

· 述评 ·

## 肝移植手术技术的创新与发展

刘军 孔俊杰

**【摘要】** 肝移植作为终末期肝病唯一有效的根治手段，历经近六十载发展，已从高风险的探索性手术转变为成熟的常规治疗。本文系统回顾了肝移植手术技术的发展历程，重点介绍了肝切除联合Ⅱ~Ⅲ段部分肝移植的延期全肝切除术和自体肝移植技术革新、微创与机器人技术应用及异种肝移植技术突破等关键领域的创新，剖析这些肝移植技术的具体术式特点、临床应用优缺点及存在的问题。同时，结合中国肝移植特色与贡献，探讨了当前肝移植面临的挑战与未来发展方向。精准化、微创化、边缘供肝高效利用及异种供肝的临床应用将引领肝移植手术进入全新时代。

**【关键词】** 肝移植；手术技术；辅助性肝移植；微创手术；自体肝移植；腹腔镜辅助肝移植；异种肝移植；终末期肝病；供肝短缺

**【中图分类号】** R617 **【文献标志码】** A **【文章编号】** 1674-7445 (2025) 06-0004-06

**Innovations and development in liver transplantation surgery techniques** Liu Jun, Kong Junjie. Hepatobiliary Surgery Center, Ward 2 (Liver Transplant Department), Shandong First Medical University Affiliated Shandong Provincial Hospital, Jinan 250021, China

Corresponding author: Liu Jun, Email: dr\_liujun1967@126.com

**【Abstract】** Liver transplantation, as the only effective radical treatment for end-stage liver disease, has evolved from a high-risk exploratory surgery to a mature routine treatment over nearly six decades. This article systematically reviews the development of liver transplantation surgical techniques, focusing on innovations in key areas such as the deferred total hepatectomy combined with partial liver transplantation of segments II to III, technical advancements in liver autotransplantation, application of minimally invasive and robotic techniques, and breakthroughs in liver xenotransplantation. It analyzes the specific surgical characteristics, clinical application advantages and disadvantages and existing problems of these liver transplantation techniques. Meanwhile, combining the characteristics and contributions of liver transplantation in China, it discusses the current challenges and future development directions of liver transplantation. Precision, minimally invasiveness, efficient utilization of marginal donor livers, and the clinical application of xenogeneic donor livers will lead liver transplantation surgery into a new era.

**【Key words】** Liver transplantation; Surgical technique; Auxiliary liver transplantation; Minimally invasive surgery; Liver autotransplantation; Laparoscopic-assisted liver transplantation; Liver xenotransplantation; End-stage liver disease; Liver donor shortage

DOI: 10.12464/j.issn.1674-7445.2025219

基金项目：国家自然科学基金面上项目（81373172、81770646）；山东省自然科学基金青年项目（ZR202211080222）

作者单位：250021 济南，山东第一医科大学附属省立医院肝胆外科中心院区二病区（肝移植科）

通信作者：刘军（ORCID 0000-0003-4707-7286），医学博士，博士后，研究方向为肝移植临床与基础研究，E-mail: dr\_liujun1967@126.com



**作者简介:**刘军, 山东第一医科大学附属省立医院肝胆外科中心院区二病区(肝移植科)主任, 主任医师, 医学博士后, 山东第一医科大学教授、博士研究生导师。山东省杰出学科带头人(1020工程), 山东省肝移植开拓者, 山东省立医院器官移植学科带头人。主持国家自然科学基金面上项目2项。在国内外专业杂志发表论文近70篇, 其中 *Lancet Gastroenterology & Hepatology*、*Liver Transplantation* 等 SCI 期刊近20篇。兼任中国医师协会器官移植医师分会全国常务委员、中华医学会器官移植学分会全国委员、中华医学会外科学分会移植学组全国委员、中华医学会器官移植学分会肝移植学组全国委员、山东省医学会器官移植专业委员会副主任委员。兼任《器官移植》《中华肝胆外科杂志》《中华器官移植杂志(电子版)》等杂志编委。

