· 专家笔谈 ·

吲哚菁绿荧光染色技术在解剖性肝切除术中的应用现状

季军，黄纪伟
四川大学华西医院肝脏外科，四川 成都 610041

［摘要］ 随着对肝脏功能解剖学研究的不断深入以及荧光腹腔镜设备的逐步普及，吲哚菁绿荧光染色辅助下的解剖性肝切除术逐渐成为目前治疗肝脏肿瘤的主要手段之一，有效弥补了传统肝切除术中难以精准标记深部肝段间分界的不足。此文结合国内外研究进展，综述了吲哚菁绿荧光染色技术在解剖性肝切除术中的应用，探讨了不同染色方法的优势与局限性，并对未来在肝脏外科领域的潜力与发展方向进行了展望。

［关键词］ 肝切除术；肝脏肿瘤；吲哚菁绿；荧光染色
［中图分类号］R657.3　［文献标识码］A　**DOI**：10.3969/j.issn.1003-5591.2025.01.002

Current application of indocyanine green fluorescence imaging in anatomical liver resection

Ji Jun, *Huang Jiwei*
Department of Hepatic Surgery, *West China Hospital of Sichuan University*, *Sichuan Chengdu* 610041, *China*
Corresponding author: *Huang Jiwei*, *Email*: *huangjiwei@wchscu.cn*

［**Abstract**］ With the continuous advancement of functional anatomy of the liver and the widespread use of fluorescence laparoscopic equipment, indocyanine green fluorescence imaging-assisted anatomical liver resection has gradually become a main stream for treating liver tumors. It effectively compensates for the difficulty of accurately marking deep liver segment boundaries in traditional liver resection. This article, combining domestic and international research progress, reviewed the application of indocyanine green fluorescence imaging for liver segment identification in anatomical liver resection. It also discussed the advantages and limitations of different staining techniques and provided an outlook on the future development.

［**Key words**］ Liver resection; Liver tumors; Indocyanine green; Fluorescence imaging

基于对肝脏功能解剖学的深入研究，20 世纪末，Makuuchi 和 Takasaki 分别提出了经典的解剖性肝切除（anatomic liver resection，ALR）理论[1]和基于 Glisson 系统的解剖分段理论[2]。理论强调通过血流阻断或染色技术，在手术过程中精确标记肝脏的亚肝段、肝段或肝叶边界，并借助术中超声（intraoperative ultrasound，IOUS）引导，整块切除荷瘤肝组织，从而提高病人的肿瘤学获益[3]。然而，肝脏的实际门静脉流域分段与传统的 Couinaud 肝脏分段存在一定差异。根据肝脏铸型标本显示，肝段之间的界限实际上是类似“国境线”的三维不规则曲面，并且存在一定比例的解剖变异[4]。因此，传统的依据缺血线和解剖性结构来确定肝实质离断平面也许并不足够精准。如何在术中更加实时精准地为肝实质离断进行导航是 ALR 需要进一步解决的技术问题。

吲哚菁绿（indocyanine green，ICG）是一种亲水性近红外荧光染料。进入人体后，ICG 与血浆蛋白结合并被肝脏特异性摄取，经过胆道排泄，无须经过肠肝循环代谢[5]。ICG 经肝脏摄取后可通过近红外光激发，使含 ICG 的肝组织发出绿色荧光。由于

基金项目：国家重点研发计划（2023YFB3810004）
作者简介：季军，硕士，主要从事肝脏肿瘤治疗相关研究，Email：jijun0317@163.com
通信作者：黄纪伟，主任医师，教授，博士生导师，主要从事肝胆胰腺良恶性疾病的外科治疗与研究，Email：huangjiwei@wchscu.cn

