



doi:10.7659/j.issn.1005-6947.250468  
http://dx.doi.org/10.7659/j.issn.1005-6947.250468  
China Journal of General Surgery, 2026, 35(1):88-96.

· 专题研究 ·

## 增强现实导航联合荧光腹腔镜技术在肝中叶肿瘤切除术中的应用

沈正超<sup>1,2</sup>, 陈志远<sup>2</sup>, 奚士航<sup>2</sup>, 潘璇<sup>2</sup>, 钱道海<sup>2</sup>, MUHAMMAD Danish Irshad<sup>2</sup>, 王小明<sup>1,2</sup>

(1. 安徽医科大学第五临床医学院, 安徽 合肥 230000; 2. 皖南医学院第一附属医院 肝胆外科, 安徽 芜湖 241000)

### 摘要

**背景与目的:** 肝中叶肿瘤解剖位置复杂, 邻近第一、第二肝门及重要肝静脉系统, 腹腔镜下精准定位肿瘤边界及关键脉管结构难度较大。单纯依赖术中超声或吲哚菁绿荧光成像 (ICG-FI) 存在深部结构显示不足等局限。本文旨在探讨增强现实 (AR) 导航联合 ICG-FI 技术在腹腔镜肝中叶肿瘤切除术中的临床应用价值。

**方法:** 回顾性分析 2022 年 5 月—2025 年 3 月皖南医学院第一附属医院肝胆外科应用 AR 导航联合 ICG-FI 技术行腹腔镜肝中叶肿瘤切除术的 38 例患者临床资料。观察术中导航效果、手术相关指标及围手术期结局。

**结果:** 38 例患者均顺利完成手术, 无中转开腹。肿瘤荧光显影率为 100%。平均手术时间为 (324.9 ± 132.4) min, 中位术中出血量为 400 (50~1 200) mL。平均配准误差为 (6.3 ± 0.6) mm。中位预测血管数为 6 (4~8) 条, 中位验证血管数为 7 (5~10) 条。所有患者均实现 R<sub>0</sub> 切除, 平均切缘宽度为 (1.5 ± 0.5) cm。术后并发症发生率为 13.2%, 无腹腔出血、气体栓塞或肝衰竭等严重并发症。中位术后住院时间为 9 (4~20) d。中位随访时间 20 个月, 未见肿瘤复发。

**结论:** AR 导航联合 ICG-FI 技术可在腹腔镜肝中叶肿瘤切除术中实现对关键脉管结构的术中预测与验证, 精准控制肝切除平面, 提高 R<sub>0</sub> 切除率及手术安全性, 具有良好的临床应用前景。

### 关键词

肝切除术; 腹腔镜; 增强现实; 手术导航系统; 吲哚花青绿

中图分类号: R657.3

## Application of augmented reality navigation combined with indocyanine green fluorescence imaging in laparoscopic resection of central hepatic tumors

SHEN Zhengchao<sup>1,2</sup>, CHEN Zhiyuan<sup>2</sup>, XI Shihang<sup>2</sup>, PAN Xuan<sup>2</sup>, QIAN Daohai<sup>2</sup>, MUHAMMAD Danish Irshad<sup>2</sup>, WANG Xiaoming<sup>1,2</sup>

(1. The Fifth Clinical Medical College, Anhui Medical University, Hefei 230000, China; 2. Department of Hepatobiliary Surgery, the First Affiliated Hospital of Wannan Medical College, Wuhu, Anhui 241000, China)

**基金项目:** 安徽省卫生健康中青年科研基金资助项目 (AHWJ2024Aa30111); 安徽省临床医学研究转化专项基金资助项目 (202427b10020049); 安徽省高校自然科学研究重大基金资助项目 (2023AH040254)。

**收稿日期:** 2025-08-21; **修订日期:** 2026-01-19。

**作者简介:** 沈正超, 皖南医学院第一附属医院副主任医师, 主要从事肝胆胰外科临床与基础方面的研究。

**通信作者:** 王小明, Email: wxm6901@126.com

**Abstract**

**Background and Aims:** Laparoscopic resection of centrally located hepatic tumors remains technically demanding due to the complex anatomical relationships with major vascular structures. Conventional intraoperative ultrasound or indocyanine green fluorescence imaging (ICG-FI) alone has limitations, particularly in visualizing deep anatomical structures. This study aimed to evaluate the clinical value of augmented reality (AR) navigation combined with ICG-FI in laparoscopic resection of central hepatic tumors.

**Methods:** A retrospective analysis was conducted on 38 consecutive patients who underwent laparoscopic resection of central hepatic tumors guided by AR navigation combined with ICG-FI between May 2022 and March 2025. Intraoperative navigation performance, surgical parameters, and perioperative outcomes were assessed.

**Results:** All 38 procedures were completed laparoscopically without conversion. The intraoperative tumor fluorescence detection rate was 100%. The mean operative time was  $(324.9 \pm 132.4)$  min, and the median intraoperative blood loss was 400 (50–1 200) mL. The mean registration error was  $(6.3 \pm 0.6)$  mm. The median number of predicted and verified vessels was 6 (4–8) and 7 (5–10), respectively. R<sub>0</sub> resection was achieved in all patients, with a mean surgical margin of  $(1.5 \pm 0.5)$  cm. The postoperative complication rate was 13.2%, with no severe complications such as intra-abdominal hemorrhage, gas embolism, or liver failure. The median postoperative hospital stay was 9 (4–20) days. During a median follow-up of 20 months, no tumor recurrence was observed.

**Conclusion:** The combined use of AR navigation and ICG-FI enables intraoperative prediction and verification of critical vascular structures and facilitates precise control of the transection plane in laparoscopic resection of central hepatic tumors. This technique improves surgical precision and safety and shows promising clinical potential.

