

·论著·人工智能应用于烧伤与创面诊疗的探索·

本文亮点:

- (1) 建立基于术前吲哚菁绿血管造影(ICGA)视频的人工智能辅助股前外侧穿支皮瓣穿支识别流程,可对早期显影候选穿支点进行提取、排序并输出体表坐标,为术前穿支定位提供客观依据。
- (2) 证实在 20 例独立验证病例中,ICGA-人工智能辅助识别进行穿支定位的误差小于彩色多普勒超声和 ICGA-人工判读,且其定位优势穿支的准确率较高,其结果可作为传统术前检查的补充。

Highlights:

- (1) An artificial intelligence-assisted workflow for identifying perforators of anterolateral thigh perforator flaps based on preoperative indocyanine green angiography (ICGA) videos was established, which enabled extraction, ranking, and body-surface coordinate output of early-enhancing candidate perforator points, thus providing an objective basis for preoperative perforator localization.
- (2) It was confirmed that in the independent validation cohort of 20 cases, the error of ICGA examination-artificial intelligence-assisted identification for perforator localization was smaller than that of color Doppler ultrasound and ICGA-manual interpretation, and its accuracy in locating the dominant perforator was higher. The results can be used as a supplement to conventional preoperative examinations.



基于 ICGA 视频的人工智能辅助股前外侧穿支皮瓣穿支识别模型的建立及初步验证

侯新伟 董帅 朱波 吴成龙 田拥胜 王石 柳泽宇 巨积辉 王凯

苏州大学苏州瑞华骨科医院手外科, 苏州 215104

通信作者:王凯, Email: 15962200201@163.com

【摘要】 目的 建立基于吲哚菁绿血管造影(ICGA)视频的人工智能辅助股前外侧穿支皮瓣穿支识别模型并进行初步验证。**方法** 该研究为横断面研究。2024 年 1—7 月,苏州大学苏州瑞华骨科医院收治 70 例符合入选标准且接受股前外侧穿支皮瓣修复手术的患者,术前行彩色多普勒超声(CDU)和 ICGA 检查。采用 Python3.13 中的 random 函数选择 50 例患者作为训练集用于模型参数训练;剩余 20 例患者作为验证集,用于独立验证。以术中探查结果为金标准,预设每例患者股前外侧穿支皮瓣区域内有 4 个穿支定位点。统计训练集和验证集患者 CDU、ICGA-人工判读、ICGA-人工智能辅助识别(ICGA-AI)穿支定位点与术中实际穿支入皮点距离 ≤ 1.0 cm 的情况(真阳性)并计算阳性率。在训练集和验证集患者中,统计 3 种方法定位穿支的敏感度、特异度、阳性预测值、阴性预测值、准确

DOI: 10.3760/cma.j.cn501225-20260531-00222

收稿日期 2026-05-31

引用本文:侯新伟,董帅,朱波,等.基于 ICGA 视频的人工智能辅助股前外侧穿支皮瓣穿支识别模型的建立及初步验证[J].中华烧伤与创面修复杂志,2026,42(9):1-10. DOI: 10.3760/cma.j.cn501225-20260531-00222.

Hou Xinwei, Dong Shuai, Zhu Bo, et al. Establishment and preliminary validation of an artificial intelligence-assisted model for identification of perforators of anterolateral thigh perforator flaps based on preoperative indocyanine green angiography (ICGA) videos[J]. Chin J Burns Wounds, 2026, 42(9):1-10. DOI: 10.3760/cma.j.cn501225-20260531-00222.



率、平衡准确率,3种方法穿支定位结果与术中探查结果的一致性,测量3种方法确定的穿支定位点与对应的术中实际穿支入皮点之间的距离(误差距离),记录ICGA-AI定位的优势穿支与术中选择的优势穿支是否一致并计算优势穿支定位准确率。 **结果** 3种方法定位训练集和验证集患者穿支的阳性率比较,差异均无统计学意义($P>0.05$)。在训练集患者中,CDU、ICGA-人工判读、ICGA-AI定位穿支的敏感度、特异度、阳性预测值、阴性预测值、准确率、平衡准确率分别为88.70%、85.88%、89.47%、84.88%、87.50%、87.29%、93.91%、89.41%、92.31%、91.57%、92.00%、91.66%、82.61%、83.53%、87.16%、78.02%、83.00%、83.07%;CDU、ICGA-人工判读和ICGA-AI穿支定位结果与术中探查结果的一致性较强或几乎完全一致(κ 分别为0.74、0.84、0.66, $P<0.05$)。在验证集患者中,CDU、ICGA-人工判读、ICGA-AI定位穿支的敏感度、特异度、阳性预测值、阴性预测值、准确率、平衡准确率分别为95.24%、78.95%、83.33%、93.75%、87.50%、87.09%、95.24%、92.11%、93.02%、94.59%、93.75%、93.67%、95.24%、94.74%、95.24%、94.74%、95.00%、94.99%;CDU、ICGA-人工判读和ICGA-AI穿支定位结果与术中探查结果的一致性较强或几乎完全一致(κ 分别为0.75、0.88、0.90, $P<0.05$)。在训练集患者中,ICGA-AI穿支定位误差距离为0.84(0.70, 0.98)cm,明显短于CDU的1.41(0.80, 2.00)cm($Z=-2.56$, $P<0.05$)和ICGA-人工判读的1.50(1.03, 1.80)cm($Z=-5.88$, $P<0.05$)。在验证集患者中,ICGA-AI穿支定位误差距离为0.52(0.35, 0.71)cm,明显短于CDU的1.50(1.00, 2.25)cm($Z=-3.23$, $P<0.05$)和ICGA-人工判读的1.56(1.41, 2.00)cm($Z=-3.52$, $P<0.05$)。在训练集和验证集患者中,ICGA-AI定位优势穿支的准确率分别为82.00%(41/50)和90.00%(18/20)。 **结论** 本研究初步建立了基于ICGA视频的人工智能辅助股前外侧穿支皮瓣穿支识别方法,在验证集患者中显示出较小的定位误差和较高的优势穿支定位准确率,可辅助术前穿支定位。

【关键词】 穿支皮瓣; 人工智能; 血管造影术; 吲哚菁绿; 股前外侧皮瓣; 创面修复

基金项目:苏州市医学重点学科(SZ XK202532);苏州市科技攻关计划(SYWD2025069);2026年度江苏省研究生科研实践创新计划立项项目(26CXJH5988)

Establishment and preliminary validation of an artificial intelligence-assisted model for identification of perforators of anterolateral thigh perforator flaps based on preoperative indocyanine green angiography (ICGA) videos

