

• 综述 •

多模态融合超声技术在泌尿外科的应用

余伟民¹ 程帆^{1Δ}

[摘要] 多模态融合超声技术是将不同影像学检查方法进行结合的新兴成像技术,它结合了传统超声的实时监测、无创性和无辐射的优点,与 CT 和 MRI 的高分辨率、详细解剖结构显示等特性相结合。本文重点介绍了超声与 CT 和 MRI(US-CT 和 MRI-TRUS)的融合成像技术及其在泌尿外科的应用。在经皮肾镜取石术(percutaneous nephrolithotomy, PCNL)中,多模态融合超声技术通过更精确的穿刺路径选择和实时引导,可以提高结石的清除效率,降低并发症发生的风险。在前列腺穿刺活检方面,利用 MRI 与超声的融合影像,可有效提升前列腺癌病灶的定位精度,减少假阴性风险。随着医学影像融合人工智能技术的进步,超声与 CT 和 MRI 的融合成像逐渐成为现实,为泌尿外科诊疗提供了更高精度的影像支持。

[关键词] 融合影像;电子计算机断层扫描;超声;核磁共振成像;经皮肾镜取石术;前列腺穿刺活检

DOI:10.13201/j.issn.1001-1420.2024.08.017

[中图分类号] R445 **[文献标志码]** A

Application of multimodal fusion ultrasound technology in urology

YU Weimin CHENG Fan

(Department of Urology, Renmin Hospital of Wuhan University, Wuhan, 430060, China)

Corresponding author: CHENG Fan, E-mail: urology1969@aliyun.com

Abstract Multimodal fusion ultrasound technology is an emerging imaging technique that combines various imaging methods. It integrates the real-time monitoring, non-invasive nature, and radiation-free advantages of traditional ultrasound with the high-resolution and detailed anatomical structure display of CT and MRI. This paper focuses on the fusion imaging technology of ultrasound with CT and MRI(US-CT and MRI-TRUS) and its application in urology. In percutaneous nephrolithotomy(PCNL), multimodal fusion ultrasound technology can enhance stone removal efficiency and reduce the risk of complications through more precise puncture path selection and real-time guidance. In prostate biopsy, the use of MRI and ultrasound fusion imaging can effectively improve the accuracy of prostate cancer lesion localization and reduce the risk of false negatives. With the advancement of medical imaging and artificial intelligence technology, the fusion of ultrasound with CT and MRI is gradually becoming a reality, providing higher precision imaging support for the diagnosis and treatment in urology.

Key words fusion imaging; computed tomography; ultrasound; magnetic resonance imaging; percutaneous nephrolithotomy; prostate biopsy

多模态融合成像的发展始于 20 世纪 90 年代^[1],该技术将同一目标的多源医学影像信息进行匹配,进行优势互补^[2],从而提高对器官组织的分辨率和病灶的敏感性^[3]。融合超声将实时超声与高分辨率的 CT、MRI 联合。2014 年 Lee 等^[4]提出电磁辅助的超声图像融合的发展方向是自动化、非刚性配准的高精度快速融合。2016 年 Niesche 等^[5]提出基于器官自动化分割和配准的全融合概念。2020 年国内医疗器械公司首次推出了电磁辅助人工智能(AI)的全融合技术,该技术兼具 AI 快速配准融合和实时 3D 引导。

多模态融合超声能实现更加精确的定位和引

导,可广泛应用于泌尿外科的临床诊疗,如经皮肾镜取石术(percutaneous nephrolithotomy, PCNL)、前列腺穿刺活检、肾脓肿穿刺抽吸和置管引流、前列腺癌(prostate cancer, PCa)切除手术的引导和监测等。融合超声在 PCNL 和前列腺活检的应用具有重要的临床价值,为此,本文就融合超声技术在这两项手术中的应用进行分析探讨。

1 多模态超声影像融合在 PCNL 中的应用

1.1 PCNL 通道建立与穿刺引导

PCNL 是治疗上尿路结石的主要手术方式之一^[6],PCNL 的核心步骤包括穿刺路径选择、穿刺引导和通道建立。路径选择的关键点为路径方向的选择,基本原则包括基于肾脏血管解剖的安全原则,以及基于肾脏集合系统的结构及其与结石分布关系的效率原则^[7]。穿刺过程中的路径选择和穿

¹ 武汉大学人民医院泌尿外科(武汉,430060)