**Key words**

Hepatectomy; Laparoscopes; Augmented Reality; Surgical Navigation Systems; Indocyanine Green

**CLC number:** R657.3

根据2020年的估计数据,肝癌是第六大最常见的癌症,也是第三大最常见的癌症死亡原因<sup>[1]</sup>,手术仍然是肝癌患者获得长期生存的重要手段<sup>[2]</sup>。自1991年Reich等<sup>[3]</sup>首次报道后,腹腔镜肝切除术因其创伤小、恢复快等优势成为肝脏外科的常规手术方式<sup>[4-5]</sup>。然而,对于位置复杂的肝肿瘤,尤其是位于肝中叶者,由于该区域涵盖Couinaud IV、V、VIII段,居于肝脏中央,紧邻第一、第二肝门及下腔静脉,解剖结构最为复杂,曾被视为肝脏外科的“手术禁区”。与常规部位的腹腔镜肝切除相比,腹腔镜下肝中叶肿瘤切除面临三大挑战:解剖关系复杂、肿瘤边界难以精确定位、术中出血风险高。具体而言,手术中存在“术中出血控制困难”“离断平面判断不准”等临床痛点。

随着吲哚菁绿荧光成像(ICG-FI)及增强现实(AR)导航技术的发展,外科医生看到了解决这一问题的前景。AR是一种交互式的体验,它使

用现实世界中现有的环境,在此基础上施加计算机生成的虚拟信息,以增强用户体验<sup>[6]</sup>。目前,AR导航技术已逐渐应用于临床外科<sup>[7-8]</sup>,其优势在于能够术中直接显示重要管道结构,有助于术者进行术中预判及决策。AR导航联合ICG-FI技术在腹腔镜肝切除术的术中导航中展现出显著潜力,有助于实现更精准的肝切除。本研究将该技术应用于腹腔镜下肝中叶肿瘤切除,初步积累了相关经验,现将结果报告如下。

## 1 资料与方法

### 1.1 临床资料

回顾性分析2022年5月—2025年3月皖南医学院第一附属医院肝胆外科术中应用了AR导航联合ICG-FI技术的38例肝中叶肿瘤患者资料。手术患者的纳入标准:(1)肿瘤位于肝中叶,最大径 $\leq 7$  cm

且数目 $\leq 2$ 个；(2)符合肝脏手术基本条件，包括吲哚菁绿15 min滞留率(IGC-15)值及剩余肝脏体积满足安全切除要求。手术患者的排除标准：(1)病理证实为胆管细胞癌；(2)肿瘤侵犯邻近肝门主干或下腔静脉；(3)患者因其他原因无法耐受肝脏手术。收集并分析所有患者的围手术期临床资料，包括年龄、性别、肿瘤大小与位置、IGC-15、手术时间、术中出血量、术后住院时间、术后病理结果、并发症发生情况及术后随访信息。本研究经医院伦理委员会批准(审批号：2024223)，研究过程遵循《赫尔辛基宣言》的伦理准则。

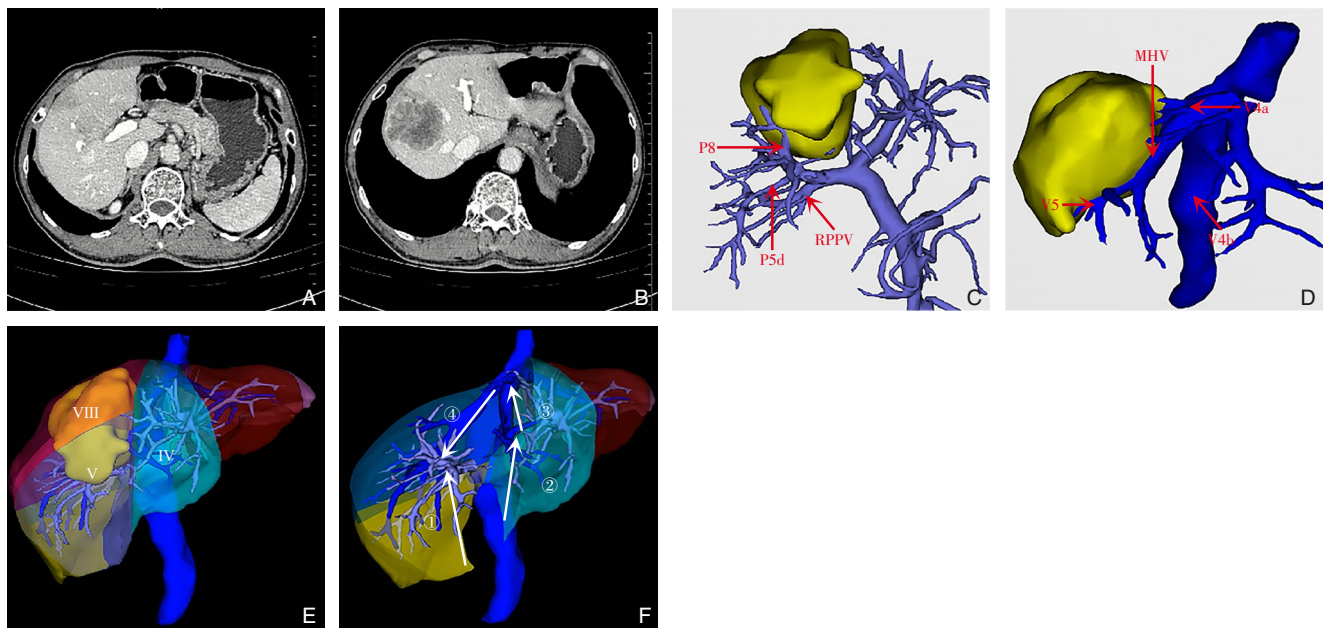
## 1.2 围手术期准备

在IGC-FI技术应用方面，所有患者术前均接受IGC肝功能储备检查，并依据IGC-15结果规划手

术时机。具体方法如下：IGC按0.5 mg/kg剂量静脉注射。若IGC-15 $< 10\%$ ，则于检查后3~5 d安排手术；若IGC-15 $\geq 10\%$ ，则手术时间安排在检查后5~7 d。

若行解剖性肝切除术，需显影目标肝段，采用以下两种方式之一：(1)靶肝段反染法：阻断目标肝段血流后，经外周静脉注射IGC 1 mL(浓度0.25 mg/mL)；(2)目标肝段正染法：术中寻及目标肝段门静脉分支后，经该分支注入IGC 1 mL(浓度0.025 mg/mL)。

所有患者术前均接受上腹部MRI及1 mm薄层CT检查，并基于CT数据进行肝脏三维重建，以明确肿瘤与周围血管的解剖关系，完成术前切除平面模拟及剩余肝体积评估(图1)。经多学科讨论，所有患者均具备手术指征并如期接受手术。