肝脏肿瘤组织对ICG的摄取和排泄功能通常受损或完全缺失，病变区域会表现出相比于正常肝组织更为持久的荧光信号。这一荧光现象可辅助外科医生发现新的病变、界定肿瘤边界，并识别肿瘤的类型及分化程度等[6-7]。2008年，Aoki等[8]首次报告将ICG注射到门静脉分支中进行肝段特定染色，并借助荧光染色进行ALR。与传统的肝缺血线法以及美蓝、靛红等染色方法相比，ICG荧光染色技术能够更加清晰、持久地显示肝脏表面和肝段间深部组织的解剖分界[8-9]。研究表明，ICG荧光染色不仅能够有效减少肝切除术后的并发症，还能提高切缘阴性率[10]。本文结合国内外研究进展及临床实际应用，介绍ICG荧光染色技术的常见用法并探讨其在ALR中的临床应用选择。

一、门静脉染色入路

（一）反染法

在ALR中，反染法是指术中通过阻断目标肝段的门静脉，随后从外周静脉注射ICG，使得目标肝段以外的肝脏显现荧光，从而实现肝段间解剖边界的可视化[10-11]。据报道，反染法的ICG剂量差异很大，范围为0.025～25 mg，比较常用的ICG剂量为2.5 mg[12]。ICG的剂量过高会导致受染肝段的荧光强度过强，且染色范围可能向周围肝段扩散，从而影响染色质量（带有荧光增益可调节功能的腹腔镜能相对改善染色成像效果）。因此在临床应用中，建议先予以0.25 mg ICG（浓度为0.025 mg/mL或0.05 mg/mL），再根据实际观察到的染色效果进行追加。此外，为尽量避免外周ICG通过肝动脉或其他交通支进入目标肝段，应采用鞘外解剖妥善阻断目标肝段的Glisson蒂[13]。

理论上，术者若能熟练掌握Glisson蒂鞘外解剖技术，反染法可以应用于任何肝段的染色[14]。但是解剖暴露不同肝段Glisson蒂的难度和耗时不一，反染法在临床实践中常适用于目标肝段Glisson蒂接近第一肝门的肝切除，如肝S2～S6切除及左右半肝切除等[10]。在肝段切除术中，特别是S2、S3、S5和S6，由于解剖结构清晰、Glisson蒂表浅且血管变异少，非常适合反染操作。在此过程中，术者仅需寻找并显露相应肝蒂，在缺血线或IOUS引导下确认目标肝段后，便可通过结扎或钳夹肝蒂实现阻断，随后注射ICG进行反染，获得较好的染色效果。寻找控制目标肝蒂时，由于不同个体解剖变异和分支类型有一定差异，应该结合术前三维重建以及术中超声和缺血线，采用“拼图”原则尽量让反染范围包含肿瘤且有1 cm切除边界为佳，而不应被传统的Couinaud分段思维束缚。对于左内叶即S4反染，推荐降低肝门板后采用左侧入路先找寻肝蒂，逐一处理肝蒂各分支后再使用反染法进行染色。S5肝蒂邻近第一肝门，易于显露，但在解剖过程中需特别注意肝S8和S6的分支血管。S6肝蒂位于Rouviere沟内，可分为主干型和分支型，其中分支型常具有3支以上分支，并且其位置和走行常有变异。因此，在这种情况下，建议优先选择反染法，术前需充分评估肝蒂解剖变异情况并灵活运用IOUS[15-16]。ICG反染法也适合右前叶、左外叶等联合肝段切除及左、右半肝切除[17]，较正染法更加便捷确切，染色效果更均匀，但需在术中妥善处理副肝左动脉、膈动脉、胆囊静脉等肝外血供及静脉回流[18]。另外，对于S7和S8的反染，由于目标肝蒂的位置相对较深，且分支类型变化较多，建议采取肝门板膜解剖技术进行显露。对于一些肝实质丰满或脂肪肝的病例，笔者的经验是利用CUSA或者Harmonic超声刀清除围肝门1～2 cm深的肝实质，以便获得更清晰的肝门视野和更宽阔的解剖空间，但应注意操作应保持在鞘外。2021年第32届日本肝胆胰外科学年会中，大部分与会专家也赞同Glisson蒂鞘外解剖较鞘内解剖更具优势[19]。随着手术时间的延长，荧光染色边界可能会因肝段间血管交通向未染色区域偏移，导致目标肝段体积略小于实际体积。在这种情况下，可以通过IOUS引导实时修正肝段间的分界平面，或通过提高荧光摄像头的对比度来减少偏差，当然也可以通过有丰富经验的主刀医生主观将断肝平面偏向荧光一侧扩大切除范围来修正。此外，反染法也适用于目标肝段门静脉闭塞或癌栓情况，因为该方法避免了门静脉穿刺，更符合无瘤原则。

