

## 计算机辅助近红外二区荧光血管造影在透析血液通路手术中的应用

李凌冰<sup>1,2</sup>, 符礼丹<sup>2,3</sup>, 史小静<sup>2</sup>, 王远大<sup>4</sup>, 王志军<sup>1,4,5\*\*</sup>, 胡振华<sup>2,5\*</sup><sup>1</sup>解放军总医院第二医学中心, 北京 100853;<sup>2</sup>中国科学院自动化研究所中国科学院分子影像重点实验室, 北京 100190;<sup>3</sup>中国科学院大学人工智能学院, 北京 100049;<sup>4</sup>解放军总医院第一医学中心, 北京 100853;<sup>5</sup>中国人民解放军总医院肾脏疾病全国重点实验室, 北京 100853

**摘要** 浅静脉清晰成像对于透析患者动静脉内瘘术前手术路径规划和术中引导手术治疗等具有重要作用,对临床疾病的诊断和治疗具有重要作用。目前临床上常用的血管成像方法能够清晰地实现血管的成像,但对静脉血管网的成像效果难以满足临床需求。笔者利用临床获批的荧光染料吲哚菁绿(ICG)开展了前臂血管的近红外二区(NIR-II)荧光成像,结合人工智能算法获得分辨率更高的血管NIR-IIb荧光图像,更准确地描绘浅表细小血管的直径。在此基础上,笔者继续结合Fluent流体仿真模拟方法,辅助医生在术前判断主干引流静脉,并在术中结扎中选择主干引流静脉进行保留,对大侧枝引流静脉进行结扎,提高患者肾透析血液通路手术的成功率。利用荧光血管造影技术结合模拟方法引导肾透析血液通路手术将桡动脉接入头静脉,手术的早期通畅率为100%(8/8),而接受常规手术的对照组的早期通畅率为73.33%(11/15)。本研究验证了NIR-II荧光血管造影技术的安全性和有效性,并在此基础上进一步验证了荧光成像结合人工智能算法在肾透析血液通路手术中潜在的应用价值。

**关键词** 医用光学; 近红外二区荧光; 荧光血管造影; 吲哚菁绿; 人工智能; 计算机仿真模拟

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL231471

## 1 引言

血管成像在医学诊断中扮演着重要角色,它可以用于疾病的诊断、观察疾病的进展、进行手术规划和导航以及评估患者的预后等<sup>[1-2]</sup>。浅表血管主要负责组织的供养、散热和体温调节,并通过血液循环发挥免疫调节和血压调节等功能<sup>[3]</sup>。在临床手术中,术前浅表血管成像和手术术野内血管显示对于减少出血、进行手术导航和路径规划以及术后血供恢复等都有一定作用。临床上常用的血管成像方法包括计算机断层血管造影(CTA)、磁共振血管成像(MRA)、超声成像(US)和数字减影血管造影(DSA)<sup>[4]</sup>。然而,由于浅表血管与周围组织在质地和颜色上相似,传统的成像手段无法快速、无接触地对其进行成像。

荧光成像具有高灵敏度、高空间分辨率、实时成像和操作方便等优点,在生物医学研究领域受到广泛关注,并在许多临床场景中发挥着重要作用<sup>[5-8]</sup>。荧光成像利用荧光染料标记成像对象,并通过成像系统获取

成像对象的荧光信息。目前已有几种常见的小分子近红外荧光染料,如亚甲基蓝、荧光素钠和吲哚菁绿(ICG)<sup>[9]</sup>,被批准用于临床<sup>[10]</sup>。上述荧光染料主要利用可见光(380~650 nm)和近红外一区(700~900 nm, NIR-I)荧光进行成像。近红外二区(NIR-II)利用1000~1700 nm波长的荧光成像,由于长波长的光子在组织中受到的散射和吸收较少,因而NIR-II荧光成像与NIR-I荧光成像相比具有更深的成像深度和更高的空间分辨率,更适用于生物医学成像,能够取得更加优质的成像效果<sup>[11-13]</sup>。

在目前的临床实践中,对微小血管成像的手段相对匮乏,医生通常依靠临床经验进行手术规划和操作。NIR-II荧光技术可以为医生提供常规检查难以提供的浅表血管网络的宏观视图,并且不使用X射线,避免了放射伤害<sup>[8,14-16]</sup>,同时不使用碘造影剂,因而不会对肾脏产生较大压力。笔者探索了NIR-II荧光血管造影和计算机技术相结合的方法<sup>[17-18]</sup>,在对患者血管进行宏观成像的同时,利用该方法对图像质量进行提升,以挖掘更多有价值的信息。