**图1 术前切除平面模拟** A-B: 肝中叶肿瘤与周围血管之间的关系；C: 三维重建中肿瘤与门静脉之间的关系(RPPV: 门静脉右后支, P8: VIII段门静脉支, P5d: V段门静脉背侧支)；D: 肿瘤与肝静脉之间的关系(MHV: 肝中静脉, V5: MHV V段分支, V4a: MHV IVa段分支, V4b: MHV IVb段分支)；E: 肿瘤位于肝中叶(V、VIII段)；F: 术前模拟切除路径[①经肝门板寻找右前肝蒂，沿肝蒂主干探查肿瘤右侧边界及V、VIII段肝蒂情况，离断VIII段肝蒂；②左侧切缘沿MHV开始切肝；③沿MHV主干解剖肝组织，在根部寻找肝右静脉(RHV)；④沿RHV从头侧到尾侧分离肝组织，至切除肝中叶肿瘤]

**Figure 1 Preoperative simulation of the resection plane** A-B: Relationship between the central hepatic tumor and surrounding vessels; C: Relationship between the tumor and the portal vein in three-dimensional reconstruction (RPPV: right posterior portal vein; P8: segment VIII portal branch; P5d: dorsal branch of segment V portal vein); D: Relationship between the tumor and hepatic veins (MHV: middle hepatic vein; V5: segment V branch of MHV; V4a: segment IVa branch of MHV; V4b, segment IVb branch of MHV); E: Tumor located in the central liver (segments V and VIII); F: Simulated resection pathway [① the right anterior hepatic pedicle was identified via the hepatic plate; along the main trunk of the pedicle, the right boundary of the tumor and the pedicles of segments V and VIII were explored, and the segment VIII pedicle was divided; ② parenchymal transection was initiated from the left margin along the course of the MHV; ③ the liver parenchyma was dissected along the main trunk of the MHV toward its root, where the right hepatic vein (RHV) was identified; ④ the liver parenchyma was then dissected along the RHV from the cranial to the caudal direction until complete resection of the central hepatic tumor was achieved]

### 1.3 AR导航联合ICG-FI技术

本研究所有手术操作均采用腹腔镜AR导航联合ICG-FI技术进行实时术中导航。AR导航基于“三维可视化混合现实导航系统V 1.0”(软件专利注册号:2023SR1234520)与“三维可视化混合现实腹腔镜投影导航系统V 1.0”(软件专利注册号:2023SR1234953)实现;ICG荧光显像则采用南京诺源科技有限公司相关系统完成。

AR导航技术的具体实现流程如下:首先将术前重建的三维模型投影至虚拟三维空间,再将实时采集的腹腔镜图像与三维背景融合,构建出可交互的手术导航环境。术中可实现图像配准、图像融合等功能。

### 1.4 手术方法

以腹腔镜下肝中叶肿瘤切除(VIII段切除+V段腹侧段切除+MHV部分切除)为例。肝切除过程中限制补液,控制中心静脉压维持在 $5\text{ cm H}_2\text{O}$  ( $1\text{ cm H}_2\text{O}=0.098\text{ kPa}$ )以下。患者取仰卧位,于脐下缘作小切口,气腹针穿刺入腹腔,充入 $\text{CO}_2$ 气体成 $13\text{ mmHg}$  ( $1\text{ mmHg}=0.133\text{ kPa}$ )气腹,换置Trocar进镜,采用“五孔”法放置套管。

进入腹腔后探查腹腔情况,未见明显异常后,打开荧光模式探查肝脏肿瘤情况,超声刀离断肝圆状韧带及镰状韧带,解剖第二肝门,显露肝左静脉、MHV、RHV,通过术中B超探查并大致了解肿瘤边界及肿瘤与周围管道的关系,标记MHV肝表面投影。超声刀切开小网膜囊,暴露肝十二指肠韧带左侧位置,为体外Pringle阻断做好准备<sup>[9-10]</sup>。打开AR显示屏,将腹腔镜图像与术前建立的三维模型同屏显示,将腹腔镜图像和三维模型叠加在一起,创建AR环境。

以胆囊及肝脏表面轮廓为参照完成图像配准,逆行切除胆囊,显露出Laennec膜(肝纤维囊)并沿其向肝门板方向分离。切除胆囊后,沿肝门板解剖并游离出左、右肝蒂。沿右肝蒂进一步分离,显露右前及右后肝蒂,继而沿右前肝蒂方向离断

肝实质。

在AR导航视野中,预先识别并离断右前肝蒂发出的V段腹侧支(V5v),同时验证并保护其背侧支(V5d)。继续沿右前肝蒂主干向深部游离,可见一支供应第VIII段的粗大管道,与AR模型进行实时比对、二次配准后,确认为右前肝蒂支配S8段的肝蒂分支。此时切换至ICG荧光模式,可见肿瘤压迫此支肝蒂,充分游离后予以离断。

左侧切缘沿标记的MHV走行平面开始离断肝实质,游离至静脉分叉处。通过AR比对,确认该分支位于MHV左侧,并以此预测MHV主干走行,进而解剖出MHV主干,继续沿其向第二肝门方向游离。在ICG荧光模式下观察MHV主干与肿瘤的关系,见肿瘤压迫MHV,遂调整切面,于MHV左侧游离并离断受压迫的MHV(图2)。继续向第二肝门方向游离,在AR静脉引导下预先识别并离断MHV的VIII段腹侧支(V8i)。游离至MHV根部后,显露RHV,并沿RHV自头侧向足侧进行解剖。游离RHV主干过程中,AR导航系统预测其VIII段背侧支(V8d)位置,仔细游离后予以离断(图3),最终完成肝中叶肿瘤的完整切除。