Hou Xinwei, Dong Shuai, Zhu Bo, Wu Chenglong, Tian Yongsheng, Wang Shi, Liu Zeyu, Ju Jihui, Wang Kai
Department of Hand Surgery, Suzhou Ruihua Orthopedic Hospital of Soochow University, Suzhou 215104, China

Corresponding author: Wang Kai, Email: 15962200201@163.com

【Abstract】 **Objective** To establish and preliminarily validate an artificial intelligence-assisted model for identification of perforators of anterolateral thigh perforator flaps based on preoperative indocyanine green angiography (ICGA) videos. **Methods** This study was a cross-sectional study. From January to July 2024, 70 patients who met the inclusion criteria and underwent anterolateral thigh perforator flap repair surgery were admitted to Suzhou Ruihua Orthopedic Hospital of Soochow University. All patients received preoperative color Doppler ultrasound (CDU) and ICGA examinations. Fifty patients were selected as the training set for model parameter training using the random function in Python 3.13, and the remaining 20 patients were assigned as the validation set for independent validation. With the intraoperative exploration result as the gold standard, 4 perforator sites were preset in the anterolateral thigh perforator flap area of each patient. In the training set and the validation set of patients, cases where the distance between the perforator localization points of CDU, ICGA-manual interpretation, and ICGA-based artificial intelligence (ICGA-AI) and the actual intraoperative cutaneous perforator entry point was ≤ 1.0 cm (defined as true positive) were calculated, and the positive rate was calculate. In the training set and validation set of patients, the sensitivity, specificity, positive predictive value, negative predictive value, accuracy, and balanced accuracy of the three methods for perforator localization were calculated, the consistency of the perforator localization results between the three methods and the intraoperative exploration; the distance between the perforator localization points determined by the three methods and the corresponding actual intraoperative cutaneous perforator entry point (error distance) was measured; the consistency between the dominant perforator localization by ICGA-AI and that determined intraoperatively was recorded, and the localization accuracy of the dominant perforator was calculated. **Results** There were no statistically significant differences in

the positive rates of perforator localization among the three methods in both the training set and the validation set of patients ($P>0.05$). In the training set of patients, the sensitivity, specificity, positive predictive value, negative predictive value, accuracy, and balanced accuracy of CDU, ICGA-manual interpretation, and ICGA-AI were 88.70%, 85.88%, 89.47%, 84.88%, 87.50%, and 87.29%, 93.91%, 89.41%, 92.31%, 91.57%, 92.00%, and 91.66%, and 82.61%, 83.53%, 87.16%, 78.02%, 83.00%, and 83.07%, respectively; the consistency of the perforator localization results between the three methods and the intraoperative exploration was strong or almost perfect (with κ of 0.74, 0.84, and 0.66, respectively, $P<0.05$). In the validation set of patients, the sensitivity, specificity, positive predictive value, negative predictive value, accuracy, and balanced accuracy of CDU, ICGA-manual interpretation, and ICGA-AI were 95.24%, 78.95%, 83.33%, 93.75%, 87.50%, and 87.09%, 95.24%, 92.11%, 93.02%, 94.59%, 93.75%, and 93.67%, 95.24%, 94.74%, 95.24%, 94.74%, 95.00%, and 94.99%, respectively; the consistency of the perforator localization results between the three methods and the intraoperative exploration was strong or almost perfect (with κ of 0.75, 0.88, and 0.90, respectively, $P<0.05$). In the training set of patients, the error distance of perforator localization of ICGA-AI was 0.84 (0.70, 0.98) cm, which was significantly shorter than 1.41 (0.80, 2.00) cm of CDU ($Z=-2.56$, $P<0.05$) and 1.50 (1.03, 1.80) cm of ICGA-manual interpretation ($Z=-5.88$, $P<0.05$). In the validation set of patients, the error distance of perforator localization of ICGA-AI was 0.52 (0.35, 0.71) cm, which was significantly shorter than 1.50 (1.00, 2.25) cm of CDU ($Z=-3.23$, $P<0.05$) and 1.56 (1.41, 2.00) cm of ICGA-manual interpretation ($Z=-3.52$, $P<0.05$). In the training set and the validation set of patients, the accuracy of ICGA-AI for dominant perforator localization was 82.00% (41/50) and 90.00% (18/20), respectively. **Conclusions** This study preliminarily establishes an artificial intelligence-assisted method for identification of perforators of anterolateral thigh perforator flaps based on ICGA videos. In the validation set of patients, this method showed smaller localization errors and higher accuracy of dominant perforator localization, which can assist in preoperative perforator localization.

[Key words] Perforator flap; Artificial intelligence; Angiography; Indocyanine green; Anterolateral thigh flap; Wound repair

Fund program: Suzhou Municipal Key Medical Discipline (SZXK202532); Suzhou Municipal Science and Technology Research Program (SYWD2025069); 2026 Jiangsu Province Graduate Research and Practice Innovation Program (26CXJH5988)

随着穿支皮瓣理念和显微外科技术的发展,股前外侧穿支皮瓣被证实具有切取面积较大、血管蒂较长、适用范围广等特点,是修复四肢及头颈颌面部皮肤软组织缺损较常用的皮瓣之一^[1-5]。但在临床中,穿支血管的来源、数量、穿出点、肌内走行以及口径均存在一定变异^[6-8],术中往往需要根据旋股外侧动脉穿支血管的实际情况调整股前外侧皮瓣的具体切取位置。如果术前穿支血管定位不够准确,术中往往需要扩大探查范围,从而增加皮瓣切取难度。

吲哚菁绿血管造影(indocyanine green angiography, ICGA)能够显示供区皮肤表面血流灌注情况及穿支入皮点,尤其是首亮点(指静脉 ICGA 视频中,造影剂开始显影后,局部组织荧光信号最早明确出现,并且持续存在于后续帧的可识别点)可作为判断穿支血管体表位置的重要依据。不过,首亮点有时出现时间很短,信号也比较弱,容易受到黑场切换、局部反光、画面亮度变化等因素干扰。单纯依靠肉眼观察,特别是在候选首亮点较多或显影不典型的病例中,仅通过肉眼识别判断首亮点的

位置比较困难^[9-11]。近年来,人工智能图像识别技术被逐渐用于医学影像分析,为 ICGA 视频的客观判读提供了新的思路^[12-15]。

基于以上问题,本研究以股前外侧穿支皮瓣 ICGA 视频为基础,建立人工智能辅助穿支识别模型,并比较 ICGA-人工智能辅助识别(artificial intelligence-assisted indocyanine green angiography, ICGA-AI)、ICGA-人工判读及彩色多普勒超声(color Doppler ultrasound, CDU)的穿支定位结果,初步评估 ICGA-AI 在股前外侧穿支皮瓣穿支定位中的应用价值。