收稿日期: 2023-12-04; 修回日期: 2024-01-16; 录用日期: 2024-01-22; 网络首发日期: 2024-02-20

基金项目: 国家自然科学基金(92059207, 82272096)、中国科学院创新交叉团队项目(JCTD-2021-08)

通信作者: \*zhenhua.hu@ia.ac.cn; \*\*wangzj301hospital@163.com

## 2 原理与方法

### 2.1 NIR-II 荧光血管造影系统的构建

为了对患者的浅表血管网络进行成像,笔者构建了 NIR-II 荧光成像系统。该系统由 NIR-II 成像子系统和激光激发子系统组成。为了更加便捷地在手术过程中使用该成像系统,笔者构建了 NIR-II 成像移动推车,其上集成了计算控制器、显示屏幕、电源系统和激光器等。NIR-II 成像子系统由 NIR-II 相机(Cheetah-640CL TE3, Xenics, Belgium)与滤波片(FEL1000, Thorlabs, USA)共同构成。激光激发子系统由 808 nm 激光发生器、扩束器和光纤组成,其中激光发生器的最大功率为 20 W。

### 2.2 入组和排除标准

入组标准:1) 慢性肾病 AVF 围手术患者;2) 慢性肾病患者,且预期生存期 $\geq 12$ 周;3) 年龄 $\geq 18$ 周岁;4) 未发生其他脏器衰竭等病情;5) 能够理解试验要求,愿意且能够遵从试验和随访程序安排;6) 自愿同意参与研究并签署知情同意书。

排除标准:1) 对 ICG 或碘严重过敏;2) 患有任何全身性疾病;3) 感染人类免疫缺陷病毒或患有肝病;4) 怀孕或哺乳;5) 过去 30 d 内参加过其他临床试验。

该研究获得了中国人民解放军总医院伦理委员会的批准(S2022-253-1),并在中国临床试验注册中心注册(ChiCTR220062316)。

## 3 研究设计

### 3.1 前臂静脉血管网 NIR-II 荧光图像采集

首先使用构建的 NIR-II 荧光血管造影系统对前臂进行静脉 NIR-II 荧光血管造影,获取前臂血管的 NIR-II 荧光图像。

在术前准备过程中,先将 25 mg ICG 和 10 mL 无菌注射用水配制成溶液(注射用 ICG, 丹东医药有限公司, 中国),然后将患者的前臂放置在自行构建的 NIR-II 荧光血管造影系统成像视野内。打开激光发生器,将激光功率和曝光时间分别设置为  $5 \text{ mW/cm}^2$  和 50 ms。在绝大多数情况下,通过对侧肢体对患者注射 ICG 溶液。由于血管中的 NIR-II 荧光持续时间久,当需要判断复杂血管情况时,可以利用静脉灌注时序对患者静脉网引流进行观察。随后关闭室内常规照明,并于 5~10 s 内通过静脉推注 ICG 给药,同时密切监测患者的生命体征,以便发现任何潜在的不良反应。NIR-II 荧光通常在注射后 10 s 内通过系统检测到。

### 3.2 NIR-II 荧光血管造影技术与计算机技术相结合

#### 3.2.1 人工智能辅助图像处理方法

自行构建的 NIR-II 荧光血管造影系统获取的是血管的 NIR-II 荧光。研究表明,1500~1700 nm 波长的 NIR-IIb 荧光成像具有更高的空间分辨率,能够更精准地成像血管的直径,检测更细小的血管。然而,

ICG 荧光在 NIR-IIb 谱段的光强极弱,难以直接获得血管的 NIR-IIb 荧光图像。为了将血管的 NIR-II 荧光图像转换为高分辨率的 NIR-IIb 荧光图像,笔者利用人工智能(AI)技术对 NIR-II 荧光图像进行处理。简言之,首先构建光谱转换生成对抗网络,以学习从 ICG NIR-II 血管造影图像到 NIR-IIb 光谱(1500~1700 nm)的高分辨率血管造影图像的映射,进而构建生物组织 NIR-II 低分辨率和 NIR-IIb 高分辨率荧光图像的数据集。利用数据集对生成对抗网络进行训练,直接拟合生物组织中光子散射和自发荧光的减少过程,从而利用低分辨率的 NIR-II 荧光图像生成高分辨率的 NIR-IIb 荧光图像,实现图像质量和分辨率的提升。