自1963年Starzl教授实施首例人类肝移植以来, 肝移植技术经历了革命性发展。从早期高死亡率的手术探索, 到20世纪80年代环孢素引领的“免疫抑制时代”, 再到21世纪手术技术的精细化与多元化, 肝移植已成为终末期肝病、急性肝衰竭及部分肝脏恶性肿瘤患者公认的“生命方舟”<sup>[1-2]</sup>。目前, 全球年肝移植手术量已突破3万例, 术后1年生存率从早期的不足30%跃升至85%以上, 术后5年生存率超过70%。这一成就的基石, 正是外科手术技术的持续创新与突破<sup>[3]</sup>。本文对肝移植手术技术的历史与发展进行综述, 旨在为其后续发展提供参考。

## 1 肝移植手术技术的历史及现状

肝移植的实验研究始于20世纪50年代中期, 1955年Welch教授首次实施了狗的异位肝移植实验。1959年, Moore教授首创狗原位肝移植手术。首例人类肝移植手术由Starzl教授于1963年实施, 但早期手术生存率极低, 直到1967年其团队才获得1年以上长期存活病例, 关键突破在于免疫抑制方案升级(硫唑嘌呤+泼尼松+抗淋巴细胞球蛋白三联疗法)。我国肝移植实验亦始于20世纪50年代, 1958年, 华中科技大学同济医学院进行了国内首例狗异位肝移植尝试。1977年, 上海瑞金医院完成了国内首例人类同种异体肝移植手术, 1977年至1983年我国共完成肝移植57例, 但90%受者术后3个月内死亡, 最长存活期仅为264d。

1978年开始, 环孢素的临床应用推动肝移植进入爆发期。环孢素的应用将肝移植术后1年存活率由1980年代初的10%提升至50%。1983年, 美国国立卫生研究院正式承认肝移植为终末期肝病的标准疗法, 脱离“临床试用”阶段。1994年, 沈中阳团队在天津完成中国首例长期存活的肝移植手术, 自此, 我国肝移植进入迅速发展阶段。目前肝移植手术

多种技术及术式, 包括劈离式肝移植、减体积肝移植、多米诺肝移植及机械常温灌注等在众多移植中心常规开展<sup>[4]</sup>。随着科学技术的进步及医学技术的发展, 诸如肝切除联合Ⅱ~Ⅲ段部分肝移植的延期全肝切除、自体肝移植、微创技术及异种肝移植的临床应用或研究也逐渐展开, 为部分患者接受肝移植手术、促进围手术期恢复、改善肝移植预后做出了重要贡献。

## 2 肝移植手术技术的创新与发展

### 2.1 辅助部分原位肝移植或肝切除联合Ⅱ~Ⅲ段部分肝移植的延期全肝切除

辅助部分原位肝移植是一项开展时间比较长的技术, 对于急性肝衰竭的患者, 将部分肝脏异位植入受者体内充当一部分肝功能, 待受者自身肝功能恢复后停用免疫抑制药, 待移植物萎缩后通过手术将其摘除<sup>[4]</sup>。而肝切除联合Ⅱ~Ⅲ段部分肝移植的延期全肝切除是辅助性部分原位肝移植的延伸, 或是联合肝脏分隔和门静脉结扎的二步肝切除术的移植变体, 由Line教授于2015年首次提出, 其主要用于不可手术切除的恶性肿瘤, 特别是结直肠癌肝转移。其技术原理是将患者部分病肝(通常为左半肝或左外叶)切除后, 为其移植一体积较小的左肝移植物(通常为Ⅱ~Ⅲ段)并结扎门静脉右支, 待移植物再生至足够大小后, 将原本剩余的病肝行二次手术切除<sup>[5]</sup>。随后, 肝切除联合Ⅱ~Ⅲ段部分肝移植的延期全肝切除在包括德国、意大利、比利时在内的全球多个移植中心得到了进一步开展。在2020年一篇文献报道中, 对于已经开展的8例肝切除联合Ⅱ~Ⅲ段部分肝移植的延期全肝切除治疗结肠癌肝转移的病例, 1例患者术后出现早期复发并于术后24个月内死亡, 1例患者术后3d因肺栓塞死亡, 3例患者在术后5~18个月随访期间内处于无复发存活状态<sup>[6]</sup>。

