·专题论坛·
（肝胆胰疾病诊治新进展）

荧光影像在腹腔镜肝切除术中的应用进展

张永祥[1]，吴忠仕[1,2]，简志祥[1,2]
1. 广东祈福医院普通外科，广东 广州 511495；2. 广东省人民医院普外科，广东 广州 510180

［摘要］ 传统腹腔镜肝切除术存在肿瘤定位困难、难以精准标记肝段、无法实现术中实时导航等缺点，无法满足精准肝切除和解剖性肝切除的要求。以吲哚菁绿为代表的荧光影像技术的出现，在显示胆管、定位肿瘤、标记肝段、显示微小病灶、检查切缘等方面展现出强大的优势。弥补了腹腔镜的固有缺陷，逐步成为腹腔镜技术的主流。而激发光源以及探针分子等荧光影像技术的创新发展，进一步推动了荧光影像技术在腹腔镜肝切除术中的深度应用。

［关键词］ 荧光影像；吲哚菁绿；荧光腹腔镜；肝切除术；原发性肝癌
［中图分类号］R657. 3　［文献标识码］A　**DOI**：10. 3969/j. issn. 1003-5591. 2024. 01. 003

Application advances of fluorescent imaging in laparoscopic hepatectomy

Zhang Yongxiang[1], *Wu Zhongshi*[1,2], *Jian Zhixiang*[1,2]
1. *Department of General Surgery, Guangdong Clifford Hospital, Guangdong Guangzhou* 511495, *China*; 2. *Department of General Surgery, Guangdong Provincial People's Hospital, Guangdong Guangzhou* 510180, *China*
Zhang Yongxiang and Wu Zhongshi contributed equally to this work
Corresponding author: *Jian Zhixiang*, *Email*: *jzx_*118@163. *com*

［**Abstract**］ Traditional laparoscopic hepatectomy has many disadvantages, such as difficulty in tumor localization, inaccurate marking of liver segments, and lack of intraoperative real-time navigation, which cannot meet the requirements of precise hepatectomy and anatomical hepatectomy. The emergence of fluorescence imaging technology represented by indocyanine green has shown powerful advantages in displaying bile ducts, locating tumors, marking liver segments, displaying micro lesions, and examining resection margins, which has made up for the inherent defects of laparoscopy and gradually become the mainstream of laparoscopy. The innovation and development of fluorescence imaging technology such as excitation light source and probe molecule have further promoted the in-depth application of fluorescence imaging technology in laparoscopic hepatectomy.

［**Key words**］ Fluorescent imaging; Indocyanine green; Fluorescent laparoscopy; Hepatectomy; Primary liver cancer

近年来，随着综合治疗的进步，肝癌的治疗模式也发生了显著的改变，部分中晚期病人通过转化治疗获得手术机会，进一步拓宽了肝癌手术的适应证[1]。这也意味着外科医生所面对的肝癌病例比过去更加复杂，对手术的损伤控制和精准切除等也提出了更高的要求。但目前传统腹腔镜肝切除术仍存在肿瘤定位困难、难以精准标记肝段、无法实现术中实时导航等固有的技术缺陷[2]，这些缺陷往往极易导致阳性切缘，与日益受到重视的精准肝切除理念背道而驰。为了克服传统腹腔镜的不足，近年来兴起了以吲哚菁绿（indocyanine green，ICG）荧光影像为代表的荧光腹腔镜技术，广泛用于多个学科的诊断和治疗中。在肝胆外科，2008年日本青木武士教授首次报道了经ICG荧光的腹腔镜肝切除术[3]。此后，国内外掀起了利用荧光腹腔镜进行肝切除术的热潮。实践证明，荧光腹腔镜同时具备功能影像和腹腔镜

基金项目：2022年度广州市番禺区科技计划一般医疗卫生项目（2022-Z04-25）

作者简介：张永祥，硕士，主要从事肝胆胰外科临床方面的研究，Email：zhangyongxiang2010@163. com；吴忠仕，博士研究生在读，主要从事肝脏胰外科临床方面的研究，Email：wzs2020@126. com；张永祥与吴忠仕在文献检索、论文讨论分析、撰写中具有相同贡献
通信作者：简志祥，Email：jzx_118@163. com