#### 3.2.2 静脉网络血流的计算流模拟分析

通过结合 NIR-II 荧光和 Fluent 流体仿真方法实现静脉网络血流的计算流模拟分析。首先利用前臂血管的 NIR-II 图像重建个体静脉解剖结构,根据血管的 NIR-II 荧光图像勾画血管区域,利用表面渲染方法在平面生成血管的 2D 表面模型。由于静脉为引流回收血管,前臂静脉网通常位于皮肤表面,可抽象为平面图像;而 NIR-II 荧光图像本身是二维图像,能够实现两者最大程度的匹配。获得血管的 2D 表面模型后,将其导入 ANSYS 软件,利用 Fluent 流体仿真方法构建血液流速模型,模拟真实的血流状态。为了拓展该技术的应用范围,笔者基于肾透析血液通路(AVF)手术的场景设置血液流速参数。利用术前超声检查获得桡动脉的血流动力学数据,并将其接入血管的 2D 表面模型,这样就可以在术前模拟术后的血液流速。为了简化血液流速模型,将血管边界定义为刚性边界条件。笔者采用上述流体力学方法基于刚性边界创建理想化的血管模型,预测血流对血管壁的影响以及主要的血流分流情况;然后将血流的常规数据引入软件设置中,生成理想化的建模数据;最后生成血液流速的模拟图像(图 1)。

## 4 结 果

### 4.1 入组患者

2022 年 1 月至 2023 年 3 月期间,在中国人民解放军总医院入组了 12 名患者,并进行了临床评估,全部患者都签署了知情同意书。患者的临床特征如表 1 所示。

### 4.2 NIR-II 血管造影技术的安全性

对于用于临床的成像技术来说,安全性和可靠性是最重要的。本研究评估了患者注射 ICG 后常见并发症的发生率。4 名患者(33.33%)出现前臂染色,这是由 ICG 远端头静脉注射后在较浅表面血管中流动造成的。然而,染色的持续时间较短,通常在 30 min 内消失。同时,本研究还使用 CKD-epi 算法评估了 ICG 注射前后患者的估算肾小球滤过率(eGFR)。患者注射前后 eGFR(CKD-epi)无显著差异( $P=0.5394$ )。

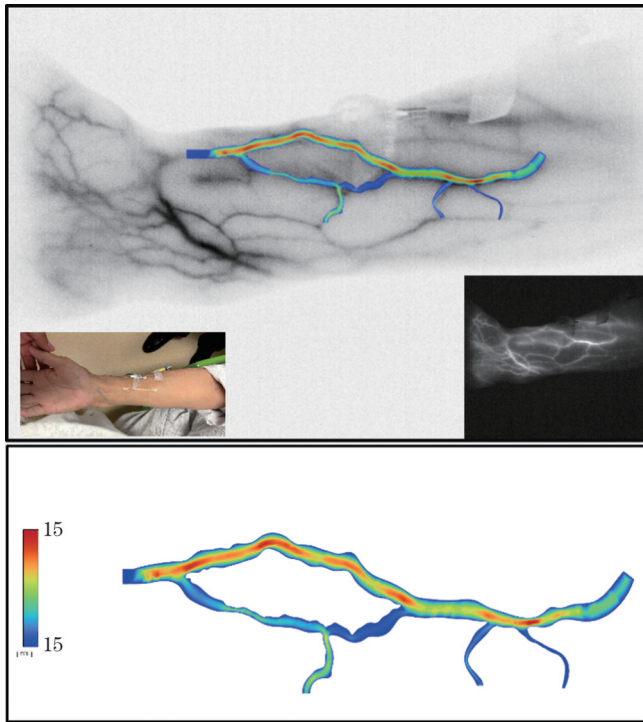


图1 根据 NIR-II 2D 荧光图像对患者拟进行手术位置静脉网接入桡动脉血流参数,以达到模拟术后的效果

Fig. 1 Based on NIR-II 2D fluorescence imaging, analyze the venous network and radial artery blood flow parameters at the surgical site to simulate postoperative outcomes

### 4.3 NIR-II 血管造影技术评估血管直径与超声成像结果的一致性

为了验证 NIR-II 评估前臂静脉直径的可靠性,使

用超声成像作为对照。固定由一名高年资超声科医生为患者进行同区域血管超声影像学检查,并对静脉走行进行血管描记。选择静脉上的特定测量点,标记静脉分支并测量血管直径、深度以及血液流速等信息。随后采集前臂 NIR-II 荧光图像,在荧光图像上测量相同测量点上的血管直径。将超声和 NIR-II 荧光获取的血管直径进行一致性分析。该数据集由 36 个测试点组成,平均荧光测量直径和超声测量直径分别为 2.84 mm 和 2.829 mm。配对 *t* 检验显示两种方法测得的血管直径数据没有显著差异 ( $P=0.864$ )。此外,通过计算组内相关系数 (ICC),确定 ICC (C, 1) 为 0.929 (置信区间为 0.866~0.963, 95%CI), ICC (C, K) 为 0.963 (置信区间为 0.928~0.981, 95%CI)。这些结果表明 NIR-II 荧光静脉造影和超声成像在测量血管直径方面具有良好的一致性 (图 2)。