肝切除联合Ⅱ~Ⅲ段部分肝移植的延期全肝切除在实施过程中有以下技术要点: (1) 保证移植物的体积, 避免小肝综合征发生; (2) 围手术期控制门静脉及肝动脉压力, 研究显示, 术中门静脉压力需控制在 20 mmHg (1 mmHg=0.133 kPa) 以下, 对于保护肝窦内微血管结构、促进肝脏再生有重要作用<sup>[7]</sup>。在 2023 年一项由 Settmacher 等<sup>[8]</sup> 报道的多中心临床研究中, 作者对 22 例因肝脏转移性肿瘤接受肝切除联合Ⅱ~Ⅲ段部分肝移植的延期全肝切除手术的患者进行回顾性分析, 发现受者术后 90 d 病死率为 4.3%, 在长达 696 d 的中位随访时间里, 受者术后 1 年生存率为 90%, 结直肠癌患者无病生存率为 66.6%。虽然报道结果令人欣喜, 但目前肝切除联合Ⅱ~Ⅲ段部分肝移植的延期全肝切除开展规模十分有限, 其能否在临床进一步推广仍需更多的探索。

## 2.2 自体肝移植

自体肝移植主要适用于切除一些常规肝切除术无法完成的复杂肝脏恶性肿瘤, 如侵犯下腔静脉和腔-肝汇合部的肝细胞癌、肝泡型棘球蚴病或肝门胆管癌等<sup>[9]</sup>。1988 年, 德国汉诺威医学院的 Pichlmayr 教授为一例肝脏巨大胃平滑肌肉瘤转移瘤的患者实施了首例离体肝切除联合自体肝移植手术<sup>[10]</sup>。2005 年, 温浩团队为一例肝内胆管细胞癌患者实施了我国首例自体肝移植<sup>[11]</sup>。此后, 自体肝移植在四川大学华西医院、复旦大学附属中心医院、武汉大学中南医院等多个移植中心进行开展并取得了良好效果。

与常规肝切除术相比, 自体肝移植克服了在体肝脏手术的解剖空间、肝脏血流阻断时间和血管重建技术的限制。而与同种异体原位肝移植术相比, 自体肝移植节省了等待肝源时间, 患者术后不需要服用免疫抑制药<sup>[12]</sup>。尽管优势众多, 2000 年 Oldhafer 等<sup>[13]</sup> 对 22 例行自体肝移植的肝脏肿瘤患者进行回顾性分析, 发现患者术后病死率高, 且有肿瘤复发的可能。目前研究显示, 自体肝移植在治疗包括肝泡型棘球蚴病、肝血管瘤、肝细胞腺瘤及肝血管平滑肌脂肪瘤等肝脏良性肿瘤中具有独特优势<sup>[14]</sup>。在一项对晚期肝泡型棘球蚴病的病例研究中, 作者发现相较于非手术组, 自体肝移植组患者术后 5 年生存率高达 82.1%<sup>[15]</sup>。2018 年, Aji 等<sup>[16]</sup> 对自体肝移植手术适应证进行了进一步探索: (1) 巨大病灶侵犯三根肝静脉与下腔静脉汇合处; (2) 病变侵及门静脉及肝动脉三级分支并需要切除重建; (3) 移植肝脏体积 $\geq$ 标准肝脏体

积的 40%; (4) 总胆红素高于上限的 2 倍, 且对于出现梗阻性黄疸者, 需常规行经皮经肝胆道穿刺引流术。自体肝移植操作困难, 但其优点与潜力使其值得被推广, 如何进一步缩短手术时间, 完善无肝期管理, 预防术后并发症的发生、降低术后病死率, 仍需进一步探索。