反染法失败原因大多与未完全阻断目标肝段的流入道及肝段间存在交通支有关[12]，比如未完全阻断目标肝段Glisson蒂、潜在细小分支、胆囊静脉回流及肝段间侧支循环等。因此，为确保良好的荧光显影效果，术前应通过二维或三维影像对血管条件和变异情况进行充分评估，术中应考虑切除胆囊并彻底阻断目标肝段的Glisson蒂及肝外血供[14,18]。若染色效果实不理想，可切换至白光模式，借助缺血线和IOUS引导完成肝段切除。

（二）正染法

正染法是指通过鞘内解剖显露门静脉或在IOUS引导下，使用穿刺针直接向目标肝段的门静

脉分支内注入ICG染料，从而使荷瘤肝段在荧光显像下显示荧光[10-11]。不同文献报道中，正染法采用的ICG剂量同样存在范围较宽的问题，从0.025～12.5 mg，较为常用的剂量为0.25 mg，为反染法的1/10[12]。临床推荐使用浓度为0.025 mg/mL的染料，具体剂量应根据目标肝段的体积来确定，以避免因染料过量导致周围肝组织的污染。虽然正染法依靠IOUS引导可无须切开肝实质，直接对目标肝段染色，无须阻断肝动脉，并可重复穿刺，但术者必须具备良好的超声引导下穿刺技术，所对应的学习曲线更陡峭[20]。

正染法的适用范围一方面受限于术者的超声引导下穿刺技术，另一方面受限于目标肝段肝蒂的空间位置、走行、分支数目及直径等因素。临床实践中，S2、S3、S5肝蒂通常变异较少，易于穿刺，同样适合进行超声引导下的正染；而对于肝脏深面、位置较高的S7、S8及部分亚肝段切除，正染法也表现出较高的便捷性[21]。其中，S7位于肝脏的后上部，与周围肝段的界限不明显，肝右静脉及段间静脉有较多变异，可能导致解剖标志较难辨识[13]。S7肝蒂大多位于门静脉右后支根部，多为1～2支主干，正染后出现的清晰界线解决了离断过程中缺少“路标”的难题。而肝S8紧邻腔静脉、肝中静脉等多个重要血管结构，术中分离操作风险较高，因此适合在分离前通过正染标记出界线并结合IOUS引导，在较为安全的“血管裸区”进行肝实质离断以减少不必要的损伤和失血。S8肝蒂分为主干型和分支型，在分支数量较少的情况下，可对分支进行逐个穿刺正染；但如果分支数量多（大于3支）且直径较细（小于2 mm）的情况下，可先染色部分分支，并利用IOUS定位肝中静脉作为解剖标志进行分离，阻断S8肝蒂后可再进行反染辅助辨认断肝平面或在超声评估后直接换用反染法。对于S6肝蒂，正染法同样适用于主干型或分支较少的病例。正染法也适合需要进行多个不同位置的亚肝段和（或）肝段切除的情况，相比于反染法更为省时便捷。另外，针对荷瘤肝段的门静脉或肝静脉阻塞的情况，2017年Kobayashi等[22]报道了“counter staining”与“paradoxical negative staining”现象，即向目标肝段注入ICG染料后，染料可能逆流至周围肝段并造成染色但荷瘤肝段未被染色，虽然是一种正染技术，但显示出类似反染法的效果。