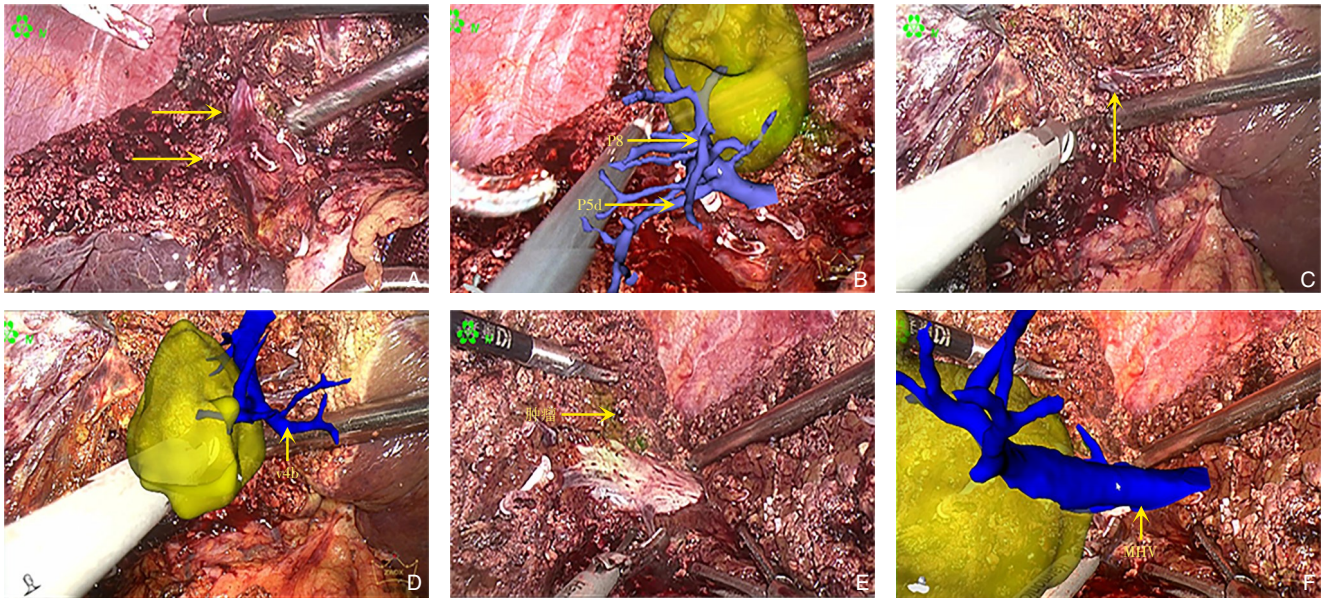
仔细断面止血后,打开荧光模式,检查是否有胆汁漏及肿瘤残余,断面予以可吸收止血纱布覆盖后,放置断面腹腔引流管1根,取出标本,术毕。

### 1.5 术后管理

所有患者术后常规应用保肝治疗,保持引流管通畅,术后第3~5天行上腹部CT检查,了解术区情况,出院后常规随访,随访截至2025年6月1日。

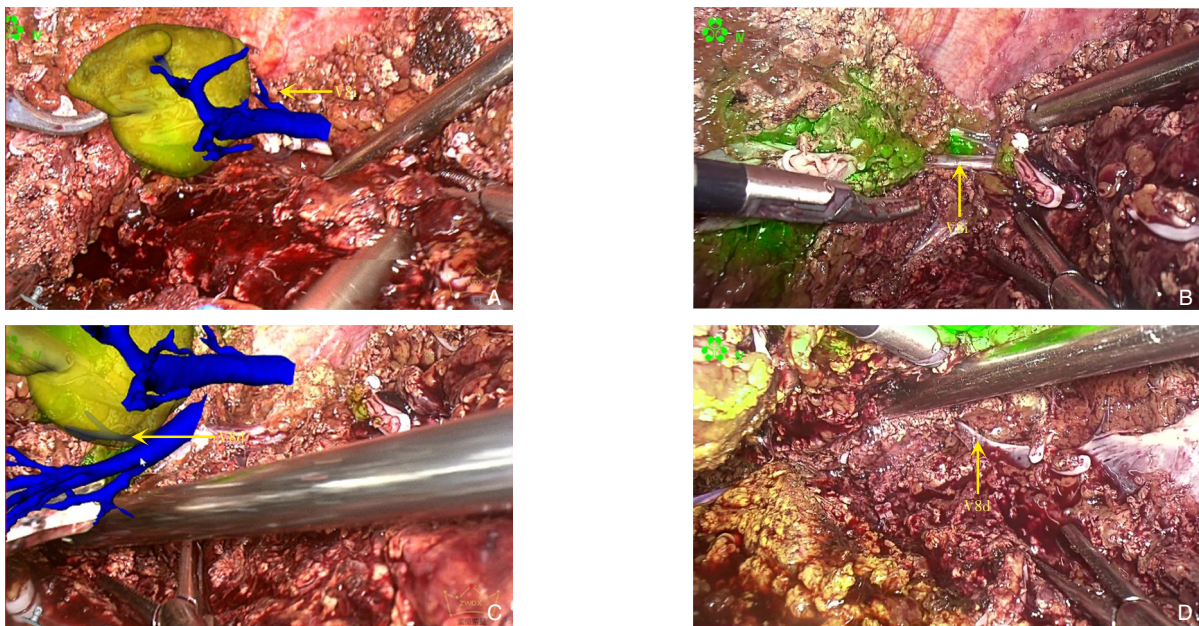
### 1.6 统计学处理

采用SPSS 23.0统计学软件进行处理,计量资料以例数(百分比) $[n(\%)]$ 表示。正态分布定量资料以均数 $\pm$ 标准差( $\bar{x}\pm s$ )表示,偏态分布定量资料以中位数(四分位间距) $[M(IQR)]$ 表示。



**图2 验证血管及调整肝切除平面** A-B: 沿右前肝蒂主干向深部分离, 发现分别走向VIII段和V段背侧的血管分支, 借助AR导航技术, 确认P8及P5d, 离断S8段肝蒂, 并注意保护P5d; C: 沿MHV远端切开肝实质后, 显露其远端分支, 但术中难以判断该分支位于MHV左侧或右侧; D: 经AR导航实时比对, 识别该分支为V4b; E: 沿此分支右侧进一步解剖, 见一粗大静脉贴邻肿瘤, 荧光腹腔镜下可见肿瘤与该静脉关系密切; F: 再次通过AR导航确认该静脉为MHV主干, 随即调整切肝平面, 转为沿MHV左侧分离, 最终离断受压迫的MHV段