## 2.3 微创供肝切取

近年来, 腹腔镜技术逐渐被应用于活体肝移植供肝切取, 包括左外叶切取术、左半肝切取术、右半肝切取术及机器人辅助供肝切取术<sup>[17-18]</sup>。2002 年, 法国 Troisi 等<sup>[19]</sup> 实施了首例腹腔镜供肝切取术, 切取移植为成人肝左外叶。2006 年, Koffron 等<sup>[20]</sup> 首次实施腹腔镜切取成人-成人活体肝移植供肝, 此次手术通过在剑突下腹正中中线切口置入 GelPort 装置, 在手辅助下完成供肝获取。2013 年, 我国沈中阳等<sup>[21]</sup> 实施了首例腹腔镜下供肝切取术, 此后, 该技术在国内多个移植中心开展。相较于开放供肝切取术, 微创供肝切取具有创伤小、供者术后恢复迅速等优点。在 2022 年发表的一项 meta 分析中<sup>[17]</sup>, 微创供肝切取术被发现术中出血少、术后并发症发生率低<sup>[22]</sup>, 但手术时间长, 且供者胆道并发症发生率高。在 2021 年发表的一项临床研究中, 在中位随访时间长达 92.7 个月的时间里, 微创供肝切取与开放切取相比受者长期存活率差异无统计学意义<sup>[23]</sup>。目前, 腹腔镜左外叶切取技术相对成熟, 但左、右半肝切取尤其是右半肝, 由于移植物体积大、位置深、解剖变异多, 需离断的肝组织多, 肝门处理复杂, 单纯使用腹腔镜切取难度较高, 因此完全腔镜下切取的报道较少。2016 年, 《腹腔镜活体肝移植供肝切取专家共识》对腹腔镜下右半肝供肝切取术的标准进行了进一步总结<sup>[24]</sup>: (1) 移植受者体质量比 $>1.0$ ; (2) 剩余肝体积 $>35%$ ; (3) 胆管和门静脉无变异。

首例完全机器人活体肝移植供肝切取术由 Loupy 等<sup>[25]</sup> 于 2012 年首次实施, 随后该技术在亚洲多个移植中心开展。最近在 Rho 等<sup>[26]</sup> 的报道中, 作者将 52 例机器人供肝切取、118 例腹腔镜供肝切取和 62 例开放供肝切取的病例进行比较, 发现 3 种术式肝脏切取中供者术后并发症发生无显著差异, 但机器人供肝切取术中出血量少, 供者满意度高, 在具有较高安全性的前提下, 机器人供肝切取具有独特的优势。但相对来讲, 机器人供肝切取具有较长的学习曲线, 其需手术者具有大量机器人肝切除经验。

## 2.4 腹腔镜辅助肝移植

腹腔镜下供体植入的首次探索于 2020 年由 Dokmak 教授完成, 其团队在完全腹腔镜下对 1 例神经内分泌瘤肝转移女性患者进行病肝切除后, 采用上腹正中口完成供体(右半肝)植入。2022 年, Dokmak 等<sup>[27]</sup>实施了第 1 例完全腹腔镜下供肝切取+供体植入手术, 其团队在腹腔镜下对 1 例酒精性肝硬化合并肝细胞癌患者进行全肝切除后, 通过耻骨上切口取出病肝并植入修整好的右半肝供体, 最后在腹腔镜下完成管道吻合。2022 年, Dokmak 等<sup>[28]</sup>报道了其团队 6 例腹腔镜辅助肝移植的病例, 其团队利用腹腔镜技术将病肝切除后, 取上腹正中口将移植物放入供者体内并进行管道吻合, 6 例患者中有 2 例全肝移植物、3 例减体积移植物及 1 例右肝移植物。我国学者也在腹腔镜辅助肝移植中做出了重要探索, 包括西安交通大学第一附属医院、复旦大学附属华山医院及重庆医科大学附属第一医院等多个移植中心均有相关新闻报道。2024 年西安交通大学第一附属医院吕毅教授团队报道的病例显示<sup>[29]</sup>, 其团队共完成 8 例腹腔镜辅助全肝移植手术, 在腹腔镜下完成病肝切除后利用磁性吻合术, 实现了腹腔镜下供体快速植入。尽管腹腔镜辅助肝移植目前仍在起步阶段, 但其独特的优势也吸引了越来越多移植医师对其进行探索。

## 2.5 异种肝移植

随着移植技术的成熟与完善, 供肝短缺成为肝移植进一步发展的主要障碍。用动物器官代替人类器官进行移植治疗, 特别是开展以猪为供体的异种肝移植研究, 是当前最有希望解决供肝短缺的方法之一<sup>[30-31]</sup>。1966 年, Starzl 教授以黑猩猩为供体, 实施了首例临床异种肝移植, 但患者术后仅存活 1 d。1969 年, 法国 Bertoye 教授将狒狒肝脏移植给 1 例 22 岁肝衰竭患者, 但其术后仅存活 4 个月。由于面临绝种的危险、伦理学限制及携带特殊病原体, 研究者们逐渐发现非人灵长类动物并不适于作为异种肝移植器官来源。