1 对象与方法

本横断面研究符合《赫尔辛基宣言》的基本原则,经苏州大学苏州瑞华骨科医院医学伦理委员会审批通过,批号:RHGK-KY-2026020。

1.1 入选标准

纳入标准:(1)接受股前外侧穿支皮瓣修复手术者;(2)术前完成 CDU、ICGA 检查且保存完整动态视频者;(3)病历资料、手术记录及术中穿支选择

信息完整者。排除标准:(1)失访或拒绝接受随访者;(2)ICGA 图像显影不清,影响穿支判断者。

1.2 临床资料与分类

2024 年 1—7 月,苏州大学苏州瑞华骨科医院收治 70 例符合入选标准的接受股前外侧穿支皮瓣修复手术的患者,其中男 54 例、女 16 例,年龄 10~70 岁(平均 47.2 岁),体重指数 16.7~31.6 kg/m²(平均 23.5 kg/m²)。致伤原因为交通伤者 19 例、机器压伤者 35 例、重物砸压伤者 9 例、热压伤者 4 例、电锯伤者 2 例、高压注射伤者 1 例。创面位于足踝者 32 例、手部及腕部者 22 例、小腿者 10 例、前臂者 6 例。患者于入院后 0~41 d(平均 17.9 d)行皮瓣修复术。术前创面面积为 8.0 cm×4.5 cm~40.0 cm×10.5 cm,中位面积为 125 cm²;皮瓣面积为 10 cm×6 cm~43 cm×15 cm,中位面积为 144 cm²。

对于 70 例患者,用 Python3.13 中的 random 函数选择其中 50 例患者作为训练集,用于模型参数训练;剩余 20 例患者作为验证集,用于独立验证。

1.3 建立体表坐标系

以髂前上棘为坐标原点,以髂前上棘与髌骨外上缘的连线作为 x 轴,过髂前上棘作垂直于 x 轴的直线作为 y 轴。

1.4 术前穿支定位与术中验证

1.4.1 CDU 穿支定位 术前对股前外侧区使用 CDU 进行穿支定位。患者取仰卧位,暴露股前外侧区,采用 DC-85 型 CDU(探头型号 14-6NE)进行探查。CDU 采用低速血流模式,将彩色血流图取样框偏转至与血流方向一致,脉冲多普勒取样容积为 0.3~3.0 mm,校正角度 $\theta < 60^\circ$ 。CDU 检查由具有 10 年以上血管超声定位经验的医师完成,沿髂前上棘与髌骨外上缘连线中点上方扫查,找出旋股外侧动脉主干,沿主干缓慢扫查,采取横切、纵切相结合的方法,观察旋股外侧动脉穿支主干走行情况并标记穿支入皮点,该点为 CDU 穿支定位点,同时记录该定位点与髂前上棘的距离、口径及其体表坐标。若存在多个候选穿支,分别记录各候选穿支的前述情况。ICGA-人工智能辅助识别(artificial intelligen

1.4.2 ICGA 穿支定位及人工判读 患者取仰卧位,充分暴露股前外侧区。通过外周静脉推注 2.5 mg/mL 吲哚菁绿溶液 4~5 mL,10 s 内完成推注。将 HH-C-04 型激光淋巴成像检查仪摄像头与供区垂直距离调整为 40 cm,并将仪器的模式调至荧光模式,开始录像。根据首亮点出现后的局部血流灌注

变化确定候选首亮点,若存在多个候选首亮点,则结合显影顺序、荧光强度、持续时间及血流灌注范围判断候选优势穿支。ICGA 视频由 2 名具有 5 年以上工作经验的医师判读,若 2 人对候选首亮点判断不一致,则由第 3 名具有 10 年以上工作经验的高年资医师复核,最终在体表标记 ICGA-人工判读穿支定位点,并记录其与髂前上棘的距离及体表坐标。

1.4.3 皮瓣设计和切取及术中穿支验证 术前根据创面大小及形状裁剪样布,以髂前上棘与髌骨外上缘的连线作为股前外侧穿支皮瓣轴线,结合 CDU 检查、ICGA-人工判读结果进行皮瓣设计。手术时常规消毒铺巾,沿皮瓣设计线一侧切开皮肤及皮下组织,逐层解剖寻找穿支,重点探查术前各定位点附近区域。记录术中探查到的穿支入皮点(由主刀医师确认)与髂前上棘的距离及其体表坐标、穿支口径、穿出深筋膜位置,并结合穿支口径、供血范围和皮瓣设计需要选择合适穿支作为皮瓣供血血管。对于多穿支病例,分别记录穿支位置、来源、体表坐标及最终是否作为皮瓣供血血管。将术中最终选择作为皮瓣供血血管的穿支定义为优势穿支。

1.5 基于 ICGA 视频的人工智能辅助识别进行穿支定位

本研究中 ICGA 视频的人工智能辅助识别过程包括 3 个阶段。

第 1 阶段,对训练集患者的 ICGA 视频进行传统图像处理与候选首亮点提取。将视频通过 Tkinter 图形界面开发的可视化路径导入本团队自建 ICGA 视频分析程序(以下称系统)进行离线分析。系统首先通过 OpenCV、NumPy 库读取视频帧率、分辨率和总帧数,对 ICGA 视频进行等比例缩放亮度归一化、噪声抑制等;随后自动识别稳定黑场和早期显影阶段。以首亮点出现后的早期显影阶段作为主要分析窗口,通过前后帧比较提取候选亮点。对于多个候选亮点,系统根据其出现时间、亮度峰值、变亮速度、持续时间、局部稳定性及血流灌注范围进行综合排序,排首位者为候选优势穿支定位点,其余作为候选穿支定位点。

第 2 阶段进行训练标签生成与卷积神经网络训练。对于训练集患者的 ICGA 视频,对照术中穿支探查结果,对系统初步识别结果,包括黑场开始时间、首亮点出现时间、动脉期结束时间和可见光帧等内容进行人工复核,删除错误识别点,补充漏识

别点,调整候选亮点显影顺序,并确定候选优势穿支定位点。另外,将人工复核后的上述时间节点和点位结果作为训练标签保存。随后从 ICGA 视频逐帧提取图像用于卷积神经网络训练,模型训练 18 轮,每轮 6 张图像,优化器采用 Adam,学习率为 0.001。损失函数由焦点二元交叉熵(focal binary cross entropy, Focal BCE)和 Soft Dice 损失组成,其中 Focal BCE 参数 $\alpha=0.75$ 、 $\gamma=2.0$, Soft Dice 损失权重为 0.35。每轮训练后,系统自动计算训练损失,保存验证损失最低的模型权重。