手术的双重优势，在肿瘤定位、肝段标记、术中导航等方面有显著优势。经过10余年的发展，荧光影像技术在腹腔镜肝切除术中的应用日趋成熟，甚至有学者提出，荧光影像技术、腹腔镜技术、三维重建技术、联合肝脏离断及门静脉结扎的二步肝切除术并称肝脏外科近20年的四大进展[4]。在此，本文将结合荧光影像的研究现状以及作者自身经验，就荧光影像在腹腔镜肝切除术中的应用及研究进展进行综述。

一、荧光影像成像原理

当某种物质经特定波长的入射光照射，吸收光能后进入激发态，并且立即退激发并发出出射光（其波长通常比入射光更长），具有这种性质的出射光就称为荧光[5]。在荧光产生过程中，入射光通常称激发光源，常见激发光源有紫外光、可见光、红外光、X射线等。发光物质称为探针分子，常见探针分子有褪黑素、组蛋白去乙酰化酶、谷胱甘肽等。

ICG因其独特的物理和化学性质，使其成为目前荧光腹腔镜中最常用的探针分子。相比其他探针分子，ICG应用于肝脏荧光影像的主要优势包括以下几点[6-7]：（1）优异的光学特性。ICG能被波长在750～810 nm之间的近红外光（near infrared，NIR）激发，并发射波长约为840 nm的荧光。这种波长配置使得ICG荧光信号能够有效穿透10 mm的组织深度而不会受到体内自发荧光的干扰，从而能够在活体内部实现清晰成像。（2）生物兼容性和安全性。ICG是一种生物兼容性良好的染料，静脉注射ICG后，可被肝脏细胞快速摄取，并经胆道排泄，血液内ICG水平迅速下降，15 min后趋于平缓。在使用过程中相对安全，较少引起过敏等并发症。（3）靶向性。由于肿瘤细胞较正常细胞更易于滞留ICG，因此ICG能够用于靶向肿瘤成像，识别肿瘤边界，提高手术的精准性和安全性。（4）即时性。ICG注射后，能在数秒至数分钟内实现血管和组织的显影，为手术提供了即时的影像反馈，有助于缩短手术时间，减少手术并发症。

二、ICG荧光影像在腹腔镜肝切除术中的应用

1. 术中显示和检查胆道系统　如何避免胆道损伤和术中及时发现已发生的胆道损伤是防治该并发症的主要手段。ICG经胆道排泄的特性使其具备显示和检查胆道系统的优势。当含有ICG的胆汁流经胆道系统时，荧光可以透过胆管壁清晰显示胆道系统，实现胆管系统的可视化，避免术中因对胆道系统识别不佳而导致的副损伤，可显著降低术中胆管损伤风险[8-9]。此外，若术中发生胆漏，外泄的ICG荧光相比于单纯的胆汁绿染，能更敏感地显示出胆漏的位置。因此，利用ICG荧光成像不仅提升了术中胆道损伤的发现率，还减少了术中X线胆道造影的需求。一项临床随机对照试验显示，术中的荧光胆道造影对胆漏的检出效能与X线胆道造影相同，而荧光胆道造影在安全性、便捷性和实时性上有显著优势[10]。为此越来越多的学者提出，荧光造影取代X线造影成为术中胆道造影的金标准，此将成为可能[11]。当然，由于肝脏荧光染色背景很强，加上ICG荧光穿透力有限，一定程度上限制了ICG荧光在肝内胆管显影中的应用，部分肝实质深部的胆道造影仍然需要传统X线胆道造影的支持[12]。

2. 肿瘤染色　术中如何快速、精准地定位肿瘤边界一直是困扰腹腔镜肝切除术的难题。ICG荧光影像利用肿瘤和正常肝组织对ICG吸收和排泄的差异，实现肝肿瘤的精准荧光染色，为肿瘤的切除定位和导航，提高手术效率的同时有效地避免了阳性切缘，这是荧光影像在腹腔镜肝切除术中的最大应用之一[13]。另外，尽管CT等传统影像不断改进，仍有约7%的肝脏病灶术前难以被发现，而ICG荧光对微小病灶具有较高的敏感性，甚至可以发现2 mm大小的病灶，一定程度上弥补了传统影像的漏诊问题。一项纳入21个随机对照研究、841例ICG腹腔镜肝癌切除病人的Meta分析显示[14]，ICG对肝浅表肿瘤的敏感度为96%～100%，其中13项研究362例病人中有42例ICG检测到术前影像未检测到的病灶，占11.6%（42/362）。此外，在荧光染色的过程中，不同性质的肝脏肿瘤可以表现出全部荧光、部分荧光、环形荧光等不同的染色模式[15]。这些染色的差异主要是由于不同肝肿瘤中摄取转运蛋白表达水平不同，对ICG摄取转运存在差异造成的。而进一步的研究表明，摄取转运蛋白的表达与肝肿瘤的预后密切相关[16]。因此，利用ICG荧光染色模式可初步评估肿瘤性质。