**Figure 2 Intraoperative verification of vessels and adjustment of the transection plane** A-B: Identification of P8 and P5d along the right anterior pedicle using AR navigation, with division of the S8 pedicle and preservation of P5d; C: Exposure of a distal MHV branch after parenchymal transection; D: Identification of the branch as V4b by AR comparison; E: A large vein adjacent to the tumor observed under fluorescence mode; F: Confirmation of the MHV trunk by AR and adjustment of the transection plane



**图3 预测血管** A-B: 离断MHV后, 通过AR融合画面, 预测在远端有汇入MHV的第VIII段腹侧分支血管V8i, 通过仔细分离出V8i, 并予以离断; C-D: 发现RHV后, 预测汇入RHV的第VIII段背侧分支血管V8d, 沿RHV主干逐步游离后发现V8d, 避免了血管损伤导致的出血

**Figure 3 Intraoperative prediction of vascular branches using AR fusion imaging** A-B: Prediction and identification of V8i draining into the MHV, followed by careful dissection and division; C-D: Prediction and identification of V8d draining into the RHV, preventing vascular injury

## 2 结果

### 2.1 患者一般资料

38例患者中男28例,女10例;平均年龄( $63.1 \pm 3.4$ )岁;平均体质指数(BMI)( $24.2 \pm 1.2$ ) kg/m<sup>2</sup>;术前ICG-15为( $7.7 \pm 0.9$ )%;中位肝脏肿瘤长径为5(4~7)cm;肝硬化22例;肝功能Child-Pugh分级A级36例,B级2例,其余情况详见表1。

表1 38例患者一般资料

Table 1 The general clinical data of the 38 patients

特征	数值
性别[n(%)]	
男	28(73.7)
女	10(26.3)
年龄(岁, $\bar{x} \pm s$ )	63.1±3.4
BMI(kg/m <sup>2</sup> , $\bar{x} \pm s$ )	24.2±1.2
合并肝炎[n(%)]	
乙型肝炎	28(73.7)
丙型肝炎	3(7.9)
无肝炎	7(18.4)
上腹部手术史[n(%)]	10(26.3)
ICG-15(%, $\bar{x} \pm s$ )	7.7±0.9
肝硬化[n(%)]	22(57.9)
肝脏肿瘤长径[cm, <i>M(IQR)</i> ]	5(4~7)
肝功能Child-Pugh分级[n(%)]	
A	36(94.7)
B	2(5.3)
肿瘤位置[n(%)]	
VIII段	9(23.7)
V段	3(7.9)
IV段	2(5.3)
V+VIII段	12(31.6)
IV+V+VIII段	5(13.2)
IV+VIII段	3(7.9)
IV+V段	4(10.5)

### 2.2 术中资料

所有患者均顺利完成手术,无中转开腹。平均手术时间为( $324.9 \pm 132.4$ )min,中位术中出血量为400(50~1 200)mL,中位术中Pringle阻断次数为6(2~10)次,中位预测血管6(4~8)条,中位验证血管7(5~10)条,术中均未出现严重出血及气栓等严重并发症(表2)。38例患者的平均配准误差为( $6.3 \pm 0.6$ )mm。

### 2.3 术后资料

术后所有患者均实现R<sub>0</sub>切除,切缘距肿瘤边缘的平均距离( $1.5 \pm 0.5$ )cm。2例患者出现胸腔

积液,经保守治疗后好转;1例发生肺部感染,经抗感染、化痰等治疗后康复;1例出现胆汁漏,于术后半个月接受胆道支架植入术,术后5d拔除引流管。无患者发生腹腔出血或肝衰竭等严重并发症。患者术后中位住院时间为9(4~20)d(表3)。截至2025年6月1日,全部38例患者均完成术后随访,随访时间4~36个月,中位随访时间20个月。随访期间无患者需二次手术,未观察到肿瘤复发事件。

表2 38例患者的术中资料

Table 2 The intraoperative data of the 38 patients

项目	数值
手术方式[n(%)]	
解剖性肝切除	15(39.5)
非解剖性肝切除	23(60.5)
肿瘤直径[cm, <i>M(IQR)</i> ]	5(4~7)
手术切缘(cm, $\bar{x} \pm s$ )	1.5±0.5
配准误差(mm, $\bar{x} \pm s$ )	6.3±0.6
预测血管[条, <i>M(IQR)</i> ]	6(4~8)
验证血管[条, <i>M(IQR)</i> ]	7(5~10)
手术时间(min, $\bar{x} \pm s$ )	324.9±132.4
术中出血[mL, <i>M(IQR)</i> ]	400(50~1 200)
阻断次数[次, <i>M(IQR)</i> ]	6(2~10)

表3 38例患者的术后资料

Table 3 The postoperative data of the 38 patients

指标	数值
术后实验室指标[U/L, <i>M(IQR)</i> ]	
ALT	192(45~1 852)
AST	162(43~925)
胆红素[mmol/L, <i>M(IQR)</i> ]	22.8(8.2~53.1)
术后并发症[n(%)]	5(13.2)
切口感染	1(2.6)
胆汁漏	1(2.6)
胸腔积液	2(5.3)
肺部感染	1(2.6)
术后住院时间[d, <i>M(IQR)</i> ]	9(4~20)

## 3 讨论

在过去30年中,腹腔镜肝切除术因其独特的优势,逐渐获得了越来越多的认可,但腹腔镜手术仍存在许多缺点,如缺乏触觉反馈、视力受限以及无法看穿复杂的内部结构<sup>[11]</sup>。尤其在腹腔镜下肝中叶肿瘤的切除过程中,由于肿瘤周围管道丰富,存在断肝过程中肿瘤边界评估困难,过近则切缘不够,达不到根治标准;过远则容易损伤周围的重要脉管,造成致命性的大出血<sup>[12]</sup>或气体

栓塞<sup>[13]</sup>等严重并发症而危及患者生命。因此，如何实现肿瘤边界的精准定位和脉管导航，保障肿瘤的安全切缘、降低手术风险是腹腔镜下肝中叶肿瘤切除术的核心所在。