卷积神经网络训练时,系统将每帧图像转换为绿色增强图、荧光增强图和灰度图组成的三通道输入,分辨率统一调整为 256×256 像素。通过人工复核后的穿支点生成的高斯热图进行训练,采用轻量化 U-Net 结构,包括 3 层编码器、1 个瓶颈层和 3 层解码器,编码器通道数依次为 32、64 和 128,瓶颈层通道数为 256 个。每个卷积模块由 2 个 3×3 卷积、批量归一化和 ReLU 激活函数组成,编码器采用最大池化下采样,解码器采用转置卷积上采样,并通过跳跃连接融合浅层和深层特征,最终输出单通道候选穿支热图。模型训练完成后,系统保存卷积神经网络权重和训练参数。对于卷积神经网络输出的候选穿支点,系统并非直接将其作为最终穿支定位点,而是结合绿色增强图、局部对比度和轨迹持续性进行确认,以减少假阳性穿支定位点出现。

第 3 阶段,对验证集患者的 ICGA 视频采用训练完成后的固定模型进行穿支识别。模型通过调用学习后的内容进行穿支定位。对于每个视频,系统自动输出候选首亮点及其体表坐标。模型最终也会输出“5 个核心输出文件”,分别是候选穿支定位点视频、动脉期优势穿支视频、可见光优势穿支图、显影顺序标记图、穿支综合评分时间曲线图,时间曲线图是根据局部荧光增强度、绿色增强度、局部环形对比度、亮斑面积变化来对穿支进行综合评估。定位结束后,将候选首亮点换算至体表坐标,用于与术中实际探查到的穿支的体表坐标进行比较。两者之间的误差采用同一坐标系下的欧氏距离表示,误差 ≤ 1.0 cm 为定位成功, > 1.0 cm 为定位失败。

1.6 观察指标

记录训练集和验证集患者 CDU、ICGA-人工判读和 ICGA-AI 的穿支定位结果。预设每例患者股前外侧皮瓣区域内有 4 个穿支定位点。参考文献

[9],将术前穿定位点与术中实际穿支入皮点之间的距离 ≤ 1.0 cm 判定为真阳性;若术中在该区域内未探查到穿支,而术前探查存在穿支定位点或术前穿支定位点与术中实际穿支入皮点之间的距离 > 1.0 cm,则判定为假阳性;若术中在该区域内探查到穿支,而术前探查不存在穿支定位点,则判定为假阴性;若术中在该区域内未探查到穿支且术前探查不存在穿支定位点,则判定为真阴性。测量 3 种方法确定的穿支定位点与对应的术中实际穿支入皮点之间的距离(误差距离)。记录 ICGA-AI 定位的优势穿支与术中选择的优势穿支是否一致并计算优势穿支定位准确率。

1.7 统计学处理

采用 Python3.13 中的 NumPy、SciPy 统计包进行数据处理。计量资料数据中符合正态分布者以 $\bar{x} \pm s$ 表示,采用配对样本 t 检验;不符合正态分布者以 $M(Q_1, Q_3)$ 表示,采用 Wilcoxon 符号秩检验。计数资料数据以频数、百分比表示,3 种方法定位穿支的阳性率的两两比较采用 McNemar 检验。分别计算 CDU、ICGA-人工判读及 ICGA-AI 定位穿支的敏感度、特异度、阳性预测值、阴性预测值、准确率及平衡准确率,其中平衡准确率 = (敏感度 + 特异度) $\div 2$ 。采用 Cohen κ 系数评价 3 种方法穿支定位结果与术中探查结果的一致性,参照 Landis-Koch 分级标准, $\kappa < 0$ 为一致性差, $\geq 0 \sim < 0.20$ 为一致性微弱, $\geq 0.20 \sim < 0.40$ 为一致性一般, $\geq 0.40 \sim < 0.60$ 为一致性中等, $\geq 0.60 \sim < 0.80$ 为一致性较强, $\geq 0.80 \sim < 1.00$ 为几乎完全一致^[16]。上述检验均为双侧检验,以 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 训练集患者穿支定位结果及定位效能

预设训练集 50 例患者共 200 个穿支定位点,术中共探查到 115 条穿支。CDU、ICGA-人工判读和 ICGA-AI 定位穿支的阳性率分别为 57.00% (114/200)、58.50% (117/200) 和 54.50% (109/200)。ICGA-AI 定位穿支的阳性率与 CDU、ICGA-人工判读比较,差异均无统计学意义(χ^2 值分别为 2.08、 < 0.01 , P 值分别为 0.149、 > 0.999),CDU 定位穿支的阳性率与 ICGA-人工判读比较,差异无统计学意义($\chi^2=1.46$, $P=0.228$)。

CDU、ICGA-人工判读和 ICGA-AI 穿支定位结果与术中探查结果的一致性较强或几乎完全一致

(κ 分别为 0.74、0.84、0.66, P 值均 <0.001)。见表 1。

2.2 验证集患者穿支定位结果及定位效能

预设验证集 20 例患者共 80 个穿支定位点,术中探查到 42 条穿支。CDU、ICGA-人工判读和 ICGA-AI 定位穿支的阳性率分别为 60.00% (48/80)、53.75% (43/80) 和 52.50% (42/80)。ICGA-AI 定位穿支的阳性率与 CDU、ICGA-人工判读比较,差异均无统计学意义(χ^2 值分别为 <0.01 、 0.25 , P 值分别为 >0.999 、 0.617), CDU 定位穿支的阳性率与 ICGA-人工判读比较,差异无统计学意义($\chi^2<0.01$, $P>0.999$)。

CDU、ICGA-人工判读和 ICGA-AI 穿支定位结果与术中探查结果的一致性较强或几乎完全一致(κ 分别为 0.75、0.88、0.90, P 值均 <0.001)。见表 2。

2.3 CDU、ICGA-人工判读、ICGA-AI 穿支定位误差距离比较

2.3.1 训练集结果 在训练集患者中,ICGA-AI 的穿支定位误差距离为 0.84(0.70, 0.98)cm, 短于

CDU 的 1.41(0.80, 2.00)cm($Z=-2.56$, $P=0.010$)和 ICGA-人工判读的 1.50(1.03, 1.80)cm($Z=-5.88$, $P<0.001$)。CDU、ICGA-人工判读的穿支定位误差距离比较,差异无统计学意义($Z=-0.45$, $P=0.653$)。