3. 肝段染色　解剖性肝切除对治疗沿门静脉系统扩散的肝恶性肿瘤具有肿瘤学优势，这一观点越来越被接受。解剖性肝切除的解剖学基础是肝脏的分段，但肝脏内部实际上是管道交错变异，肝脏分段极不规则，相邻肝段表面边缘相互交错，内部分界更是无章可循。因此，能否实现真正的解剖性肝切除的关键是如何实现准确的肝段标记。过去肝段的标记均是术者依据经验和传统影像学粗略地将某一肝段想象在某一位置的某一范围，并非真正的解剖性切除。即使是高分辨率的肝脏三维重建的出现，肝段的划分仍然带有较强的主观性。其他标记肝段的方法，如B型超声引导肝血管穿刺注射美蓝等染料或者夹闭Glissson鞘使相应肝段表面出现的缺血区域等，也存在明显缺陷。而利用ICG荧光可以对肝段进行“正染”或“反染”，可准确地实现肝段甚至亚肝段的可视化。与传统肝段标记方法相比，利用ICG荧光标记肝段优点突出。缺血线法标记肝段容易受肝硬化、肝脏颜色等肝脏背景干扰，造成肝表面缺血线不明显；断肝过程中，断面的不平、出血等更使缺血线难以辨认；并且部分手术需要全肝血流阻断，也限制了缺血线法的应用。经肝血管穿刺注射染色则容易污染肝断面，而且美蓝等染料很快被清除而导致染色洗脱。而ICG经外周静脉或者门静脉穿刺进入肝脏以后，快速被肝细胞所吸收，不易受肝硬化的影响，染色和非染色肝段之间色差显著，加上现代荧光腹腔镜“白光-荧光-融合”多模式切换的功能，消除了肝脏背景等影响，即使在肝实质内部也可以形成明显分界，实时导航肝脏的离断。ICG被吸收后，排泄时间较长，肝段标记时间可长达6～8 h，保证了染色的持续性，覆盖大部分肝切除手术时间。实践表明，经ICG荧光肝段染色在染色成功率、缩短手术时间、减少术中出血、减少肝门阻断时间等方面均有优势。ICG荧光腹腔镜下更精准的肝段染色和实时的肝段标记，实现了真正的功能

解剖性肝切除[13]。

4. 其他　ICG 可沿淋巴管引流并与淋巴管中的蛋白结合，在淋巴结中浓集而标记淋巴结，指导淋巴清扫[17]。另外，利用ICG也可以进行血管的显影，检查吻合口的血供和肝肾移植后移植体的灌注状态[18]。ICG荧光除了指导术中肿瘤定位和导航肿瘤切除以外，ICG荧光也可以用于检查切缘有无肿瘤残留，提高肿瘤R0切除率。因此，理论上经ICG荧光腹腔镜切除的肝癌病人比普通腹腔镜手术具有更好的生存时间[19]。