自2009年Ishizawa等<sup>[14]</sup>首次报道将ICG-FI技术用于肝切除手术导航以来，该技术已在肝胆胰肿瘤的诊断与手术中广泛应用<sup>[15-16]</sup>。ICG-FI在识别肝断面残余病灶、检出微小转移、术中实时界定肿瘤边界以及提升术后无瘤生存率等方面均具有重要价值<sup>[17-18]</sup>。研究表明，ICG-FI可成功检出术前影像或术中所见难以发现的浅表微小病灶（小至1~2 mm），显著提高了肿瘤检测的灵敏度<sup>[19]</sup>；此外，其对位于肝包膜下8~10 mm以内的肿瘤亦具有高度的检测可靠性<sup>[20]</sup>。本研究将荧光腹腔镜应用于腹腔镜肝肿瘤切除术，取得了良好效果。该技术可于术中快速定位肿瘤，并在切除过程中实时显示肿瘤边界，有助于术者预先判断并动态调整切除平面，从而提升了肝中叶肿瘤的R<sub>0</sub>切除率。然而，尽管荧光腹腔镜已广泛应用于腹腔镜肝切除，其在处理肝中叶肿瘤时仍面临挑战：该区域肿瘤常毗邻重要血管及胆道，手术难度大；部分肿瘤位置深在，腹腔镜下难以精确定位。单纯依赖ICG-FI，无法实现重要脉管结构的术前预测与术中指引，因而在肝切除平面的把控上存在不足，易导致术中出血增多甚至中转开腹。

近年来，随着AR导航技术在腹腔镜肝切除术的逐步应用，已有中心报道相关成功案例<sup>[21-22]</sup>。目前本中心技术与其他团队的技术<sup>[23-24]</sup>相比较，本研究中的AR导航技术还具有对门静脉系统、肝静脉系统的高选择性图像融合，能够达到对管道的二级，甚至三级结构的单独配对显影，避免了对不感兴趣的其他管道的显影，减少对术中的视觉干扰，有利于术中预测及验证重要管道结构，从而作出正确抉择。

AR导航联合ICG-FI技术的优势在于，一方面AR导航有效弥补了ICG-FI的深度显影局限。ICG-FI能清晰地勾勒肝表面肿瘤轮廓，但对深部重要脉管显示不足。AR通过将包含肿瘤与血管的三维重建模型叠加于实时术野，提供了“透视”般的深度视野，使术者能在切肝前预知深部结构，规划出既能根治肿瘤又能保护关键管道的安全切面<sup>[25]</sup>。另一方面ICG-FI为AR模型提供了关键的实时验证与动态补充。ICG-FI显示的肿瘤实际边界与肝段染色<sup>[26-28]</sup>，可与AR虚拟轮廓实时比对，验证

导航准确率并及时校正偏差。AR提供宏观引导，ICG-FI实现微观验证，共同助力在腹腔镜肝中叶肿瘤切除术中实现精准切除与最大保护。

自2022年5月应用该技术以来，本中心已成功在AR导航联合ICG-FI技术下完成38例腹腔镜肝中叶肿瘤切除术，所有病例均达到R<sub>0</sub>切除，平均切缘宽度为15 mm，术中未发生严重出血或气体栓塞等并发症。AR导航的实施首先依赖于图像配准。术中先依据肝脏轮廓及胆囊位置完成初始配准；在需要进一步验证或预测肿瘤、血管及胆管走行时，则根据已解剖的关键管道或肿瘤位置进行再次配准。目前该配准过程仍需手动交互完成。本研究38例患者的平均配准误差为（6.3 ± 0.6）mm。在可接受的配准误差范围内，外科医生关注的核心在于该技术能否在术中实现对血管的验证与预测。在辨识管道来源方面，传统方法主要依赖术者对术前影像的记忆进行大致推断，误差较大，易导致重要血管损伤。而AR导航可实时验证所遇管道的属性，辅助术者快速决策其取舍。本研究中，平均血管验证7（5~10）次。在血管预测方面，肝中叶肿瘤切除中定位MHV至关重要。以往多依赖术中超声在肝表面大致定位，难点在于由足侧向头侧推进时，常遇到肝内MHV远端分支，难以判断MHV主体位于切线的左侧或右侧。AR导航可根据分支血管的走行与位置，动态预测MHV主干的可能位置，并可对关键区域的管道结构进行实时预警。本研究38例患者平均进行血管预测6（4~8）次，有效降低了术中出血风险。

当然，目前AR导航技术仍然存在较多需要解决的难题。如何对所感兴趣的图像进行持续快速地追踪及如何对重点关注的结构进行快速选择性的融合，是后续攻关的重点。目前已报道出来的相关解决方案大多处于实验阶段<sup>[29-30]</sup>，未真正应用于临床。在腹腔镜肝脏的切除过程中，针对图像跟踪、渲染融合，增强肝脏内解剖结构立体化和可视化，真正做到“透视”效果及提前预警，还需要外科医师与计算机工程师的通力合作。

本研究尚存在以下局限性：首先，研究为单中心回顾性设计，存在选择性偏倚等固有限局；其次，样本量较小，可能影响结果的普遍性；此外，缺乏与传统腹腔镜手术或单一技术（单独AR或单独ICG-FI）的对照组进行比较，因此优势评估仍需前瞻性、随机对照研究进一步验证；最后，

技术层面,配准过程尚未实现全自动化,仍依赖手动操作,未来需开发实时、自动的追踪系统以优化手术流程。

本研究中,在腹腔镜肝中叶肿瘤的切除的过程中,利用AR导航联合ICG-FI技术进行实时导航,一方面可对目标管道选择性的呈现及导航,隐去非目标管道,减少了对术者的视觉干扰,起到“透视”重要管道的作用,减少术中出血;另一方面通过影像融合技术,精准把控肝切除平面,从而达到优化手术流程的目的,提高了手术的精准性和安全性,具有广阔的发展前景。

作者贡献声明:沈正超、王小明负责研究设计和论文撰写;陈志远、奚士航、潘璇负责病例收集与数据分析;王小明、钱道海负责手术操作;MUHAMMAD Danish Irshad负责英文润色。所有作者均阅读并同意最终稿件。

