化仿真模型;另一方面需要结合装置试验和临床试验数据,对模型结果进行修正。

参考文献:

- [1] PLAKS V, KOOPMAN CD, WERB Z. Cancer. Circulating tumor cells [J]. Science, 2013, 341(6151): 1186-1188.
- [2] SASTRE J, MAESTRO ML, PUENTE J, *et al.* Circulating tumor cells in colorectal cancer: Correlation with clinical and pathological variables [J]. Ann Oncol, 2008, 19(5): 935-938.
- [3] MASSIMO C, G THOMAS B, ELLIS MJ, *et al.* Circulating tumor cells, disease progression, and survival in metastatic breast cancer [J]. Semin Oncol, 2004, 33(1): 9-14.
- [4] MAHESWARAN S, SEQUIST LV, NAGRATH S, *et al.* Detection of mutations in EGFR in circulating lung-cancer cells [J]. N Engl J Med, 2008, 359(4): 366-377.
- [5] JIN K, CHEN X, LAN H, *et al.* Current progress in the clinical use of circulating tumor cells as prognostic biomarkers [J]. Cancer Cytopathol, 2019, 127(12): 739-749.
- [6] NIIKURA N, LIU J, HAYASHI N, *et al.* Loss of human epidermal growth factor receptor 2 (HER2) expression in metastatic sites of her2-overexpressing primary breast tumors [J]. J Clin Oncol, 2012, 30(6): 593-599.
- [7] AGELAKI S, KALYKAKI A, MARKOMANOLAKI H, *et al.* Efficacy of lapatinib in therapy-resistant HER2-positive circulating tumor cells in metastatic breast cancer [J]. PLoS One, 2015, 10(6): e0123683.
- [8] 古肖湘, 吴雄健, 祝小荐, 等. 循环肿瘤细胞检测技术进展及其临床应用 [J]. 赣南医学院学报, 2019, 39(11): 1097-1102.
- [9] BACCELLI, IRÈNE, SCHNEEWEISS A, RIETHDORF S, *et al.* Identification of a population of blood circulating tumor cells from breast cancer patients that initiates metastasis in a xenograft assay [J]. Nat Biotechnol, 2013, 31(6): 539-544.
- [10] HOU JM, GREYSTOKE A, LANCASHIRE L, *et al.* Evaluation of circulating tumor cells and serological cell death biomarkers in small cell lung cancer patients undergoing chemotherapy [J]. Am J Pathol, 2009, 175(2): 808-816.
- [11] GAZZANIGA P, GIANNI W, RAIMONDI C, *et al.* Circulating tumor cells in high-risk nonmetastatic colorectal cancer [J]. Tumor Biol, 2013, 34(5): 2507-2509.
- [12] GERIT T, KERSTEN F, EKKEHARD W, *et al.* The use of a new CellCollector to isolate circulating tumor cells from the blood of patients with different stages of prostate cancer and clinical outcomes: A proof-of-concept study [J]. PLoS One, 2016, 11(8): e0158354.
- [13] MANDAIR D, VESELY C, ENSELL L, *et al.* A comparison of CellCollector with CellSearch in patients with neuroendocrine tumours [J]. Endocr Relat Cancer, 2016, 23(10): 29-32.
- [14] GORGES TM, PENKALLA N, SCHALK T, *et al.* Enumeration and molecular characterization of tumor cells in lung cancer patients using a novel *in vivo* device for capturing circulating tumor cells [J]. Clin Cancer Res, 2016, 22(9): 2197-2206.
- [15] CHUDAK C, HERRMANN J, LESSER T. Enumeration and molecular characterization of circulating tumor cells in lung cancer patients using the GILUPI CellCollector [J]. J Thorac Oncol, 2016, 11(4): S104-S105.
- [16] KUSKE A, GORGES TM, TENNSTEDT P, *et al.* Improved detection of circulating tumor cells in non-metastatic high-risk prostate cancer patients [J]. Sci Rep, 2016, 6(1): 39736.
- [17] ALIX-PANABIÈRES, CATHERINE, PANTEL K. Challenges in circulating tumour cell research [J]. Nat Rev Cancer, 2014, 14(9): 623-631.
- [18] SAUCEDO-ZENI N, MEWES S, NIESTROJ R, *et al.* A novel method for the *in vivo* isolation of circulating tumor cells from peripheral blood of cancer patients using a functionalized and structured medical wire [J]. Int J Oncol, 2012, 41(4): 1241-1250.
- [19] 李洋, 张叙, 李志勇, 等. 基于病例研究冠状动脉扭曲对血流动力学的影响 [J]. 医用生物力学, 2018, 33(3): 229-233.
- [19] LI Y, ZHANG X, LI ZY, *et al.* Effect of coronary artery tortuosity on coronary hemodynamics based on case study [J]. J Med Biomech, 2018, 33(3): 229-233.
- [20] 丛梦杨, 赵慧慧, 许星明, 等. 右冠状动脉起源于左冠状窦的血流动力学分析 [J]. 医用生物力学, 2020, 35(3): 284-288.
- [20] CONG MY, ZHANG HH, XU XM, *et al.* Hemodynamic analysis on anomalous origin of the right coronary artery from the left coronary artery sinus [J]. J Med Biomech, 2020, 35(3): 284-288.

- [21] WEN J, WANG QF, WANG QY, *et al.* Numerical analysis of hemodynamics in spastic middle cerebral arteries [J]. *Comput Methods Biomech Biomed Engin*, 2016, 19(14): 1489-1496.
- [22] 韩嘉玮, 胡义锋. 基于流固耦合的载瘤血管内血液流动及血管损伤分析[J]. *医用生物力学*, 2019, 34(4): 372-378.
HAN JW, HU YF. Analysis of blood flow and vascular injury in aneurysm-carrying vessels based on fluid-structure interaction method [J]. *J Med Biomech*, 2019, 34(4): 372-378.
- [23] 王枫, 刘有军, 丁金立, 等. 中央分流术中血管弹性壁和刚性壁对血管中血流动力学的影响[J]. *医用生物力学*, 2013, 28(6): 622-628.
WANG F, LIU YJ, DING JL, *et al.* Hemodynamic comparison between elastic and rigid vessels for the central shunt [J]. *J Med Biomech*, 2013, 28(6): 622-628.

· 致读者 ·

关于论著文稿中中、英文摘要的书写要求

文摘是以提供文献内容梗概为目的,不加评价和解释,简明确切地记述文献重要内容的短文。摘要应具有自明性和独立性,并拥有与一次文献同等量的主要信息。即不阅读全文就能获得必要的信息。它的详简程度取决于文献的内容,通常中文文摘以不超过 400 字为宜。应以第 3 人称的语气书写。不要使用“本人”、“作者”、“我们”等作为陈述的主语。

摘要的内容应包括 4 个要素,即目的、方法、结果、结论。(1)目的:指研究的前提和缘起,即为什么要作此项研究,可以有简单的背景材料。(2)方法:指研究所用的原理、对象、观察和实验的具体方法等。(3)结果:指研究的结果、效果、数据等,着重反映创新性的、切实可行的成果,包括本组研究中的重要数据。(4)结论:指对结果进行综合分析,逻辑推理得出的判断。有的可指出实用价值和推广价值;如有特殊例外的发现或难以解决的问题,可以提出留待今后深入探讨。英文摘要的内容与中文摘要的内容要求大体一致。

英文摘要要求做到语法正确,用词准确,与中文摘要对应,方法、结果可略详于中文摘要。

本刊编辑部