^Δ 审校者

通信作者:程帆, E-mail: urology1969@aliyun.com

刺引导需借助影像监测来实现,而理想的引导方法应当能够清楚地显示肾脏结构,辅助选择穿刺路径,并能实时动态引导穿刺过程的实现。当前经皮肾穿刺引导的主流方法是 X 线和超声,CT、电磁辅助引导等也在临床有一定的应用。

1.2 各种穿刺引导方法的优缺点

X 线和 CT 可直观显示结石,后者优势明显,其空间分辨率高、图像清晰、静态显像干扰因素少,可用于指导设计穿刺路径、统筹规划取石方案,但设备庞大,术中应用会导致患者和医护人员的辐射暴露,难以实现术中实时扫描^[8]。

超声操作简单、安全无辐射,可实时引导定位。根据我们前期的基础和临床研究,超声引导下的 PCNL 穿刺最为安全和高效的路径应为目标肾盏的“盏颈穹窿-轴线”方向,这条路径可以最大程度避开肾脏的血管损伤,在具体操作过程中还要考虑结石分布与肾脏集合系统结构之间的关系,来选择最为合适的肾盏作为通道建立的目标点^[9]。但由于超声的精细结构分辨率较低,通常需要术者根据 CT 横断面图像分析结石和肾脏集合系统的关系选择穿刺目标盏,进而在超声的实时引导下完成穿刺。然而,超声容易受骨骼、气体、血块等的影响,非积水肾、肥胖以及术中建立第二通道等情况会使操作难度进一步加大,需要专业培训及大量临床经验积累方能实现精准穿刺。

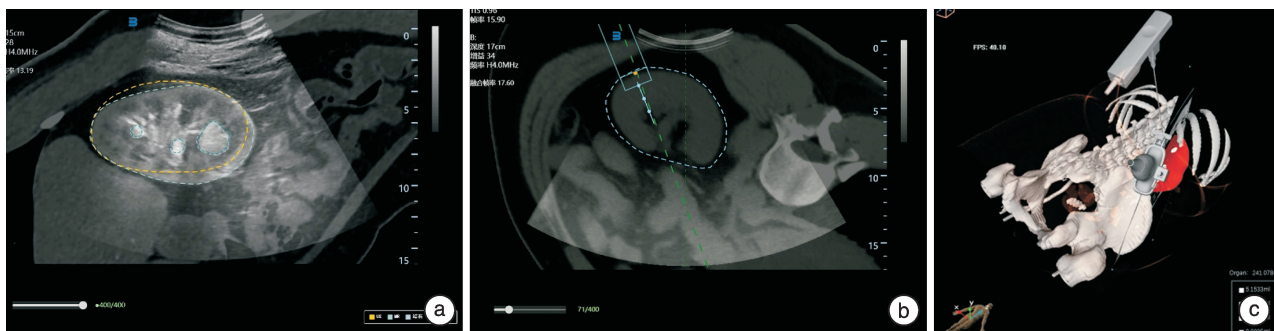
电磁辅助超声虽可实时导航定位穿刺针,帮助术者判断针尖是否到达目标盏以提高穿刺成功率,但分辨率低和成像受限于气体血块的问题并未得到解决,进而导致穿刺路径不能满足安全和高效的

要求^[10]。

1.3 US-CT 融合影像技术的现状与展望

US-CT 融合成像技术是理想的 PCNL 穿刺引导方法,该技术将 CT 的优势融入超声实时引导穿刺的过程中。有多篇研究报道证实 US-CT 融合引导 PCNL 的临床优势,试验组的穿刺时间、穿刺成功率、术后血红蛋白平均下降值优于纯超声引导组。然而,报道中的 US-CT 融合平台需要操作者在超声 2D 切面上主观地查找 CT 相应的切面进行校准融合^[6,11-12]。此类平台依赖操作者主观判断,对医生的经验具有较高的要求,手动/半自动配准耗时很长,不同模态的图像对器官成像的形态差异较大,操作中往往会造成融合精度降低或配准失败。