利益冲突:所有作者均声明不存在利益冲突。

#### 参考文献

- [1] Sung H, Ferlay J, Siegel RL, et al. Global cancer statistics 2020: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries[J]. *CA Cancer J Clin*, 2021, 71(3):209-249. doi:10.3322/caac.21660.
- [2] 中华人民共和国国家卫生健康委员会医政司.原发性肝癌诊疗指南(2024年版)[J]. *中国普通外科杂志*, 2024, 33(4):475-530. doi:10.7659/j.issn.1005-6947.2024.04.001.  
Department of Medical Administration, National Health Commission of the People's Republic of China. Guidelines for the diagnosis and treatment of primary liver cancer (2024 edition) [J]. *China Journal of General Surgery*, 2024, 33(4): 475-530. doi: 10.7659/j.issn.1005-6947.2024.04.001.
- [3] Reich H, McGlynn F, DeCaprio J, et al. Laparoscopic excision of benign liver lesions[J]. *Obstet Gynecol*, 1991, 78(5 Pt 2):956-958.
- [4] 李军,姚磊,胡芳远,等.腹腔镜与开腹肝切除术治疗肝细胞癌临床疗效的真实世界比较研究[J]. *中国普通外科杂志*, 2024, 33(2): 244-256. doi:10.7659/j.issn.1005-6947.2024.02.011.  
Li J, Yao L, Hu FY, et al. Clinical efficacy of laparoscopic versus open hepatectomy in the treatment of hepatocellular carcinoma: a real-world comparative study[J]. *China Journal of General Surgery*, 2024, 33(2):244-256. doi:10.7659/j.issn.1005-6947.2024.02.011.
- [5] 本田五郎.日本腹腔镜肝切除术的进展与挑战[J]. *中国普通外科杂志*, 2025, 34(1):28-32. doi:10.7659/j.issn.1005-6947.240587.  
Honda G. Advancements and challenges in laparoscopic hepatectomy in Japan[J]. *China Journal of General Surgery*, 2025, 34(1):28-32. doi:10.7659/j.issn.1005-6947.240587.
- [6] Khaddad A, Bernhard JC, Margue G, et al. A survey of augmented reality methods to guide minimally invasive partial nephrectomy[J]. *World J Urol*, 2023, 41(2):335-343. doi:10.1007/s00345-022-04078-0.
- [7] Ghaednia H, Fourman MS, Lans A, et al. Augmented and virtual reality in spine surgery, current applications and future potentials[J]. *Spine J*, 2021, 21(10): 1617-1625. doi: 10.1016/j.spinee.2021.03.018.
- [8] Bopp MHA, Corr F, Saß B, et al. Augmented reality to compensate for navigation inaccuracies[J]. *Sensors*, 2022, 22(24): 9591. doi: 10.3390/s22249591.
- [9] Shen Z, Jiang B, Chu H, et al. The application of a single-hand-operated hepatic pedicle clamping clamp in laparoscopic hepatectomy[J]. *Langenbecks Arch Surg*, 2024, 409(1): 146. doi: 10.1007/s00423-024-03334-8.
- [10] 沈正超,储鸿鹏,蒋彬,等.可单手操作肝蒂阻断钳在腹腔镜肝切除术中应用研究[J]. *中国实用外科杂志*, 2025, 45(3):334-339. doi:10.19538/j.cjps.issn1005-2208.2025.03.18.  
Shen ZC, Chu HP, Jiang B, et al. Study on the application of a single-hand-operable hepatic pedicle clamp in laparoscopic hepatectomy[J]. *China Journal of General Surgery*, 2025, 45(3): 334-339. doi:10.19538/j.cjps.issn1005-2208.2025.03.18.
- [11] Chen P, Jiao J, Xue H, et al. Exploration of umbilical hernia incidence and etiology in 753 cases of single-incision laparoscopic surgery: a retrospective analysis[J]. *BMC Surg*, 2025, 25(1): 224. doi:10.1186/s12893-025-02958-x.
- [12] Jiang Y, Yadav DK, Wang G, et al. Preoperative predictors of unplanned conversion in laparoscopic liver resection: a multicenter cohort analysis[J]. *Front Oncol*, 2025, 15: 1678775. doi: 10.3389/fonc.2025.1678775.
- [13] Shimizu K, Usuda M, Kakizaki Y, et al. Cerebral infarction by paradoxical gas embolism detected after laparoscopic partial hepatectomy with an insufflation management system: a case report[J]. *Surg Case Rep*, 2023, 9(1):34. doi:10.1186/s40792-023-01611-0.
- [14] Ishizawa T, Fukushima N, Shibahara J, et al. Real-time identification of liver cancers by using indocyanine green fluorescent imaging[J]. *Cancer*, 2009, 115(11): 2491-2504. doi: 10.1002/cncr.24291.
- [15] 宋兴超,马啸,杨伟斌,等.腹腔镜超声联合正染ICG荧光导航下解剖性肝右后段及右前背侧段切除术1例报告(附视频)[J]. *中国普通外科杂志*, 2025, 34(6):1219-1227. doi:10.7659/j.issn.1005-6947.240644.  
Song XC, Ma X, Yang WB, et al. A case report of laparoscopic anatomical resection of the right posterior segment and right anterior dorsal subsegment of the liver guided by intraoperative ultrasound combined with positive ICG fluorescence navigation (with video) [J]. *China Journal of General Surgery*, 2025, 34(6):