### 4.4 AI 技术提升血管 NIR-II 荧光图像质量

关键的诊断和决策是通过人类的视觉判断做出的,而这需要高质量的图像。重建的高分辨率血管造影术图像的横截面荧光强度线清楚地显示了可分辨的血管及其分布。AI 技术显著提高了图像分辨率,并使血管边缘更清晰,实现了更精确的血管造影检查。在 AI 技术的帮助下,成本高效、低毒性的 ICG NIR-II 血管造影术可以成为其他临床成像方法的补充技术。笔者开发了一个光谱偏移生成对抗性网络,以学习从 ICG NIR-II 血管造影图像到 NIR-IIb 光谱 (1500~1700 nm) 高分辨率血管造影图像的映射 (图 3)。

表 1 患者基线

Table 1 Baseline characteristics of the study population

Characteristic	Fluorescence angiography group	Control group
Age (range)	56(18-75)	55(20-74)
Gender ( <i>n</i> )		
Male	9	8
Female	3	7
Renal insufficiency stage		
4	2	3
5	10	12
Renal anemia	9	10
Diabetes mellitus	8	9
Hypertension	11	13
Polycystic kidney	4	2
Hyperuricemia	2	5
Henoch-Schonlein purpura	1	0

### 4.5 NIR-II 荧光图像

本研究根据仿真模拟数据及 NIR-II 血管造影灌注图像信息,提示医生主干引流静脉,并引导医生结扎侧枝静脉,保护主干引流静脉,以保证患者获得较大血

流流量,从而增加手术成功率。在本研究中,对于通过模拟手术引导静脉结扎的所有患者(8名),术后在其手术部位的近心端约 8 cm 处,使用听诊器能听到呼吸样杂音,表明血流通畅。对于对照组接受常规手术的

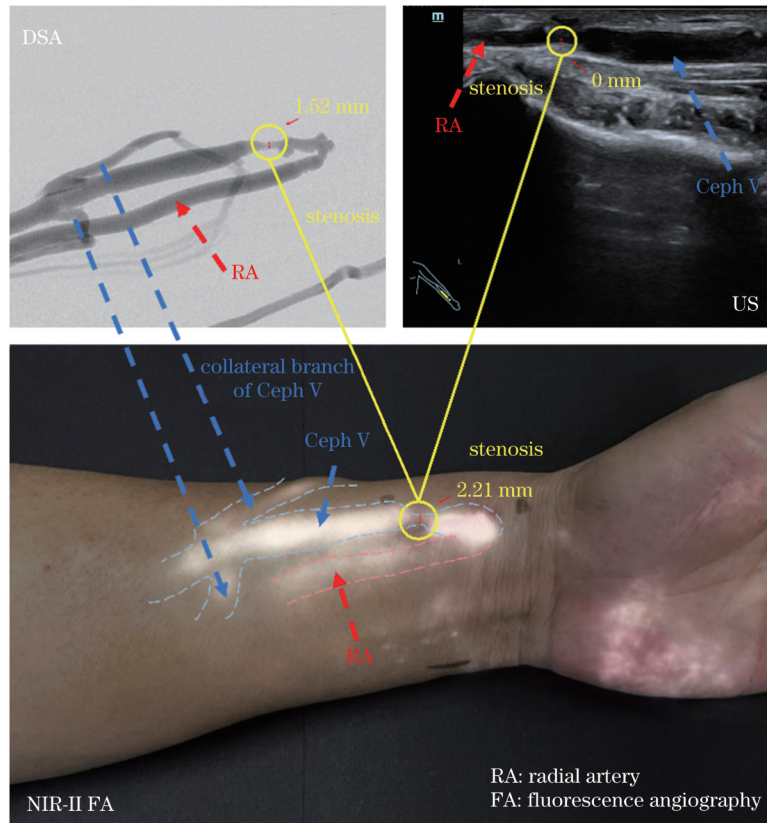


图 2 对患者术后血管管径进行测量,在受到压力的情况下部分血管在超声下无法显示

Fig. 2 Measurements of postoperative vascular diameters in patients, some blood vessels were not visible on ultrasound under pressure