2.3.2 验证集结果 在验证集患者中,ICGA-AI 的穿支定位误差距离为 0.52(0.35, 0.71)cm, 明显短于 CDU 的 1.50(1.00, 2.25)cm($Z=-3.23$, $P<0.001$)和 ICGA-人工判读的 1.56(1.41, 2.00)cm($Z=-3.52$, $P<0.001$)。CDU、ICGA-人工判读的穿支定位误差距离比较,差异无统计学意义($Z=-0.48$, $P=0.631$)。

2.4 ICGA-AI 优势穿支定位结果

在训练集 50 例患者中,ICGA-AI 定位的优势穿支与术中一致者 41 例,优势穿支定位准确率为 82.00% (41/50)。验证集 20 例患者中,ICGA-AI 定位优势穿支与术中一致者 18 例,优势穿支定位的准确率为 90.00% (18/20)。70 例患者中,ICGA-AI 定位优势穿支与术中一致者 59 例,优势穿支定位准确率为 84.29% (59/70)。

2.5 典型病例

表 1 训练集 50 例接受股前外侧穿支皮瓣手术的患者采用 3 种方法定位穿支的效能

Table 1 The performance of three methods for perforator localization in 50 patients with anterolateral thigh perforator flap surgery in the training set

方法	穿支定位点(个)				敏感度 (%)	特异度 (%)	阳性预测值 (%)	阴性预测值 (%)	准确率 (%)	平衡准确率 (%)
	真阳性	假阳性	真阴性	假阴性						
CDU	102	12	73	13	88.70	85.88	89.47	84.88	87.50	87.29
ICGA-人工判读	108	9	76	7	93.91	89.41	92.31	91.57	92.00	91.66
ICGA-AI	95	14	71	20	82.61	83.53	87.16	78.02	83.00	83.07

注:CDU 为彩色多普勒超声,ICGA 为吲哚菁绿血管造影,ICGA-AI 为 ICGA-人工智能辅助识别;将术前定位点与术中实际穿支入皮点之间的距离 <1.0 cm 判定为真阳性;若术中在该区域内未探查到穿支,而术前探查存在穿支定位点或术前定位点与术中实际穿支入皮点之间的距离 >1.0 cm,则判定为假阳性;若术中在该区域内探查到穿支,而术前探查不存在穿支定位点,则判定为假阴性;若术中在该区域内未探查到穿支且术前探查不存在穿支定位点,则判定为真阴性

表 2 验证集 20 例接受股前外侧穿支皮瓣手术的患者采用 3 种方法定位穿支的效能

Table 2 The performance of three methods for perforator localization in 20 patients with anterolateral thigh perforator flap surgery in the validation set

方法	穿支定位点(个)				敏感度 (%)	特异度 (%)	阳性预测值 (%)	阴性预测值 (%)	准确率 (%)	平衡准确率 (%)
	真阳性	假阳性	真阴性	假阴性						
CDU	40	8	30	2	95.24	78.95	83.33	93.75	87.50	87.09
ICGA-人工判读	40	3	35	2	95.24	92.11	93.02	94.59	93.75	93.67
ICGA-AI	40	2	36	2	95.24	94.74	95.24	94.74	95.00	94.99

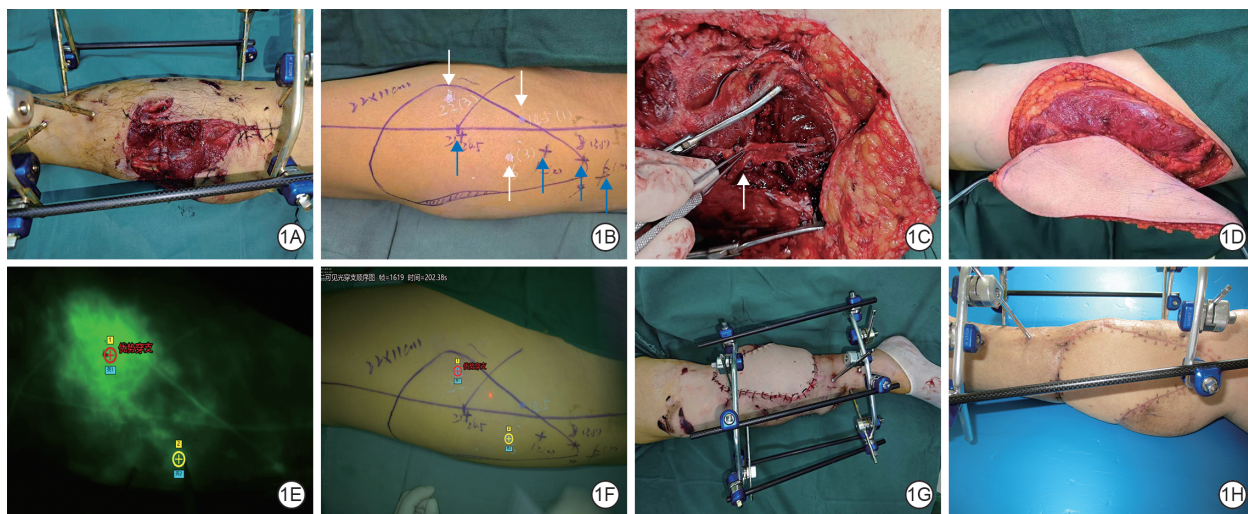
注:CDU 为彩色多普勒超声,ICGA 为吲哚菁绿血管造影,ICGA-AI 为 ICGA-人工智能辅助识别;将术前定位点与术中实际穿支入皮点之间的距离 <1.0 cm 判定为真阳性;若术中在该区域内未探查到穿支,而术前探查存在穿支定位点或术前定位点与术中实际穿支入皮点之间的距离 >1.0 cm,则判定为假阳性;若术中在该区域内探查到穿支,而术前探查不存在穿支定位点,则判定为假阴性;若术中在该区域内未探查到穿支且术前探查不存在穿支定位点,则判定为真阴性