猪具有繁殖快、伦理争议小且肝脏大小和生理、生化指标与人类接近等优点, 逐渐成为异种移植的最佳供体<sup>[32-33]</sup>。但由于存在生理屏障、跨物种交叉感染及排斥反应等问题, 猪作为供体的异种肝移植起步十分困难。1992 年, Makowka 等<sup>[34]</sup>首次使用野生型大白猪为供体, 为 1 例因自身免疫性肝炎所致暴发性肝衰竭患者实施辅助性肝移植, 但受者术后仅存活

34 h。研究显示, 灵长类动物体内预存的抗  $\alpha$ -1, 3-半乳糖 ( $\alpha$ -Gal) 是异种移植术后超急性排斥反应的主导者, 其可与猪血管内皮细胞上的  $\alpha$ -Gal 抗原相结合, 出现以间质出血、水肿和小血管血栓为主要表现的排斥反应<sup>[35]</sup>。因此, 2002 年  $\alpha$ -1, 3-半乳糖基转移酶 ( $\alpha$ -1, 3-galactosyltransferase, GGTA1) 基因敲除 (GTKO) 猪小型猪的成功培育, 极大推动了非人灵长类动物作为受体的异种肝移植进展。2010 年, 美国匹兹堡大学医学中心实施了首次以 GTKO 小型猪为供体的异种肝移植实验<sup>[36]</sup>, 研究者将其肝脏植入狒狒体内, 但所有受体均于术后 4~7 d 因血小板减少引起的内脏出血死亡。2013 年, 第四军医大学西京医院肝胆外科、全军器官移植研究所将 GTKO 小型猪的肝脏成功植入藏酋猴体内<sup>[37]</sup>, 完成我国首例异种肝移植动物实验。研究者发现, 异种移植术后受体血小板的过度激活, 发生致死性血小板减少症最终导致严重的器官出血及死亡, 为异种肝移植后的重要现象<sup>[38]</sup>。在进一步探索中, 研究者通过转入人 CD47、应用 CD18 抗体下调 CD18 表达及敲除去唾液酸糖蛋白受体 1 等多种尝试, 在动物实验中均取得了令人欣喜的结果<sup>[39-41]</sup>。2024 年, 窦科峰教授团队实施了首例猪-人异种肝移植, 将六基因编辑猪的肝脏植入脑死亡患者体内, 移植肝存活超 96 h, 胆汁分泌正常, 标志异种肝移植迈入临床前试验阶段<sup>[42]</sup>。虽然以猪为供体的异种肝移植仍存在不少的问题与技术瓶颈, 但随着基因修饰技术和免疫医学的进步, 相信异种肝移植会得到进一步发展。

## 3 小结与展望

随着围手术期管理更加精细化以及医学技术的进步, 各种新技术、新理念的涌现, 在为移植受者提供良好预后和远期生活质量的前提下, 肝移植的适应证得到了进一步扩展, 移植物的选择范围也得到了进一步扩大。相信在外科技术、移植免疫学、移植肿瘤学等多学科的不断进步及创新下, 肝移植能够得到进一步发展, 为更多需要移植的患者带来希望。

### 参考文献:

- [1] KAPPE N N, STOLK J, VAN HOEK B. Liver transplantation[J]. *N Engl J Med*, 2024, 390(4): 387. DOI: 10.1056/NEJMc2314292.
- [2] 熊晓鹏, 徐庆国, 苗小龙, 等. 1 147 例肝移植单中心经验[J]. *中华普通外科杂志*, 2024, 39(5): 333-338. DOI: 10.3760/cma.j.cn113855-20240120-00051.