三、ICG荧光腹腔镜在肝切除术中应用的缺陷

1. ICG荧光腹腔镜的切缘问题　通常认为，肿瘤的ICG染色是由于肿瘤周围的正常肝脏组织受压迫，导致ICG排泄下降而在肿瘤周围聚集引起，理论上荧光的边界应大于肿瘤的边界[15]。因此，只要在荧光边界外切除就足以保证肿瘤获得R0切除[20]。但近期的研究通过比较病理边界和荧光边界的范围，发现在肝细胞癌（hepatocellular carcinoma，HCC）中病理边界几乎是与荧光边界重叠的，而HCC最理想的切除范围是切缘至少距离肿瘤病理边缘1.5～2.0 cm，所以该研究认为，单纯沿荧光边界切除肿瘤是无法保证切缘的绝对安全[21]。青木武士教授2020年的一项研究里发现，HCC的ICG荧光染色存在较高比例的肿瘤边缘荧光缺失现象，他在荧光显微镜下评估了26例HCC，有11例HCC存在边缘荧光缺失现象，这与既往对荧光边界的认识存在明显不同[20]。这提示，在使用ICG荧光影像技术指导肿瘤切除时需时刻保持警惕，ICG荧光的边缘并非绝对安全，需结合术中超声和术中病理及时调整切缘以降低肿瘤破裂和切缘阳性的风险。

2. ICG荧光腹腔镜的假阳性问题　ICG荧光对肝脏表面病变的高敏感性也带来突出的假阳性问题，表现为在术中除癌灶以外，还常常出现一些额外染色的区域，这些区域通常术后病理证实为正常肝组织。文献报道的假阳性甚至高达40%[14]。导致假阳率升高的因素包括肝硬化、发育不良结节、ICG使用时间过短、ICG使用量过大、胆管增生、坏死、囊肿、血管瘤等[14]。这些手术计划外的染色区域无疑可能增加手术难度、延长手术时间和减少了残余肝脏体积。这也要求我们术前需要充分依据病人肝脏状态评估ICG使用时间和使用量，术中结合肉眼观察、触诊或者术中超声等影像谨慎对待每个染色的病灶。

3. ICG荧光组织穿透力有限问题　ICG荧光的组织穿透力有限，通常只有8～10 mm，虽然该穿透深度显著超过许多探针分子，但这一深度对深部肿物的探查仍然十分不利。最新的Meta分析显示，ICG荧光对深度超过8 mm的肿物，敏感度只有71%～79%[14]，这再次提示临床使用ICG荧光影像时，需要结合术前影像或术中超声，同时也需要探索寻找提高ICG荧光对组织的穿透能力的方法。

四、荧光影像相关技术的最新进展

1. 激发光源的研究进展　理论上，波长越长的激发光源，其激发出的荧光组织穿透能力就越强，对深部病变的发现就越有利。但荧光在激发过程受多种因素的干扰，包括反射、吸收、散射以及组织的自发荧光等。目前荧光腹腔镜主要使用的是700～900 nm波长的近红外一区（NIR-I）。这个波段的研究及应用起步早，探针分子、接收探头等技术相对成熟。然而，在NIR-I内，生物组织对光子仍有较强的吸收、散射和自发荧光，加上波长的限制，导致了目前荧光腹腔镜存在穿透深度小、空间分辨率低和信噪比不足等缺陷，影响其进一步发展[22]。最新研究表明，近红外二区（NIR-Ⅱ，1 000～1 700 nm）对比NIR-I具有更低的组织吸收、散射、自发荧光等特性，在组织穿透深度和空间分辨率方面更有优势，具有更广阔的应用前景。目前限制NIR-Ⅱ大范围应用的主要问题是适配NIR-Ⅱ的探针分子存在荧光量子产率低、荧光亮度低以及生物相容性、稳定性、靶向性差等缺陷需要解决，同时相关的成像系统也有赖于工程学的突破[23]。到目前为止，NIR-Ⅱ荧光影像已经由理论开始向临床转化，尤其是2019年田捷教授团队实现了NIR-Ⅱ荧光导航肝癌切除以及首台NIR-Ⅱ荧光腹腔镜研发成功，标志着NIR-Ⅱ荧光腹腔镜进入临床快速发展阶段[24]。