验证集患者,男,55岁,体重指数为26.40 kg/m²,因交通事故致右小腿内侧软组织损伤入院。入院后I期行清创及VSD治疗,15 d后行股前外侧穿支皮瓣手术治疗,术前创面面积为21.0 cm×10.0 cm。以髌前上棘至髌骨外上缘的连线为皮瓣轴线,结合术前穿支定位设计股前外侧穿支皮瓣。术前采用CDU于髌前上棘以远、距其6.0、8.0、12.0及20.5 cm处各定位到1条穿支。术中患者取仰卧位,双下肢外展30°,常规消毒铺巾。手术开始前经外周静脉推注吲哚菁绿,ICGA-人工判读于髌前上棘以远、距其14.5、16.0、22.0 cm处各定位1条候选穿支。术中沿皮瓣设计线逐层解剖,于髌前上棘以远、距其8.0和20.5 cm处探查到2条穿支,最终选择以旋股外侧动脉斜支来源、距髌前上棘以远20.5 cm处穿支作为皮瓣供血血管。于左大腿设计并切取面积为22 cm×11 cm的股前外侧穿支皮瓣。切取皮瓣后,使用训练完成后的固定模型分析ICGA视频,ICGA-AI于髌前上棘以远、距其8.0和20.5 cm处定位2个候选穿支定位点。将皮瓣移植至右小腿创面,将部分皮瓣与创面缝合后行供受区血管吻合,吻合完成后继续完成皮瓣与创面的缝合。取左大腿皮片修复供区创面。术后随访12 d,皮瓣成活,创面愈合良好。见图1。

3 讨论

股前外侧皮瓣穿支血管在来源、数量、穿出位置及肌内走行方面存在较大个体差异,术前准确定位有助于减少术中探查范围,并为皮瓣设计及优势穿支选择提供依据^[1-8,17-19]。CDU、CT血管成像(computed tomography angiography, CTA)和ICGA均可用于术前穿支评估,但3种方法的成像机制不同,提供的信息维度也各有差异^[20-21]。CDU能够观察穿支血流方向、血管口径和穿出深筋膜的位置,既往研究显示其具有较好的术前定位价值^[11,22-27]。CTA在显示血管空间走行及与周围组织关系方面具有优势^[28-34]。ICGA作为一种实时血流灌注成像技术,已在肝脏外科、整形外科等多个领域获得广泛应用^[35]。ICGA则能够动态显示皮肤及皮下组织血流灌注过程,其中早期显影点可为穿支体表定位提供参考^[9-11,36]。但ICGA不能直接显示深筋膜下穿支来源及肌内走行,且容易受到皮瓣厚度、荧光穿透深度、局部反光及人工判读差异等因素影响^[35-36]。因此,本研究并非试图以ICGA-AI替代CDU或其他影像学方法,而是希望进一步利用已有ICGA视频中的时间和空间信息,为术前穿支定位增加一种辅助判断手段^[37-38]。

本研究首先比较了3种方法在位点水平的穿支定位结果。在训练集患者中,CDU、ICGA-人工判读



注:CDU为彩色多普勒超声,ICGA为吲哚菁绿血管造影,ICGA-AI为ICGA及人工智能辅助识别

图1 术前CDU和ICGA-人工判读定位穿支指导股前外侧穿支皮瓣移植修复右小腿创面及ICGA-AI穿支识别效果。1A.清创后可见软组织缺损;1B.术前CDU(蓝色箭头)及ICGA-人工判读(白色箭头)定位穿支及设计股前外侧穿支皮瓣;1C.术中穿支(箭头所示)选择;1D.股前外侧穿支皮瓣切取;1E. ICGA-AI对ICGA视频进行离线分析并识别、排序候选穿支(红色表示优势穿支定位点,黄色表示候选穿支定位点);1F. ICGA-AI识别的候选穿支定位点转换至股前外侧体表后的结果(红色表示优势穿支定位点,黄色表示候选穿支定位点);1G.股前外侧穿支皮瓣移植修复右小腿创面术后即刻;1H.术后12 d,皮瓣顺利成活

Figure 1 Preoperative CDU and ICGA-manual interpretation for perforator localization to guide transplantation of an anterolateral thigh perforator flap for repairing the wound on the right calf and the effect of ICGA-AI in recognition of perforators

及 ICGA-AI 的定位穿支的准确率分别为 87.50%、92.00% 和 83.00%，平衡准确率分别为 87.29%、91.66% 和 83.07%。另外，3 种方法定位穿支的阳性率两两比较，差异均无统计学意义，且与术中探查结果的一致性较强或几乎完全一致。在验证集患者中，3 种方法定位穿支的准确率分别为 87.50%、93.75% 和 95.00%，平衡准确率分别为 87.09%、93.67% 和 94.99%。从这些结果看，ICGA-AI 在训练集患者中并未显示出高于 CDU 和 ICGA-人工判读的总体定位效能，而在验证集患者中仍保持了较高的定位符合程度。这一结果提示，本研究 ICGA-AI 模型具有一定的穿支辅助定位潜力，但由于验证集仅 20 例患者，目前尚不能据此认为其定位穿支的总体性能优于 CDU 和 ICGA-人工判读。

相较于单纯的穿支定位阳性、阴性判定，本研究中的穿支定位误差距离可能更能反映 3 种方法在体表穿支定位精度方面的差异。在训练集患者中，ICGA-AI 穿支定位误差距离为 0.84 (0.70, 0.98) cm，明显短于 CDU 和 ICGA-人工判读；在验证集患者中，该误差距离进一步降至 0.52 (0.35, 0.71) cm，同样短于另外 2 种方法。其原因可能与 ICGA-AI 能够连续分析视频中的显影时间、局部荧光变化及空间稳定性有关。人工判读往往需要根据有限时间内的视觉印象确定首亮点，而人工智能程序可以对视频帧进行重复分析，并在统一坐标体系下输出候选位置。不过，这种穿支定位距离的差异也不能完全归因于算法本身。本研究的训练标签来源于人工复核和术中记录，体位改变、皮肤牵拉、皮瓣翻转以及体表坐标换算均可能影响最终距离测量。因此，目前结果更适合说明 ICGA-AI 在本研究条件下表现出较小的体表定位距离，而不能外推为在所有临床场景下均具有更高定位精度。

除候选穿支定位点外，本研究还观察了 ICGA-AI 对优势穿支的识别情况。在训练集和验证集患者中，ICGA-AI 排序首位的候选优势穿支与术中最终供血穿支一致的比例较高，准确率分别为 82.00% 和 90.00%。临床上，术前通过 CDU、ICGA 定位到候选穿支并不意味着该穿支一定适合作为最终供血血管，术者仍需结合血管口径、来源、供血范围、皮瓣设计及术中解剖情况进行选择。因此，优势穿支排序的意义主要在于缩小术者重点关注的范围，而不是直接替代术中穿支选择。从本研究

结果看，ICGA-AI 模型对候选穿支进行排序具有一定参考价值，但仍有 11 例患者 ICGA-AI 定位优势穿支与术中最终选择不一致，这也说明单纯依据 ICGA 动态显影的人工智能识别信息尚不足以完成优势穿支决策。