- XIONG X P, XU Q G, MIAO X L, et al. Single-center experience on 1 147 cases of liver transplantation[J]. *Chin J Gen Surg*, 2024, 39(5): 333-338. DOI: 10.3760/cma.j.cn113855-20240120-00051.
- [3] FENG S, ROLL G R, ROUHANI F J, et al. The future of liver transplantation[J]. *Hepatology*, 2024, 80(3): 674-697. DOI: 10.1097/HEP.0000000000000873.
- [4] SUGAWARA Y, HIBI T. Recent trends and new developments in liver transplantation[J]. *Biosci Trends*, 2024, 18(3): 206-211. DOI: 10.5582/bst.2024.01176.
- [5] LINE P D, HAGNESS M, BERSTAD A E, et al. A novel concept for partial liver transplantation in nonresectable colorectal liver metastases: the RAPID concept[J]. *Ann Surg*, 2015, 262(1): e5-9. DOI: 10.1097/SLA.0000000000001165.
- [6] NADALIN S, SETTMACHER U, RAUCHFUß F, et al. RAPID procedure for colorectal cancer liver metastasis[J]. *Int J Surg*, 2020, 82S: 93-96. DOI: 10.1016/j.ijssu.2020.03.078.
- [7] KORCHILAVA B, KHACHIDZE T, MEGRELISHVILI N, et al. Liver regeneration after partial hepatectomy: triggers and mechanisms[J]. *World J Hepatol*, 2025, 17(7): 107378. DOI: 10.4254/wjh.v17.i7.107378.
- [8] SETTMACHER U, ALI-DEEB A, COUBEAU L, et al. Auxilliary liver transplantation according to the RAPID procedure in noncirrhotic patients: technical aspects and early outcomes[J]. *Ann Surg*, 2023, 277(2): 305-312. DOI: 10.1097/SLA.0000000000005726.
- [9] YANG X, QIU Y, HUANG B, et al. Novel techniques and preliminary results of ex vivo liver resection and autotransplantation for end-stage hepatic alveolar echinococcosis: a study of 31 cases[J]. *Am J Transplant*, 2018, 18(7): 1668-1679. DOI: 10.1111/ajt.14621.
- [10] PICHLMAYR R, GROSSE H, HAUSS J, et al. Technique and preliminary results of extracorporeal liver surgery (bench procedure) and of surgery on the in situ perfused liver[J]. *Br J Surg*, 1990, 77(1): 21-26. DOI: 10.1002/bjs.1800770107.
- [11] 王文涛, 杨先伟, 严律南. 离体肝切除联合自体肝移植治疗晚期肝泡型包虫病[J]. *中国普外基础与临床杂志*, 2017, 24(7): 792-794. DOI: 10.7507/1007-9424.201706082.
- WANG W T, YANG X W, YAN L N. In vitro hepatectomy combined with autologous liver transplantation for advanced hepatic alveolar echinococcosis[J]. *Chin J Bases Clin Gen Surg*, 2017, 24(7): 792-794. DOI: 10.7507/1007-9424.201706082.
- [12] 盛嘉麟, 董青福, 史武江, 等. 离体肝切除和自体肝移植术的手术研究进展[J]. *腹部外科*, 2024, 37(1): 7-12, 23. DOI: 10.3969/j.issn.1003-5591.2024.01.002.
- SHENG J L, DONG Q F, SHI W J, et al. Surgical advances of ex-vivo liver resection and autotransplantation[J]. *J Abdom Surg*, 2024, 37(1): 7-12, 23. DOI: 10.3969/j.issn.1003-5591.2024.01.002.
- [13] OLDHAFER K J, LANG H, MALAGÓ M, et al. Ex situ resection and resection of the in situ perfused liver: are there still indications?[J]. *Chirurg*, 2001, 72(2): 131-137. DOI: 10.1007/s001040051280.
- [14] 张帅, 费发珠, 王志鑫, 等. 离体肝切除联合自体肝移植在肝脏良性病变中的治疗现状[J]. *临床肝胆病杂志*, 2024, 40(12): 2543-2547. DOI: 10.12449/JCH241228.