- 1219-1227. doi:10.7659/j.issn.1005-6947.240644.
- [16] 陈姜, 王春荣, 曹家洪, 等. ICG 荧光导航联合 Laennec 膜入路在腹腔镜左半肝切除术的应用[J]. 中国普通外科杂志, 2025, 34(1): 88-95. doi: 10.7659/j.issn.1005-6947.240673.
- Chen J, Wang CR, Cao JH, et al. Application of ICG fluorescence navigation combined with the Laennec's capsule approach in laparoscopic left hepatectomy[J]. China Journal of General Surgery, 2025, 34(1):88-95. doi:10.7659/j.issn.1005-6947.240673.
- [17] Wang XY, Teh CSC, Ishizawa T, et al. Consensus guidelines for the use of fluorescence imaging in hepatobiliary surgery[J]. Ann Surg, 2021, 274(1):97-106. doi:10.1097/sla.0000000000004718.
- [18] Achterberg FB, Bijlstra OD, Slooter MD, et al. ICG-fluorescence imaging for margin assessment during minimally invasive colorectal liver metastasis resection[J]. JAMA Netw Open, 2024, 7(4):e246548. doi:10.1001/jamanetworkopen.2024.6548.
- [19] Cassinotti E, Al-Taher M, Antoniou SA, et al. European Association for Endoscopic Surgery (EAES) consensus on Indocyanine Green (ICG) fluorescence-guided surgery[J]. Surg Endosc, 2023, 37(3): 1629-1648. doi: 10.1007/s00464-023-09928-5.
- [20] Sposito C, Maspero M, Belotti P, et al. Indocyanine green fluorescence-guided surgery for gastrointestinal tumors: a systematic review[J]. Ann Surg Open, 2022, 3(3): e190. doi: 10.1097/AS9.0000000000000190.
- [21] Zhou BH, Chao L, Guo XH. Comment on "Efficacy of laparoscopic parenchyma-sparing hepatectomy using augmented reality navigation combined with fluorescence imaging for colorectal liver metastases: a retrospective cohort study using inverse probability treatment weighting analysis"[J]. Int J Surg, 2025, 111(12):10001-10002. doi:10.1097/JS9.0000000000003281.
- [22] Wang D, Hu H, Zhang Y, et al. Efficacy of augmented reality combined with indocyanine green fluorescence imaging guided laparoscopic segmentectomy for hepatocellular carcinoma[J]. J Am Coll Surg, 2024, 238(3): 321-330. doi: 10.1097/XCS.0000000000000912.
- [23] 祝文, 曾小军, 胡浩宇, 等. 应用增强现实与混合现实导航预防腹腔镜肝切除术中出血价值研究[J]. 中国实用外科杂志, 2022, 42(3):298-302. doi:10.19538/j.cjps.issn1005-2208.2022.03.06.
- Zhu W, Zeng XJ, Hu HY, et al. The research and practice of augmented reality and mixed reality navigation in the prevention of hemorrhage for 3D laparoscopic hepatectomy[J]. Chinese Journal of Practical Surgery, 2022, 42(3): 298-302. doi: 10.19538/j. cjps. issn1005-2208.2022.03.06.
- [24] Ramalhinho J, Yoo S, Dowrick T, et al. The value of Augmented Reality in surgery-A usability study on laparoscopic liver surgery[J]. Med Image Anal, 2023, 90: 102943. doi: 10.1016/j. media.2023.102943.
- [25] Zhu W, Zeng X, Hu H, et al. Perioperative and disease-free survival outcomes after hepatectomy for centrally located hepatocellular carcinoma guided by augmented reality and indocyanine green fluorescence imaging: a single-center experience[J]. J Am Coll Surg, 2023, 236(2):328-337. doi:10.1097/XCS.0000000000000472.
- [26] 张传海, 周毅, 王一帆, 等. 基于“红/黄交界线”胆囊板入路联合 ICG 荧光导航的腹腔镜解剖性肝切除(附视频)[J]. 中华肝脏外科手术学电子杂志, 2024, 13(1):62-67. doi:10.3877/cma.j.issn.2095-3232.2024.01.012.
- Zhang CH, Zhou Y, Wang YF, et al. Laparoscopic anatomical hepatectomy via cystic plate approach using "peritoneal reflection" combined with ICG fluorescence navigation (video attached) [J]. Chinese Journal of Hepatic Surgery:Electronic Edition, 2024, 13(1): 62-67. doi:10.3877/cma.j.issn.2095-3232.2024.01.012.
- [27] 胡森焱, 徐冬, 方健, 等. ICG 荧光显影 Laennec 膜入路腹腔镜解剖性肝切除的临床研究[J]. 中华普外科手术学杂志: 电子版, 2024, 18(5): 513-516. doi: 10.3877/cma. j. issn. 1674-3946.2024.05.012.
- Hu SY, Xu D, Fang J, et al. Clinical study of laparoscopic anatomic hepatectomy by laennec membrane approach with ICG fluorescence imaging[J]. Chinese Journal of Operative Procedures of General Surgery:Electronic Edition, 2024, 18(5):513-516. doi: 10.3877/cma.j.issn.1674-3946.2024.05.012.
- [28] 王峥, 尤楠, 贺永刚, 等. 穿刺正染 ICG 荧光导航腹腔镜解剖性肝 VII 段切除术 1 例报告(附视频)[J]. 中国普通外科杂志, 2024, 33(7):1043-1050. doi:10.7659/j.issn.1005-6947.2024.07.003.
- Wang Z, You N, He YG, et al. A case report on laparoscopic anatomical liver segment VII resection with ICG fluorescence-guided puncture positive staining(with video)[J]. China Journal of General Surgery, 2024, 33(7):1043-1050. doi:10.7659/j.issn.1005-6947.2024.07.003.
- [29] Teatini A, Pelanis E, Aghayan DL, et al. The effect of intraoperative imaging on surgical navigation for laparoscopic liver resection surgery[J]. Sci Rep, 2019, 9(1): 18687. doi: 10.1038/s41598-019-54915-3.
- [30] 许阳, 成剑文, 王鹏翔, 等. 腹腔镜下肝脏手术增强现实三维影像导航平台的构建与应用[J]. 中国临床医学, 2023, 30(1):97-103. doi:10.12025/j.issn.1008-6358.2023.20221844.
- Xu Y, Cheng JW, Wang PX, et al. Construction and application of augmented reality 3D image navigation platform for laparoscopic liver surgery[J]. Chinese Journal of Clinical Medicine, 2023, 30(1): 97-103. doi:10.12025/j.issn.1008-6358.2023.20221844.

( 本文编辑 熊杨 )

**本文引用格式:**沈正超, 陈志远, 奚士航, 等. 增强现实导航联合荧光腹腔镜技术在肝中叶肿瘤切除术中的应用[J]. 中国普通外科杂志, 2026, 35(1):88-96. doi:10.7659/j.issn.1005-6947.250468

**Cite this article as:** Shen ZC, Chen ZY, Xi SH, et al. Application of augmented reality navigation combined with indocyanine green fluorescence imaging in laparoscopic resection of central hepatic tumors[J]. Chin J Gen Surg, 2026, 35(1): 88-96. doi: 10.7659/j. issn.1005-6947.250468