ICG正染法要想取得良好的染色效果，前提是在IOUS下正确识别荷瘤肝段的所有门静脉分支[13,18]。若漏认或错认门静脉分支，会造成染色不均、染色范围偏差甚至荧光污染整个肝脏。另外，对于肿瘤压迫肝段Glisson蒂的情况，正染法可能导致不必要的健康肝实质染色和切除。对于穿刺点的选择也非常重要，过于靠近分叉位置，可能导致ICG反流到健康肝实质，同样导致过度染色而切除健康肝脏的问题。因此，在进行染色时，应充分游离肝脏，为穿刺针和超声探头提供充足空间，并选择离血管分叉远的穿刺点。在染色过程中，缓慢推注ICG时，应保持穿刺针斜面朝上，以减少染料逆流至周围。在大范围肝切除术中，正染法可能因ICG剂量不当导致染色不均或周围肝组织的污染。因此，建议在Glisson蒂显露较易时，考虑转换为反染法，从而提高染色的成功率。

二、动脉染色入路

临床上，由于目标门静脉被肋骨或肿瘤遮挡、门静脉直径过细、膈肌或心脏活动干扰等，常规正染法难以完成荷瘤肝段的荧光染色。并且，对于Glisson蒂三级分支以上的锥形单元（根据肝脏血供来源，Takasaki提出将各肝段分为6～8个更小的锥形单元作为可安全手术切除的最小单位[2]）或亚肝段切除，许多肝脏外科医生也因穿刺难度大而面临着无法完成门静脉正染的挑战。并且，在锥形单元这一层面，门静脉与肝静脉的引流区域不一致，且交通支繁多、缺乏明确的解剖标志[21]。尽管Glisson系统三级分支及以上节段存在许多变异分支，但对应肝动脉往往是遵循门静脉分支走行的[23]。对此，学者们把目光转到了同一Glisson系统中的肝动脉，并结合介入技术与ICG染色技术，探索新的解决方案。2016年，法国学者Diana等[24]首次在杂交手术室中报道了超选择性肝动脉ICG荧光染色技术。2017年，Ueno等[25]首次将该技术应用于ALR中的肝段染色，并利用栓塞剂封堵血流，避免ICG洗脱。经肝动脉进行ICG染色，可以获得更清晰且持久的荧光显像质量，并根据手术需求选择栓塞锥形单元的大小以完全覆盖肿瘤区域[26-27]。此外，在肿瘤背景下，肝脏出现的“新生未成对动脉”并不与Glisson系统伴行[28]，常规手段难以对其染色显影，此时也可进行超选择性的ICG荧光染色辅助显影，从而获得更为完整的荷瘤肝段流域边界。介入下的动脉造影本身亦是一种术前评估手段，能够发现术前影像学检查难以发现的异位动脉供血与微小病灶。

根据介入染色与肝脏切除是否同期进行，经肝动脉ICG荧光染色可分为一步法和两步法两种。

一步法指在杂交手术室进行ICG染色联合荧光腹腔镜肝切除；而两步法指先在介入手术室完成ICG动脉染色，后再进行肝切除，通常间隔时间不超过7.5 h[29]。类似于经肝动脉化疗栓塞术中的超选供血动脉造影流程，介入医师通过动脉造影确定肿瘤供血动脉后，将ICG稀释并与碘油混合制备成为栓塞染色剂，经微导管注入靶动脉内进行染色，当栓塞染色剂在导管尖端停滞或反流时表明达到栓塞终点，确定栓塞完全后即可进行肝脏切除，术中可通过IOUS再次确认肿瘤是否位于荧光显示范围内，由于碘油的注入，超声下可以看到染色肝段的高回声范围，获得类似于超声造影的效果，从而可以从超声层面进一步明确肝实质深部的染色边界。根据本中心的临床实践经验[29-30]，经肝动脉ICG荧光染色可用于局限于单一肝段且肿瘤长径不大于5 cm的肝脏病变，尤适用于肝后上段病变、肝脏储备功能低、难以实施Glissonean入路的病例。然而，这一技术仍处于起步阶段，且临床应用中存在一些局限性。例如，额外的介入操作会增加手术时间和成本，且该技术暂不适用于多节段切除或病变晚期的病例。此外，额外的多支肝外动脉供血或肝内动静脉分流的情况也可能导致染色失败，因此仍需在实际应用中谨慎评估。