- ZHANG S, FEI F Z, WANG Z X, et al. Current status of ex vivo liver resection and autotransplantation in treatment of benign liver lesions[J]. *J Clin Hepatol*, 2024, 40(12): 2543-2547. DOI: 10.12449/JCH241228.
- [15] QIU Y, HUANG B, YANG X, et al. Evaluating the benefits and risks of ex vivo liver resection and autotransplantation in treating hepatic end-stage alveolar echinococcosis[J]. *Clin Infect Dis*, 2022, 75(8): 1289-1296. DOI: 10.1093/cid/ciac195.
- [16] AJI T, DONG J H, SHAO Y M, et al. Ex vivo liver resection and autotransplantation as alternative to allotransplantation for end-stage hepatic alveolar echinococcosis[J]. *J Hepatol*, 2018, 69(5): 1037-1046. DOI: 10.1016/j.jhep.2018.07.006.
- [17] ZHAO X, LEI Z, GAO F, et al. Minimally invasive versus open living donors right hepatectomy: a systematic review and meta-analysis[J]. *Int J Surg*, 2021, 95: 106152. DOI: 10.1016/j.ijssu.2021.106152.
- [18] HONG S K, HONG S Y, LEE J M, et al. Criteria for selecting living liver donors to optimize recipient outcomes in pure laparoscopic donor right hepatectomy: a cohort study[J]. *Int J Surg*, 2024, 110(6): 3203-3211. DOI: 10.1097/JS9.0000000000001317.
- [19] TROISI R I, GIGLIO M C, KIM J, et al. Current status of minimally invasive surgery for donor hepatectomy: a worldwide survey (a joint initiative of the international laparoscopic liver society and the international living donor liver transplantation group)[J]. *Transplantation*, 2025, 109(11):1754-1764. DOI: 10.1097/TP.0000000000005423.
- [20] KOFFRON A J, KUNG R, BAKER T, et al. Laparoscopic-assisted right lobe donor hepatectomy[J]. *Am J Transplant*, 2006, 6(10): 2522-2525. DOI: 10.1111/j.1600-6143.2006.01498.x.
- [21] 沈中阳. 国内首例全腹腔镜活体左外叶供肝手术报告[J/OL]. *实用器官移植电子杂志*, 2014, 2(5): 277-278. DOI: 10.3969/j.issn.2095-5332.2014.05.003.
- SHEN Z Y. Report of the first total laparoscopic living donor liver surgery in China[J/OL]. *Pract J Organ Transplant (Electr Vers)*, 2014, 2(5): 277-278. DOI: 10.3969/j.issn.2095-5332.2014.05.003.
- [22] 闫晓檬, 徐西, 伊力亚尔·艾尔肯, 等. 微创技术在肝移植领域的应用进展及展望[J]. *中华普通外科杂志*, 2025, 40(1): 65-69. DOI: 10.3760/cma.j.cn113855-20240528-00386.
- YAN X M, XU X, YILIYAER A E K, et al. Application progress and prospect of minimally invasive technology in liver transplantation[J]. *Chin J Gen Surg*, 2025, 40(1): 65-69. DOI: 10.3760/cma.j.cn113855-20240528-00386.
- [23] KIM W J, KIM K H, CHO H D, et al. Long-term safety and efficacy of pure laparoscopic donor hepatectomy in pediatric living donor liver transplantation[J]. *Liver Transpl*, 2021, 27(4): 513-524. DOI: 10.1002/lt.25910.
- [24] HAN H S, CHO J Y, KANEKO H, et al. Expert panel statement on laparoscopic living donor hepatectomy[J]. *Dig Surg*, 2018, 35(4): 284-288. DOI: 10.1159/000479242.
- [25] LOUPY A, PREKA E, CHEN X, et al. Reshaping transplantation with AI, emerging technologies and