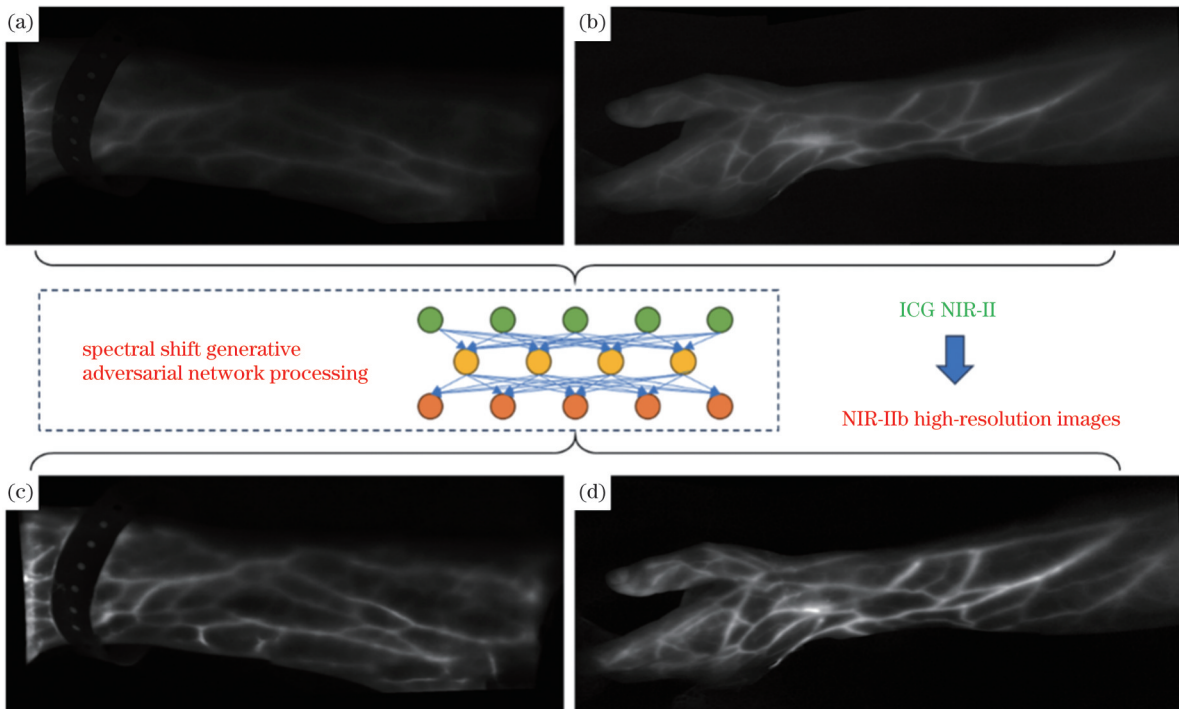


图 3 AI方法提升图像分辨率。(a)(b)血管的 ICG NIR-II 图像;(c)(d)经光谱转换生成对抗网络处理后的血管 NIR-IIb 高分辨率图像  
Fig. 3 Image resolution improvement through artificial intelligence method. (a)(b) ICG NIR-II images of vessels; (c)(d) NIR-IIb high-resolution images of vessels after spectral shift generative adversarial network processing