本研究认为，ICGA-AI 更适合作为已有术前检查的补充，而不是独立的穿支选择工具。CDU 能够提供较为直观的深部解剖和血流信息，ICGA-人工判读反映浅表动态血流灌注过程，而 ICGA-AI 主要是在与 ICGA-人工判读的同一 ICGA 视频基础上对早期显影特征进行提取和排序。3 种方法所提供的信息存在一定互补性。当不同方法定位的穿支均在同一区域时，可将其作为术中重点探查区域；若结果不一致，仍应结合血管口径、皮瓣厚度、血流灌注范围、创面修复需求及术者经验综合判断。因而，现阶段模型的实际意义更多是辅助术者筛选和复核候选穿支，而不是减少或取代术中的解剖确认。

本研究仍存在一些局限。首先，本研究为单中心回顾性研究，总样本量为 70 例，验证集仅 20 例，模型在不同设备、采集条件及患者群体中的稳定性尚不明确。其次，训练标签和术中参照均包含人工判断过程，患者体位变化、皮肤牵拉及坐标换算等均可能引入测量误差。再次，本研究排除了 3 例显影不清及 1 例视频资料不完整的病例，因此当前结果可能高估模型在复杂或低质量视频中的实际表现。此外，ICGA 本身主要反映浅表组织血流灌注，不能直接显示深筋膜下穿支的来源及其肌内走行，这一局限同样存在于 ICGA-AI。今后仍需扩大病例数，纳入未经筛选的病例开展多中心、前瞻性验证，并进一步探索 ICGA-AI 与 CDU、CTA 及术中解剖信息的联合应用。

综上，本研究初步建立了基于 ICGA 视频的人工智能辅助股前外侧穿支皮瓣穿支识别方法。在本组病例中，该方法能够对穿支候选显影点进行筛选和排序，且穿支定位误差距离较短，对优势穿支判断也具有一定参考价值。但现有结果仍属于初步验证，ICGA-AI 更适合作为 CDU、ICGA-人工判读及术中穿支解剖判断的补充，其临床应用价值仍需在更大样本和独立人群中进一步验证。

利益冲突 所有作者声明不存在利益冲突

作者贡献声明 侯新伟：酝酿和设计研究，分析/解释数据，起草文章；董帅：采集数据，起草文章；朱波、吴成龙、田拥胜、王石、柳泽宇：对文章的知识性内容作批评性审阅；巨积辉：指导文章撰写，内容修

改, 实施手术; 王凯: 酝酿和设计研究, 指导文章撰写修改

参考文献

- [1] 徐永清, 唐举玉, 刘元波, 等. 股前外侧皮瓣穿支解剖学特征与定位方法的专家共识(2024 版)[J]. 中国临床解剖学杂志, 2024, 42(5): 489-499. DOI: 10.13418/j.issn.1001-165x.2024.5.01.
- [2] Song YG, Chen GZ, Song YL. The free thigh flap: a new free flap concept based on the septocutaneous artery[J]. Br J Plast Surg, 1984, 37(2): 149-159. DOI: 10.1016/0007-1226(84)90002-x.
- [3] Wei FC, Jain V, Celik N, et al. Have we found an ideal soft-tissue flap? An experience with 672 anterolateral thigh flaps[J]. Plast Reconstr Surg, 2002, 109(7): 2219-2226; discussion 2227-2230. DOI: 10.1097/00006534-200206000-00007.
- [4] Kimata Y, Uchiyama K, Ebihara S, et al. Anatomic variations and technical problems of the anterolateral thigh flap: a report of 74 cases[J]. Plast Reconstr Surg, 1998, 102(5): 1517-1523. DOI: 10.1097/00006534-199810000-00026.
- [5] Wong CH, Wei FC. Anterolateral thigh flap[J]. Head Neck, 2010, 32(4): 529-540. DOI: 10.1002/hed.21204.
- [6] Lakhiani C, Lee MR, Saint-Cyr M. Vascular anatomy of the anterolateral thigh flap: a systematic review[J]. Plast Reconstr Surg, 2012, 130(6): 1254-1268. DOI: 10.1097/PRS.0b013e31826d1662.
- [7] Lee YC, Chen WC, Chou TM, et al. Anatomical variability of the anterolateral thigh flap perforators: vascular anatomy and its clinical implications[J]. Plast Reconstr Surg, 2015, 135(4): 1097-1107. DOI: 10.1097/PRS.0000000000001103.
- [8] Smith RK, Wykes J, Martin DT, et al. Perforator variability in the anterolateral thigh free flap: a systematic review[J]. Surg Radiol Anat, 2017, 39(7): 779-789. DOI: 10.1007/s00276-016-1802-y.
- [9] 董帅, 王石, 滕志成, 等. 吲哚菁绿血管造影联合彩色多普勒超声在股前外侧穿支皮瓣穿支定位中的临床应用效果[J]. 中华烧伤与创面修复杂志, 2025, 41(11): 10. DOI: 10.3760/cma.j.cn501225-20240629-00254.
- [10] 王石, 董帅, 曹阳, 等. 高选择性动脉吲哚菁绿造影在游离股前外侧皮瓣设计中的应用[J]. 中华烧伤与创面修复杂志, 2024, 40(10): 948-954. DOI: 10.3760/cma.j.cn501225-20240513-00174.
- [11] Thomas B, Falkner F, Didzun O, et al. Optimizing ALT flap harvest: the role of combined preoperative duplex ultrasound and intraoperative ICG angiography for perforator selection[J]. Life (Basel), 2025, 15(4): 620. DOI: 10.3390/life15040620.
- [12] Chung MJ, Chen WH, Lu YC, et al. Artificial intelligence-assisted indocyanine green angiography for perforators identification in the anterolateral thigh flap[J]. Ann Plast Surg, 2026, 96(2 Suppl 2): S25-S30. DOI: 10.1097/SAP.0000000000004545.
- [13] Jiang Z, Lei Y, Zhang L, et al. Automated quantitative analysis of blood flow in extracranial-intracranial arterial bypass based on indocyanine green angiography[J]. Front Surg, 2021, 8: 649719. DOI: 10.3389/fsurg.2021.649719.
- [14] Shadid O, Seth I, Cuomo R, et al. Artificial intelligence in microsurgical planning: a five-year leap in clinical translation[J]. J Clin Med, 2025, 14(13): 4574. DOI: 10.3390/jcm14134574.
- [15] Lin TC, Yang HA, Huang RW, et al. Artificial intelligence and machine learning in reconstructive microsurgery[J]. Semin Plast Surg, 2025, 39(3): 190-198. DOI: 10.1055/s-0045-1810062.
- [16] Landis JR, Koch GG. The measurement of observer agreement for categorical data[J]. Biometrics, 1977, 33(1): 159-174.
- [17] Miyamoto S, Fujisawa K, Kurita D, et al. New anatomic landmark for perforator of anterolateral thigh flap in preoperative ultrasonography[J]. Laryngoscope, 2025, 135(10): 3623-3629. DOI: 10.1002/lary.32223.
- [18] Yu L, Jiang Y, Zhang J, et al. Three dimensional-CTA versus Doppler ultrasound for anterolateral thigh flap reconstruction in limb defects: a retrospective study[J]. Plast Reconstr Surg Glob Open, 2025, 13(11): e7308. DOI: 10.1097/GOX.0000000000007308.
- [19] Wei B, Lu G, Li Q, et al. Finder-I for locating anterolateral thigh perforators in head and neck reconstruction: a diagnostic study[J]. Head Neck, 2025, 47(11): 3019-3027. DOI: 10.1002/hed.28227.
- [20] 张丕红. 浅谈薄型穿支皮瓣切取与穿支血管探测和皮瓣血运评估[J]. 中华烧伤与创面修复杂志, 2023, 39(10): 911-918. DOI: 10.3760/cma.j.cn501225-20230812-00047.
- [21] 邓呈亮, 简喜超. 浅谈显微外科技术和游离穿支皮瓣修复创面[J]. 中华烧伤与创面修复杂志, 2026, 42(5): 421-427. DOI: 10.3760/cma.j.cn501225-20260224-00085.
- [22] Yu P, Youssef A. Efficacy of the handheld Doppler in preoperative identification of the cutaneous perforators in the anterolateral thigh flap[J]. Plast Reconstr Surg, 2006, 118(4): 928-933. DOI: 10.1097/01.prs.0000232216.34854.63.
- [23] Tsukino A, Kurachi K, Inamiya T, et al. Preoperative color Doppler assessment in planning of anterolateral thigh flaps[J]. Plast Reconstr Surg, 2004, 113(1): 241-246. DOI: 10.1097/01.PRS.0000095949.41413.88.
- [24] Cheng HT, Lin FY, Chang SC. Diagnostic efficacy of color Doppler ultrasonography in preoperative assessment of anterolateral thigh flap cutaneous perforators: an evidence-based review[J]. Plast Reconstr Surg, 2013, 131(3): 471e-473e. DOI: 10.1097/PRS.0b013e31827c733e.
- [25] 王晓冰, 纪旭, 马春燕. 彩色多普勒超声在股前外侧穿支皮瓣移植术前穿支动脉评估中的作用[J]. 中国医科大学学报, 2022, 51(6): 513-517. DOI: 10.12007/j.issn.0258-4646.2022.06.007.
- [26] Moore R, Mullner D, Nichols G, et al. Color Doppler ultrasound versus computed tomography angiography for preoperative anterolateral thigh flap perforator imaging: a systematic review and meta-analysis[J]. J Reconstr Microsurg, 2022, 38(7): 563-570. DOI: 10.1055/s-0041-1740958.
- [27] Kim TH, Chao JS, Kwon JG, et al. Refining surgical precision: the impact of color doppler ultrasound-guided perforator mapping on anterolateral thigh flap for oncologic patients [J/OL]. J Reconstr Microsurg, 2025[2026-05-31]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/41360097/>. DOI: 10.1055/a-2751-8691. [published online ahead of print December 8, 2025].
- [28] Tang Y, Guo Q, Li X, et al. Augmented reality-assisted systematic mapping of anterolateral thigh perforators[J]. BMC Musculoskelet Disord, 2022, 23(1): 1047. DOI: 10.1186/s12891-022-06013-1.
- [29] Yu XX, Yang SF, Ji CS, et al. A novel computed tomography angiography technique: guided preoperative localization and design of anterolateral thigh perforator flap[J]. Insights Imaging, 2022, 13(1): 190. DOI: 10.1186/s13244-022-01318-0.
- [30] Zhang A, Dong Y, Yuan S, et al. Preoperative perforator mapping of anterolateral thigh flaps using computed