2. 探针分子的研究进展　理想的荧光探针分子应该具有良好的靶向性和组织的特异性。显然，ICG并非最佳的探针分子，ICG并非特异性与肝癌细胞结合，其染色取决于病变及周边的代谢状态，无法真正区分良恶性。同时ICG的染色效果也受多种因素影响。因此，探索理想的探针分子成为荧光影像的另一热点。目前有多种新型探针分子被应用肝肿瘤的荧光影像研究。在机制上，这些荧光探针分子大体可以分为常开型和激活型。常开型探针分子典型代表是ICG，其他的常开型探针分子多基于ICG而设计[25]。如探针分子IRDye800褪黑素是通过用ICG标记褪黑素，探针分子IRDye800CW辛二酰苯胺异羟肟酸（SAHA）则是由SAHA与ICG偶联构建，通过ICG与肝肿瘤内特异性分子（褪黑素、SAHA等）结合，提高了ICG对肝肿瘤的特异性和靶向性。激活型探针分子主要是靶向肝肿瘤的可自激发分子，如靶向次氯酸的HOTN探针分子、靶向谷胱甘肽的CyO-Dise探针分子、靶向碱性磷酸酶（ALP）的DQM-ALP探针分子[25]。而次氯酸、谷胱甘肽、ALP等这一类分子在肝肿瘤中特异性升高，激活型探针分子与其结合后自激发荧光，提高肝肿瘤荧光染色的特异性。目前这些探针分子大部分处于实验研究阶段，初步显示出比ICG更强大的染色效能和特异性，将可能助力荧光腹腔镜肝切除术的发展。

五、展望

随着荧光影像在技术层面上不断突破，超高清、大景深、高动态、广色域、智能调节等高端技术不断向荧光腹腔镜加持，荧光腹腔镜将进入一个高速增长期。可以预测，荧光腹腔镜技术水平将很快达到甚至超过目前主流的白光腹腔镜水平，荧光腹腔镜将成为未来腹腔镜的主流。得益于荧光影像在肿瘤染色、肝段染色、实时术中导航等方面的优势，荧光影像指导下的腹腔镜肝切除术也必将成为腹腔镜肝切除术的技术主流，使肝切除术更精准、更安全、更高效，促使“解剖性肝切除”向“功能解剖性肝切除”飞跃。而NIR-Ⅱ荧光成像技术和新型探针分子的出现，极大地克服了现有ICG荧光

腹腔镜的局限性，具有极大的研发空间以及临床使用价值。

利益冲突　所有作者均声明不存在利益冲突

参　考　文　献

[1] 中国医疗保健国际交流促进会肝脏肿瘤学分会，中国医学科学院北京协和医学院肿瘤医院消化道肿瘤多学科协作组，中国医师协会肝癌专业委员会. 肝癌转化治疗中肝功能全程管理中国专家共识(2022版)[J]. 肝癌电子杂志，2023，10(1)：1-9. DOI：10. 3969/j. issn. 2095-7815. 2023. 01. 002.

[2] 周雨，简志祥. 吲哚菁绿荧光影像技术在腹腔镜肝切除术中的应用[J]. 中华肝胆外科杂志，2019，25(3)：225-228. DOI：10. 3760/cma. j. issn. 1007-8118. 2019. 03. 017.

[3] 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.

[4] Kokudo N, Takemura N, Ito K, et al. The history of liver surgery: achievements over the past 50 years [J]. Ann Gastroenterol Surg, 2020, 4(2): 109-117. DOI: 10. 1002/ags3. 12322.

[5] Li CY, Chen GC, Zhang YJ, et al. Advanced fluorescence imaging technology in the near-infrared-II window for biomedical applications[J]. J Am Chem Soc, 2020, 142(35): 14789-14804. DOI: 10. 1021/jacs. 0c07022.

[6] Cosco ED, Spearman AL, Ramakrishnan S, et al. Shortwave infrared polymethine fluorophores matched to excitation lasers enable non-invasive, multicolour *in vivo* imaging in real time [J]. Nat Chem, 2020, 12(12): 1123-1130. DOI: 10. 1038/s41557-020-00554-5.

[7] Reinhart MB, Huntington CR, Blair LJ, et al. Indocyanine green: historical context, current applications, and future considerations[J]. Surg Innov, 2016, 23(2): 166-175. DOI: 10. 1177/1553350615604053.

[8] Luo DK, Liang WP, Ma B, et al. Global trends of indocyanine green fluorescence navigation in laparoscopic cholecystectomy: bibliometrics and knowledge atlas analysis[J]. Surg Endosc, 2022, 36(9): 6419-6431. DOI: 10. 1007/s00464-021-08988-9.

[9] van den Bos J, Schols RM, Luyer MD, et al. Near-infrared fluorescence cholangiography assisted laparoscopic cholecystectomy versus conventional laparoscopic cholecystectomy (FALCON trial): study protocol for a multicentre randomised controlled trial[J]. BMJ Open, 2016, 6(8): e011668. DOI: 10. 1136/bmjopen-2016-011668.