患者(15名),其中11名患者(73.33%)术后血流通畅,其余4名患者经听诊器诊断为血流通畅不良。静脉网络和动脉血管不同,动脉走行相对保守,静脉变异性相

比较大。因此基于优势引流静脉的选择和针对静脉的手术设计可以保证 AVF 吻合术后静脉血流保持高流量状态,从而达到更好的手术效果(图 4)。

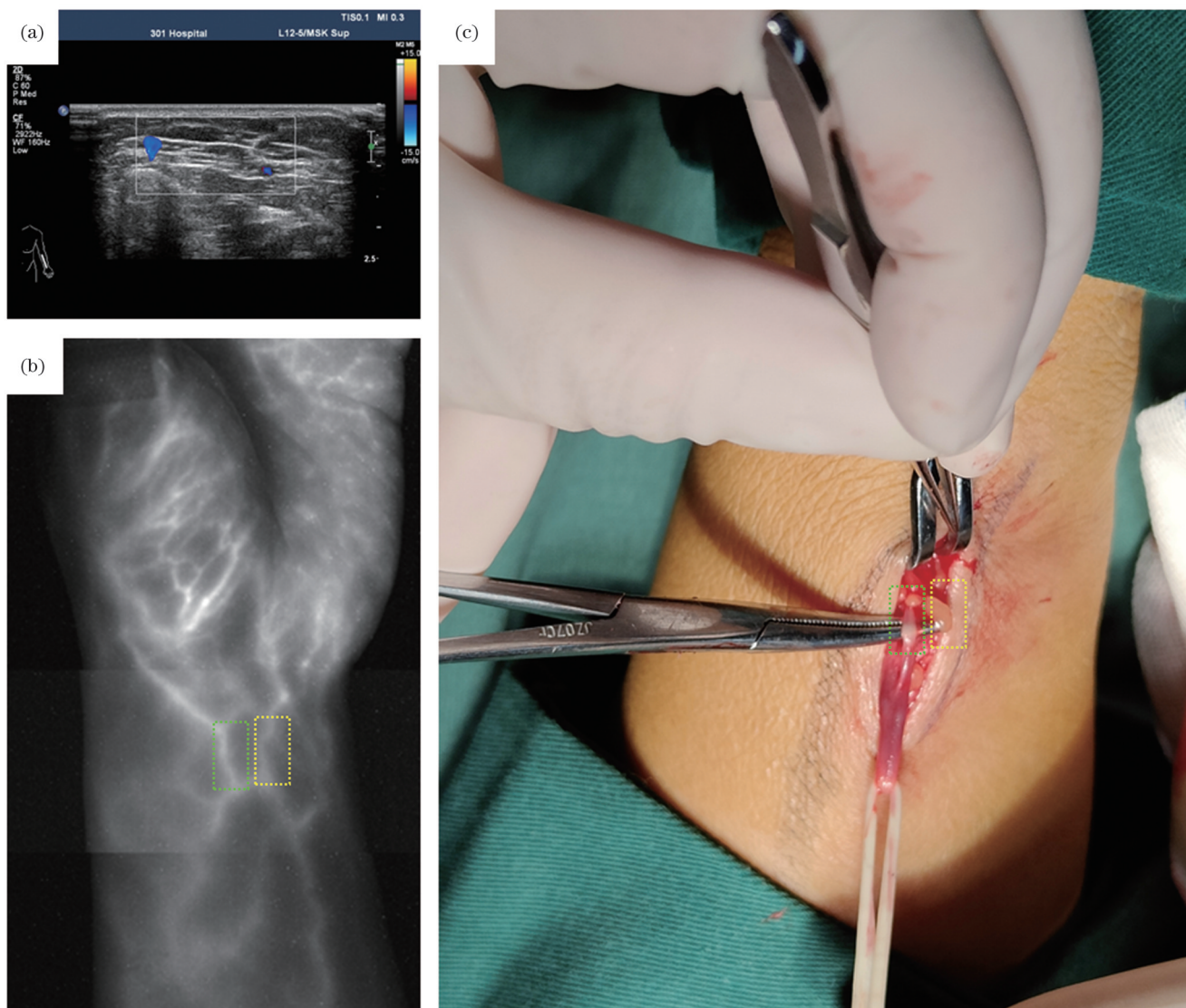


图4 游离前臂头静脉过程中在术中可见并行相似静脉,通过 NIR-II 血管造影观察头静脉的引流情况可以判断一支来自手背侧的静脉为头静脉主干,另一支来自掌侧的是头静脉和贵要静脉的交通支。(a)在超声上不能充分显示主干;(b)浅表血管网络的 NIR-II 宏观视图;(c)术中视图

Fig. 4 During the process of freeing the forearm cephalic vein, parallel similar veins can be seen during surgery. By observing the drainage of the cephalic vein through NIR-II angiography, we can judge that one vein originates from the dorsal side of the hand as the main trunk of the cephalic vein, and the other originates from a communicating branch on the palmar side, connecting the cephalic vein and the basilic vein. (a) The main trunk cannot be adequately displayed by ultrasound; (b) superficial vascular network imaged by NIR-II; (c) intraoperative view

## 5 讨 论

笔者构建了 NIR-II 荧光血管造影系统,并将其用于采集患者的浅表血管 NIR-II 荧光图像,同时通过患者肾功能情况证明了该方法相较于传统方法对肾脏更加友好。此外,将 NIR-II 血管造影技术与超声成像结果进行对比发现,二者具有较好的一致性。荧光血管造影的安全性和有效性得到了验证。由于 NIR-II 荧光成像具有持续时间长、无辐射等优势,医生可以利用 NIR-II 荧光实时观测患者的宏观血管信息,有助于医生做出手术判断。荧光造影技术未使用 X 射线,因此该技术的防护成本相较于传统影像方法也更加低廉,

无须特意使用铅墙和铅衣进行防护,可以较为便利地开展床旁诊疗。NIR-II 荧光造影使用的 ICG 造影剂与传统 X 射线造影技术所使用的优维显造影剂相比成本接近或略低。另外,该设备的采购价格远低于 X 射线设备。

然而,该技术在应用过程中仍存在挑战。由于荧光成像深度受到限制,而且人体肌肉等组织对荧光具有吸收和散射作用,较深的血管难以清晰成像。此外,由于获得的血管 NIR-II 荧光图像为二维图像,皮下交错的血管网络在 NIR-II 荧光图像上会相互重叠,给血管的识别造成了影响。在临床实际应用中,对于前臂水肿患者来说,由于体液对荧光的散射效应更强,血管