- xenotransplantation[J]. *Nat Med*, 2025, 31(7): 2161-2173. DOI: 10.1038/s41591-025-03801-9.
- [26] RHO S Y, LEE J G, JOO D J, et al. Outcomes of robotic living donor right hepatectomy from 52 consecutive cases: comparison with open and laparoscopy-assisted donor hepatectomy[J]. *Ann Surg*, 2022, 275(2): e433-e442. DOI: 10.1097/SLA.0000000000004067.
- [27] DOKMAK S, CAUCHY F, SEPULVEDA A, et al. Laparoscopic liver transplantation: dream or reality? the first step with laparoscopic explant hepatectomy[J]. *Ann Surg*, 2020, 272(6): 889-893. DOI: 10.1097/SLA.0000000000003751.
- [28] DOKMAK S, CAUCHY F, AUSSILHOU B, et al. Laparoscopic-assisted liver transplantation: a realistic perspective[J]. *Am J Transplant*, 2022, 22(12): 3069-3077. DOI: 10.1111/ajt.17118.
- [29] LIU X M, LI Y, FENG Z, et al. Laparoscopic-assisted full-sized liver transplantation with magnetically fast portal vein anastomosis: an initial cohort study[J]. *Int J Surg*, 2024, 110(9): 5483-5488. DOI: 10.1097/JS9.0000000000001730.
- [30] MOHIUDDIN M M. Pig-to-primate organ transplants require genetic modifications of donor[J]. *Nature*, 2023, 622(7982): 244-245. DOI: 10.1038/d41586-023-02817-w.
- [31] WANG Y, CHEN G, PAN D, et al. Pig-to-human kidney xenotransplants using genetically modified minipigs[J]. *Cell Rep Med*, 2024, 5(10): 101744. DOI: 10.1016/j.xcrm.2024.101744.
- [32] PAN W, ZHANG W, ZHENG B, et al. Cellular dynamics in pig-to-human kidney xenotransplantation[J]. *Med*, 2024, 5(8): 1016-1029. e4. DOI: 10.1016/j.medj.2024.05.003.
- [33] LOUPY A, GOUTAUDIER V, GIARRAPUTO A, et al. Immune response after pig-to-human kidney xenotransplantation: a multimodal phenotyping study[J]. *Lancet*, 2023, 402(10408): 1158-1169. DOI: 10.1016/S0140-6736(23)01349-1.
- [34] MAKOWKA L, WU G D, HOFFMAN A, et al. Immunohistopathologic lesions associated with the rejection of a pig-to-human liver xenograft[J]. *Transplant Proc*, 1994, 26(3): 1074-1075.
- [35] YUE L, LI J, YAO M, et al. Cutting edge of immune response and immunosuppressants in allogeneic and xenogeneic islet transplantation[J]. *Front Immunol*, 2024, 15: 1455691. DOI: 10.3389/fimmu.2024.1455691.
- [36] EKSER B, LONG C, ECHEVERRI G J, et al. Impact of thrombocytopenia on survival of baboons with genetically modified pig liver transplants: clinical relevance[J]. *Am J Transplant*, 2010, 10(2): 273-285. DOI: 10.1111/j.1600-6143.2009.02945.x.
- [37] 陈云飞, 王轶, 杨洪吉. 猪作为供体的异种肝移植的研究与进展[J]. *中国组织工程研究*, 2012, 16(5): 899-902. DOI: 10.3969/j.issn.1673-8225.2012.05.032.
- CHEN Y F, WANG Y, YANG H J. Advance of liver xenotransplantation using pig organs[J]. *Chin J Tissue Eng Res*, 2012, 16(5): 899-902. DOI: 10.3969/j.issn.1673-8225.2012.05.032.
- [38] DENG S, ZHANG Y, SHEN S, et al. Immunometabolism of liver xenotransplantation and prospective solutions[J]. *Adv Sci (Weinh)*, 2025, 12(9): e2407610. DOI: 10.1002/adv.202407610.
- [39] ZHANG X, LI X, YANG Z, et al. A review of pig liver xenotransplantation: current problems and recent progress[J]. *Xenotransplantation*, 2019, 26(3): e12497. DOI: 10.1111/xen.12497.
- [40] SANATKAR S A, KINOSHITA K, MAENAKA A, et al. The evolution of immunosuppressive therapy in pig-to-nonhuman primate organ transplantation[J]. *Transpl Int*, 2024, 37: 13942. DOI: 10.3389/ti.2024.13942.
- [41] GULTOM M, RIEBEN R. Complement, coagulation, and fibrinolysis: the role of the endothelium and its glycocalyx layer in xenotransplantation[J]. *Transpl Int*, 2024, 37: 13473. DOI: 10.3389/ti.2024.13473.
- [42] TAO K S, YANG Z X, ZHANG X, et al. Gene-modified pig-to-human liver xenotransplantation[J]. *Nature*, 2025, 641(8064): 1029-1036. DOI: 10.1038/s41586-025-08799-1.

(收稿日期: 2025-08-24)

(本文编辑: 谢诗韵 邬加佳)