- tomographic angiography and visual coordinate system for the reconstruction of head and neck defects[J]. *Ear Nose Throat J*, 2025, 104(4): NP195-NP202. DOI: 10.1177/01455613221108367.
- [31] Kim H, Cha IH, Kim HJ, et al. Perforators detected in computed tomography angiography for anterolateral thigh free flap: am I the only one who feels inaccurate? [J]. *J Clin Med*, 2023, 12(12):4139. DOI:10.3390/jcm12124139.
- [32] 张月恒, 崔文举, 宋坤修, 等. 改良 CT 血管造影术辅助基于浅筋膜穿支的股前外侧皮瓣穿支评估与偏心设计的前瞻性研究 [J]. *中华烧伤与创面修复杂志*, 2023, 39(2): 141-149. DOI: 10.3760/cma.j.cn501225-20220902-00376.
- [33] 尹其翔, 糜菁熠, 蔡华忠, 等. 基于多层 CT 血管成像的穿支皮瓣设计和切取的三维导航流程的建立及其临床应用效果 [J]. *中华烧伤与创面修复杂志*, 2025, 41(2): 171-179. DOI:10.3760/cma.j.cn501225-20240407-00123.
- [34] Singaravelu A, Dalli J, Potter S, et al. Artificial intelligence for optimum tissue excision with indocyanine green fluorescence angiography for flap reconstructions: proof of concept [J]. *JPRAS Open*, 2024, 41: 389-393. DOI: 10.1016/j.jpra.2024.07.014.
- [35] 赖子森, 吕嘉晖, 刘广文, 等. 超声引导下经皮经肝门静脉穿刺注射吲哚菁绿在腹腔镜解剖性肝切除术中的应用价值 [J]. *中华消化外科杂志*, 2024, 23(12): 1544-1549. DOI:10.3760/cma.j.cn115610-20241120-00500.
- [36] Didzun O, Thomas B, Panayi AC, et al. Indocyanine green fluorescence angiography as a predictor of distal flap necrosis in latissimus dorsi free flaps [J]. *Microsurgery*, 2025, 45(2): e70019. DOI:10.1002/micr.70019.
- [37] 刘一秀, 汤喜, 吴剑, 等. 基于混合现实与人工智能算法在股前外穿支血管定位中的前瞻性研究 [J]. *华西口腔医学杂志*, 2024, (6): 9. DOI:10.7518/hxkq.2024.2024129.
- [38] Liu Y, Fan W, Yu M, et al. Comparison between mixed reality with artificial algorithms and ultrasound in localization of anterior thigh flap perforators: a prospective randomized controlled study [J]. *BMC Med*, 2025, 23(1): 374. DOI:10.1186/s12916-025-04181-0.