成像质量也会受到影响。一些患者也可能对本研究中使用的 ICG 造影剂过敏。荧光血管造影相比超声在设备采购成本上暂时并不具备优势。

在不久的将来,随着 NIR-II 荧光成像系统的进一步优化以及更先进的 NIR-II 荧光造影剂的研发与应用<sup>[19-20]</sup>,前臂静脉网络的 NIR-II 荧光图像将为临床工作提供有力的帮助。对 NIR 成像深度更深、分辨率更高是共同的追求,同时,随着成像技术的进步,NIR-II 2D 成像也将有能力转变为 3D 成像,从而克服血管之间重叠和复杂血管网结构显示的问题<sup>[21]</sup>。结合 AI 技术可以实现图像质量的大幅提高。将 NIR-II 长时间显示静脉血管网络的优势与血流动力学仿真模拟、AI 技术辅助分析相结合,可以更好地辅助医生在手术规划和术中途径上做出最优选择。

## 6 结 论

本研究验证了 NIR-II 荧光血管造影的安全性与可靠性,其成像结果与超声成像结果具有一致性。本研究通过 AI 技术优化图像信息联合仿真模拟技术预测了手术效果。在此基础上,利用获取的血管 NIR-II 荧光图像结合血流预测方法,辅助医生识别主干引流静脉,引导侧枝血管结扎与主干引流静脉保护,提高了 AVF 手术的成功率。

### 参 考 文 献

- [1] Shi X J, Zhang Z, Zhang Z Y, et al. Near-infrared window II fluorescence image-guided surgery of high-grade gliomas prolongs the progression-free survival of patients[J]. IEEE Transactions on Bio-Medical Engineering, 2022, 69(6): 1889-1900.
- [2] Bajwa A, Wesolowski R, Patel A, et al. Assessment of tissue perfusion in the lower limb: current methods and techniques under development[J]. Circulation: Cardiovascular Imaging, 2014, 7(5): 836-843.
- [3] Shan X F, Ouyang S Y, Cai Z G, et al. Evaluation of foot perfusion after fibula flap surgery[J]. The Journal of Craniofacial Surgery, 2014, 25(4): 1346-1347.
- [4] Gonzalez T V, Bookwalter C A, Foley T A, et al. Multimodality imaging evaluation of arteriovenous fistulas and grafts: a clinical practice review[J]. Cardiovascular Diagnosis and Therapy, 2023, 13(1): 196-211.
- [5] Ritter Z, Zámbo K, Balogh P, et al. *In situ* lymphoma imaging in a spontaneous mouse model using the Cerenkov luminescence of F-18 and Ga-67 isotopes[J]. Scientific Reports, 2021, 11: 24002.
- [6] Hu Z H, Fang C, Li B, et al. First-in-human liver-tumour surgery guided by multispectral fluorescence imaging in the visible and near-infrared-I/II windows[J]. Nature Biomedical Engineering, 2020, 4(3): 259-271.
- [7] Hong G S, Lee J C, Jha A, et al. Near-infrared II fluorescence for imaging hindlimb vessel regeneration with dynamic tissue perfusion measurement[J]. Circulation: Cardiovascular Imaging, 2014, 7(3): 517-525.
- [8] Hong G S, Lee J C, Robinson J T, et al. Multifunctional *in vivo* vascular imaging using near-infrared II fluorescence[J]. Nature Medicine, 2012, 18(12): 1841-1846.
- [9] 仇雨, 沈之阳, 丁海贞, 等. 近红外二区花菁染料在疾病应用中的研究进展[J]. 中国激光, 2024, 51(3): 0307105..
- [9] Qiu Y, Shen Z Y, Ding H Z, et al. Research advances of NIR-II cyanine dyes in disease applications[J]. Chinese Journal of Lasers, 2024, 51(3): 0307105.
- [10] Chang B S, Li D F, Ren Y, et al. A phosphorescent probe for *in vivo* imaging in the second near-infrared window[J]. Nature Biomedical Engineering, 2022, 6(5): 629-639.
- [11] Guo X Y, Li C J, Jia X H, et al. NIR-II fluorescence imaging-guided colorectal cancer surgery targeting CEACAM5 by a nanobody[J]. EBioMedicine, 2023, 89: 104476.
- [12] Qu Q J, Nie H L, Hou S, et al. Visualisation of pelvic autonomic nerves using NIR-II fluorescence imaging[J]. European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging, 2022, 49(13): 4752-4754.
- [13] Yang J Y, He S Q, Hu Z H, et al. *In vivo* multifunctional fluorescence imaging using liposome-coated lanthanide nanoparticles in near-infrared-II/Ia/Iib windows[J]. Nano Today, 2021, 38: 101120.
- [14] Vardi M, Nini A. Near-infrared spectroscopy for evaluation of peripheral vascular disease. A systematic review of literature[J]. European Journal of Vascular and Endovascular Surgery, 2008, 35(1): 68-74.
- [15] Cao C G, Deng S H, Wang B S, et al. Intraoperative near-infrared II window fluorescence imaging-assisted nephron-sparing surgery for complete resection of cystic renal masses[J]. Clinical and Translational Medicine, 2021, 11(10): e604.
- [16] Cao C G, Jin Z P, Shi X J, et al. First clinical investigation of near-infrared window IIa/Iib fluorescence imaging for precise surgical resection of gliomas[J]. IEEE Transactions on Bio-Medical Engineering, 2022, 69(8): 2404-2413.
- [17] Zhong L Z, Dong D, Fang X L, et al. A deep learning-based radiomic nomogram for prognosis and treatment decision in advanced nasopharyngeal carcinoma: a multicentre study[J]. EBioMedicine, 2021, 70: 103522.
- [18] Cai M S, Zhang Z Y, Shi X J, et al. Non-negative iterative convex refinement approach for accurate and robust reconstruction in cerenkov luminescence tomography[J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2020, 39(10): 3207-3217.
- [19] 韦族武, 杨森, 吴名, 等. 近红外二区荧光手术导航探针研究进展[J]. 中国激光, 2022, 49(5): 0507102.
- [19] Wei Z W, Yang S, Wu M, et al. Recent progress in near-infrared-II fluorescence imaging probes for fluorescence surgical navigation [J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(5): 0507102.
- [20] 刘嘉慧, 杨燕青, 马睿, 等. 有机近红外二区荧光探针研究进展 [J]. 中国激光, 2023, 50(21): 2107101.
- [20] Liu J H, Yang Y Q, Ma R, et al. Research progress of organic NIR-II fluorescent probes[J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(21): 2107101.
- [21] 邱嘉聆, 付庄, 金惠良, 等. 体表血管近红外三维成像系统与识别算法研究[J]. 光学学报, 2023, 43(9): 0917001.
- [21] Qiu J L, Fu Z, Jin H L, et al. Near-infrared three-dimensional imaging system and recognition algorithm for subcutaneous blood vessels[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(9): 0917001.