三、展望与总结

作为一项已应用10余年的技术，如今ICG荧光染色在精准肝切除时代下的作用举足轻重。然而，这一技术仍存在多方面的优化空间。(1)新型成像技术的结合与创新。三维可视化重建技术能够在术前评估阶段精准模拟目标门静脉流域情况，并能在术中优化穿刺点定位，提高染色成功率。同时，术中实时导航技术将术前三维重建模型与术中实时场景相结合，不仅能够清晰展示肝脏内部结构，还可结合ICG荧光实现解剖边界的精准识别[31-32]。另外，近红外二区荧光成像相比于原本的一区荧光成像有着更高的信噪比和深层组织穿透能力[33]，在识别微小病灶和复杂手术场景中展现出更大的潜力。(2)荧光染料本身的性能优化。目前常用的ICG染料存在着穿透深度有限、信号持续时间较短等不足，对其分子结构和理化性质的改良将为术中的精准切除提供更有力的支持[34]。此外，新型荧光染料的研发亦是未来技术发展的重要方向[35]。

总之，ICG荧光染色技术的进步反映了肝脏外科从传统经验性操作向精准化、个体化治疗的转变，其发展潜力不容忽视。不同的染色方法为术者提供了多样选择，这也促使实践者们不断探索各方法在不同病理类型、肝段切除复杂程度中的具体适用性。需要说明的是，不同染色方法理论上根据不同的病人情况以及术者经验均可选择实施，并无绝对优劣可言；荧光染色导航的ALR可能比传统以解剖结构为依据的ALR更直观、更精准，但相关的诸多问题，例如两种方法标记的目标边界是否一致，ALR是否需要全程显露肝静脉，以及ALR在提高病人的肿瘤学获益方面等等，均还存在很多争议和不确定性，亟待未来更多的研究来解答。

利益冲突　所有作者均声明不存在利益冲突

参　考　文　献

[1] Makuuchi M, Hasegawa H, Yamazaki S. Ultrasonically guided subsegmentectomy[J]. Surg Gynecol Obstet, 1985, 161(4): 346-350.

[2] Takasaki K. Glissonean pedicle transection method for hepatic resection: a new concept of liver segmentation[J]. J Hepato Biliary Pancreat Surg, 1998, 5(3): 286-291. DOI: 10.1007/s005340050047.

[3] Shindoh J, Makuuchi M, Matsuyama Y, et al. Complete removal of the tumor-bearing portal territory decreases local tumor recurrence and improves disease-specific survival of patients with hepatocellular carcinoma[J]. J Hepatol, 2016, 64(3): 594-600. DOI: 10.1016/j.jhep.2015.10.015.

[4] Shindoh J, Mise Y, Satou S, et al. The intersegmental plane of the liver is not always flat: tricks for anatomical liver resection[J]. Ann Surg, 2010, 251(5): 917-922. DOI: 10.1097/sla.0b013e3181d773ae.

[5] Reinhart MB, Huntington CR, Blair LJ, et al. Indocyanine green[J]. Surg Innov, 2016, 23(2): 166-175. DOI: 10.1177/1553350615604053.

[6] Ishizawa T, Saiura A, Kokudo N. Clinical application of indocyanine green-fluorescence imaging during hepatectomy[J]. Hepatobiliary Surg Nutr, 2016, 5(4): 322-328. DOI: 10.21037/hbsn.2015.10.01.

[7] Ishizawa T, Masuda K, Urano Y, et al. Mechanistic background and clinical applications of indocyanine green fluorescence imaging of hepatocellular carcinoma[J]. Ann Surg Oncol, 2014, 21(2): 440-448. DOI: 10.1245/s10434-013-3360-4.

[8] Aoki T, Yasuda D, Shimizu Y, et al. Image-guided liver mapping using fluorescence navigation system with indocyanine green for anatomical hepatic resection[J]. World J Surg, 2008, 32(8): 1763-1767. DOI: 10.1007/s00268-008-9620-y.