[10] Lehrskov LL, Westen M, Larsen SS, et al. Fluorescence or X-ray cholangiography in elective laparoscopic cholecystectomy: a randomized clinical trial[J]. Br J Surg, 2020, 107(6): 655-661. DOI: 10. 1002/bjs. 11510.

[11] Pesce A, Fabbri N, Feo CV. Should fluorescent cholangiography become a gold standard during all cholecystectomies? [J]. J Am Coll Surg, 2023, 237(1): 169. DOI: 10. 1097/XCS. 0000000000000696.

[12] Yang J, Tao HS, Luo W, et al. A novel method of fluorescent imaging can guide hepatectomy for intrahepatic cholangiocarcinoma with intrahepatic biliary obstruction[J]. J Surg Oncol, 2020, 122(8): 1580-1586. DOI: 10. 1002/jso. 26204.

[13] Zhou Y, Lin Y, Jin HS, et al. Real-time navigation guidance using fusion indocyanine green fluorescence imaging in laparoscopic non-anatomical hepatectomy of hepatocellular carcinomas at segments 6, 7, or 8 (with videos)[J]. Med Sci Monit, 2019, 25: 1512-1517. DOI: 10. 12659/MSM. 914070.

[14] Purich K, Dang JT, Poonja A, et al. Intraoperative fluorescence imaging with indocyanine green in hepatic resection for malignancy: a systematic review and meta-analysis of diagnostic test accuracy studies[J]. Surg Endosc, 2020, 34(7): 2891-2903. DOI: 10. 1007/s00464-020-07543-2.

[15] 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.

[16] Shibasaki Y, Sakaguchi T, Hiraide T, et al. Expression of indocyanine green-related transporters in hepatocellular carcinoma[J]. J Surg Res, 2015, 193(2): 567-576. DOI: 10. 1016/j. jss. 2014. 07. 055.

[17] Zhang YX, Zhang YJ, Zhu JH, et al. Clinical application of indocyanine green fluorescence imaging in laparoscopic lymph node dissection for intrahepatic cholangiocarcinoma: a pilot study (with video)[J]. Surgery, 2022, 171(6): 1589-1595. DOI: 10. 1016/j. surg. 2021. 09. 032.

[18] Dousse D, Vibert E, Nicolas Q, et al. Indocyanine green fluorescence imaging to predict graft survival after orthotopic liver transplantation: a pilot study[J]. Liver Transpl, 2020, 26(10): 1263-1274. DOI: 10. 1002/lt. 25796.

[19] Wang JX, Zou XF, Zheng ZH, et al. Indocyanine green fluorescence-guided laparoscopic hepatectomy versus conventional laparoscopic hepatectomy for hepatocellular carcinoma: a single-center propensity score matching study[J]. Front Oncol, 2022, 12: 930065. DOI: 10. 3389/fonc. 2022. 930065.

[20] Tashiro Y, Aoki T, Hirai T, et al. Pathological validity of using near-infrared fluorescence imaging for securing surgical margins during liver resection[J]. Anticancer Res, 2020, 40(7): 3873-3882. DOI: 10. 21873/anticanres. 14377.

[21] Cai XR, Hong HJ, Pan W, et al. Does using indocyanine green fluorescence imaging for tumors help in determining the safe surgical margin in real-time navigation of laparoscopic hepatectomy? A retrospective study[J]. Ann Surg Oncol, 2023, 30(4): 1981-1987. DOI: 10. 1245/s10434-022-12893-3.

[22] 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)：3788/CJL230819. DOI：10. 3788/CJL230819.

[23] Zhang XN, Li SS, Ma HZ, et al. Activatable NIR-Ⅱ organic fluorescent probes for bioimaging[J]. Theranostics, 2022, 12(7): 3345-3371. DOI: 10. 7150/thno. 71359.

[24] Hu ZH, 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]. Nat Biomed Eng, 2020, 4(3): 259-271. DOI: 10. 1038/s41551-019-0494-0.

[25] Liu Q, Huang J, He LW, et al. Molecular fluorescent probes for liver tumor imaging[J]. Chem Asian J, 2022, 17(8): e202200091. DOI: 10. 1002/asia. 202200091.

（收稿日期：2024-01-05）