# Clinical Application of Computer-Assisted Second Near-Infrared Window Fluorescence Angiography in Surgical Creation of Hemodialysis Access

Li Lingbing<sup>1,2</sup>, Fu Lidan<sup>2,3</sup>, Shi Xiaojing<sup>2</sup>, Wang Yuanda<sup>4</sup>, Wang Zhijun<sup>1,4,5\*\*</sup>, Hu Zhenhua<sup>2,5\*</sup>

<sup>1</sup>*The Second Medical Center of Chinese PLA General Hospital, Beijing 100853, China;*

<sup>2</sup>*CAS Key Laboratory of Molecular Imaging, Beijing Key Laboratory of Molecular Imaging, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;*

<sup>3</sup>*School of Artificial Intelligence, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*

<sup>4</sup>*The First Medical Center of Chinese PLA General Hospital, Beijing 100853, China;*

<sup>5</sup>*National Key Laboratory of Kidney Diseases, Chinese PLA General Hospital, Beijing 100853, China*

## Abstract

**Objective** Vascular imaging is crucial for medical diagnosis, and it facilitates disease diagnosis, disease progression monitoring, surgical planning and navigation, and patient prognosis evaluation. However, conventional imaging methods encounter challenges in rapid and noninvasively imaging of superficial blood vessels because of the similarities in texture and color with surrounding tissues. In clinical surgery, preoperative superficial vascular imaging and intraoperative vascular display are beneficial for reducing bleeding, facilitating surgical navigation and path planning, and promoting postoperative blood supply recovery.

**Methods** A fluorescent imaging system in the second near-infrared window (NIR-II) to capture images of the forearm vascular network in patients was used in this study. The research involved 12 patients, with indocyanine green serving as a contrast agent for obtaining NIR-II images of the forearm blood vessels. These images were used to observe the anatomical structure of the venous vascular network. Furthermore, computer-aided analysis was employed to improve image quality, support surgical path planning and prognosis prediction, and provide valuable guidance for clinical practitioners.

**Results and Discussions** High-resolution and high-contrast images are captured using NIR-II fluorescence angiography. The clarity of these images are enhanced using artificial intelligence techniques. Computer simulation was employed to simulate venous network reflux. The agreement between the measurement results obtained from this technique and ultrasound was evaluated using the Bland Altman plot and consistency measurements.

**Conclusions** The acquired images are used to examine the anatomical structure of the venous vascular network and combined with blood flow simulation. This integration aims to assist clinicians in determining optimal surgical trajectories and predicting outcomes. The application of NIR-II fluorescence imaging and computational simulation techniques has potential in providing valuable support for surgeons in performing various vascular procedures in the future.

**Key words** medical optics; NIR-II fluorescence; fluorescence angiography; indocyanine green; artificial intelligence; computational simulation