[9] 方驰华，曾思略，杨剑. 吲哚菁绿分子荧光影像在原发性肝癌的应用进展[J]. 腹部外科，2020, 33(3): 167-170. DOI: 10.3969/j.issn.1003-5591.2020.03.001.

[10] Wang X, 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.

[11] Ishizawa T, Zuker NB, Kokudo N, et al. Positive and negative staining of hepatic segments by use of fluorescent imaging techniques during laparoscopic hepatectomy[J]. Arch Surg,

2012, 147(4): 393-394. DOI: 10.1001/archsurg.2012.59.

[12] Wakabayashi T, Cacciaguerra AB, Abe Y, et al. Indocyanine green fluorescence navigation in liver surgery: a systematic review on dose and timing of administration[J]. Ann Surg, 2022, 275(6): 1025-1034. DOI: 10.1097/sla.0000000000005406.

[13] Xu YZ, Chen MY, Meng XF, et al. Laparoscopic anatomical liver resection guided by real-time indocyanine green fluorescence imaging: experience and lessons learned from the initial series in a single center[J]. Surg Endosc, 2020, 34(10): 4683-4691. DOI: 10.1007/s00464-020-07691-5.

[14] Berardi G, Igarashi K, Li CJ, et al. Parenchymal sparing anatomical liver resections with full laparoscopic approach: description of technique and short-term results[J]. Ann Surg, 2021, 273(4): 785-791. DOI: 10.1097/sla.0000000000003575.

[15] Wang XR, Tong HX, Li JW, et al. Indocyanine green fluorescence-guided laparoscopic anatomical segmentectomy of liver segment 6: surgical strategy and technical details[J]. Ann Surg Oncol, 2024, 31(10): 6546-6550. DOI: 10.1245/s10434-024-15768-x.

[16] 中国研究型医院学会肝胆胰外科专业委员会,《中华消化外科杂志》编辑委员会. 腹腔镜解剖性肝切除手术操作流程及技术标准中国专家共识(2023版)[J]. 中华消化外科杂志, 2023, 22(7): 810-823. DOI: 10.3760/cma.j.cn115610-20230714-00410.

[17] 中国医师协会外科医师分会肝脏外科医师委员会. 吲哚菁绿荧光成像技术在肝脏外科应用中国专家共识(2023版)[J]. 中国实用外科杂志, 2023, 43(4): 371-383. DOI: 10.19538/j.cjps.issn1005-2208.2023.04.02.

[18] 王晓颖. 腹腔镜解剖性肝切除术中荧光染色意外及对策[J]. 中国实用外科杂志, 2022, 42(9): 1001-1004. DOI: 10.19538/j.cjps.issn1005-2208.2022.09.11.

[19] Ciria R, Berardi G, Nishino H, et al. A snapshot of the 2020 conception of anatomic liver resections and their applicability on minimally invasive liver surgery. A preparatory survey for the Expert Consensus Meeting on Precision Anatomy for Minimally Invasive HBP Surgery[J]. J Hepatobiliary Pancreat Sci, 2022, 29(1): 41-50. DOI: 10.1002/jhbp.959.

[20] Rethy A, Langø T, Mårvik R. Laparoscopic ultrasound for hepatocellular carcinoma and colorectal liver metastasis: an overview[J]. Surg Laparosc Endosc Percutan Tech, 2013, 23(2): 135-144. DOI: 10.1097/sle.0b013e31828a0b9a.

[21] 王宏光, 王之浩. 腹腔镜解剖性肝段切除术中吲哚菁绿荧光染色方法选择和术中超声应用策略[J]. 中华消化外科杂志, 2024, 23(2): 228-235. DOI: 10.3760/cma.j.cn115610-20231203-00231

[22] Kobayashi Y, Kawaguchi Y, Kobayashi K, et al. Portal vein territory identification using indocyanine green fluorescence imaging: technical details and short-term outcomes[J]. J Surg Oncol, 2017, 116(7): 921-931. DOI: 10.1002/jso.24752.

[23] Ibukuro K, Takeguchi T, Fukuda H, et al. Spatial relationship between intrahepatic artery and portal vein based on the fusion image of CT-arterial portography (CTAP) and CT-angiography (CTA): new classification for hepatic artery at hepatic hilum and the segmentation of right anterior section of the liver[J]. Eur J Radiol, 2012, 81(2): e158-e165. DOI: 10.1016/j.ejrad.2011.01.045.

[24] Diana M, Liu YY, Pop R, et al. Superselective intra-arterial hepatic injection of indocyanine green (ICG) for fluorescence image-guided segmental positive staining: experimental proof of the concept[J]. Surg Endosc, 2017, 31(3): 1451-1460. DOI: 10.1007/s00464-016-5136-y.

[25] Ueno M, Hayami S, Sonomura T, et al. Indocyanine green fluorescence imaging techniques and interventional radiology during laparoscopic anatomical liver resection (with video)[J]. Surg Endosc, 2018, 32(2): 1051-1055. DOI: 10.1007/s00464-017-5997-8.

[26] Li WF, Al-Taher M, Yu CY, et al. Super-selective intra-arterial indocyanine green administration for near-infrared fluorescence-based positive staining of hepatic segmentation: a feasibility study[J]. Surg Innov, 2021, 28(6): 669-678. DOI: 10.1177/1553350621996972.

[27] Ueno M, Hayami S, Sonomura T, et al. Concomitant use of indocyanine green fluorescence imaging and interventional radiology for detection of liver segments during laparoscopic anatomical liver resection: pilot feasibility study[J]. Surg Laparosc Endosc Percutan Tech, 2019, 29(4): 242-246. DOI: 10.1097/sle.0000000000000631.

[28] Yang ZF, Poon RT. Vascular changes in hepatocellular carcinoma[J]. Anat Rec (Hoboken), 2008, 291(6): 721-734. DOI: 10.1002/ar.20668.

[29] 侯子琪, 谢青云, 廖明恒, 等. 吲哚菁绿荧光引导下腹腔镜解剖性肝切除术的临床效果[J]. 中华外科杂志, 2023, 61(5): 368-374. DOI: 10.3760/cma.j.cn112139-20230113-00021.

[30] Xie QY, Qiu GT, Liao MH, et al. Transhepatic arterial approaches for ICG injection to guide laparoscopic anatomical hepatectomy: a case series study[J]. Asian J Surg, 2024, 47(2): 916-922. DOI: 10.1016/j.asjsur.2023.10.105.

[31] Nishino H, Hatano E, Seo S, et al. Real-time navigation for liver surgery using projection mapping with indocyanine green fluorescence: development of the novel medical imaging projection system[J]. Ann Surg, 2018, 267(6): 1134-1140. DOI: 10.1097/sla.0000000000002172.

[32] Zeng XJ, Li XC, Lin WJ, et al. 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(2): 1749-1759. DOI: 10.1097/js9.0000000000002193

[33] Zhang W, Hu Z, Tian J, et al. A narrative review of near-infrared fluorescence imaging in hepatectomy for hepatocellular carcinoma[J]. Ann Transl Med, 2021, 9(2): 171. DOI: 10.21037/atm-20-5341.

[34] Ding F, Li C, Xu Y, et al. PEGylation regulates self-assembled small-molecule dye-based probes from single molecule to nanoparticle size for multifunctional NIR-Ⅱ bioimaging[J]. Adv Healthc Mater, 2018, 7(23): e1800973. DOI: 10.1002/adhm.201800973.

[35] Zhao M, Li B, Wu Y, et al. A tumor-microenvironment-responsive lanthanide-cyanine FRET sensor for NIR-Ⅱ luminescence-lifetime in situ imaging of hepatocellular carcinoma[J]. Adv Mater, 2020, 32(28): e2001172. DOI: 10.1002/adma.202001172.

（收稿日期：2025-02-12）