随着 AI 在医疗领域的应用发展,国内出现了新的融合超声平台,该平台以肾脏轮廓为诊疗目标点,基于深度卷积网络图像分割和配准,超声扫描时实时形变场分析和映射以实现 CT 和超声的自动化融合(图 1a)。术中可在融合影像上实时追踪穿刺针方位,使穿刺过程更加直观和精准(图 1b)。直观清晰的 CT 便于术者更全面评估靶区与肾脏集合系统的关系,结合结石、靶区、肾脏体积的 AI 量化分析数据,可以帮助术者快速进行最佳穿刺路径规划,使穿刺路径的选择更加科学有据,对提高手术安全性和结石清除率有重要意义。而且,伴随技术更新,通过三维重建,能对整个穿刺过程以 3D 影像的方式进行直观展示(图 1c),利于初学者更快地掌握 PCNL 的穿刺技巧、缩短学习曲线,让 PCNL 技术在基层医院也能够快速、安全、高效地开展。



a: 肾脏 CT 与超声融合图像,自动识别肾脏内的结石;b: 穿刺辅助引导线(绿色虚线)和穿刺针针尖识别(橙色点);c: 手术导航三维可视化,显示人体骨骼、肾脏(红色)、肾结石(肾脏内白色部分)以及穿刺针和超声探头在空间中的相对位置。

图 1 US-CT 融合成像引导下的 PCNL 穿刺

2 多模态超声影像融合在前列腺穿刺活检中的应用

2.1 前列腺穿刺活检的发展历程

PCa 是男性泌尿生殖系统最常见的恶性肿瘤^[13]。2022 年 GLOBOCAN 统计显示,全球约有 146.7 万 PCa 新发病例和 39.7 万死亡病例,是男性患者中仅次于肺癌的第二常见肿瘤,在肿瘤死因中排第五位^[14]。前列腺穿刺活检组织病理学检查

是确诊 PCa 的金标准^[15]。目前,超声引导下经会阴/直肠 10~12 针系统穿刺已经在我国被广泛应用,同时,CSCO 等指南也将 MRI 引导下靶向穿刺联合系统穿刺作为 I 级推荐。随着影像技术的发展,前列腺穿刺活检术中影像引导方式不断更迭,逐步从传统超声引导、MRI 引导,过渡至认知融合、MRI-TRUS 图像融合引导。

2.2 前列腺穿刺活检的引导方式变革

2.2.1 超声引导 单纯经直肠超声引导下的前列腺穿刺活检(transrectal ultrasound-guided prostate biopsy, TRUS-Bx)因其实时、便携、无辐射等优点广泛应用于临床,但该操作学习曲线较长,且易造成对前列腺的前部、中线和顶端部分采样不足,假阴性率较高。TRUS-Bx 也会过度检测临床上无意义的 PCa,导致过度诊疗的副作用,如勃起功能障碍和尿失禁^[16]。

2.2.2 MRI 引导 MRI 引导是一种针对 MRI 阳性前列腺病变开发的方法。患者活检前行多参数核磁共振(mpMRI)检查,在手术过程中,在 MRI 透视引导下使用空芯针对可见病变经直肠/会阴取样。术中连续拍摄 MRI 图像以确认针头位置并记录活检位置。MRI 术中实时引导穿刺技术需要在 MRI 检查室内进行,手术耗时长且需特殊专用穿刺设备,价格昂贵,目前在临床诊疗中应用受限^[17]。

2.2.3 认知融合 融合技术目前主要有认知融

合、MRI/TRUS 软件融合等。使用认知融合时,临床医生在穿刺手术前先对患者的 mpMRI 影像进行阅片,在术中,临床医生利用对病变位置的空间感知来对可疑病灶点进行穿刺活检^[18]。认知融合靶向穿刺活检不需要使用额外的硬件或软件,但是受操作者主观因素及影像阅片能力影响较大,可能造成微小病变诊断上的漏诊,从而导致活检阳性率降低。

2.2.4 MRI-TRUS 图像融合 随着 AI 软件影像融合技术的发展,MRI-TRUS 图像融合可实现 MRI 的准确定位和超声的实时性相结合,更精确地引导 PCa 靶向穿刺,可降低漏诊率,减少过度诊断和并发症。为了最大限度地减少用户错误、提高准确性并保持 MRI-TRUS 工作流程的一致性,基于软件的融合平台结合了复杂的算法,以在活检期间配准和同时显示 MRI 和 TRUS 图像。此外,此类平台还可以实现跟踪、映射、记录和存储 3D 空间中的针位置,可视化穿刺靶点等功能,这可能为需要主动监测患者和重复取样的患者提供帮助。见图 2。

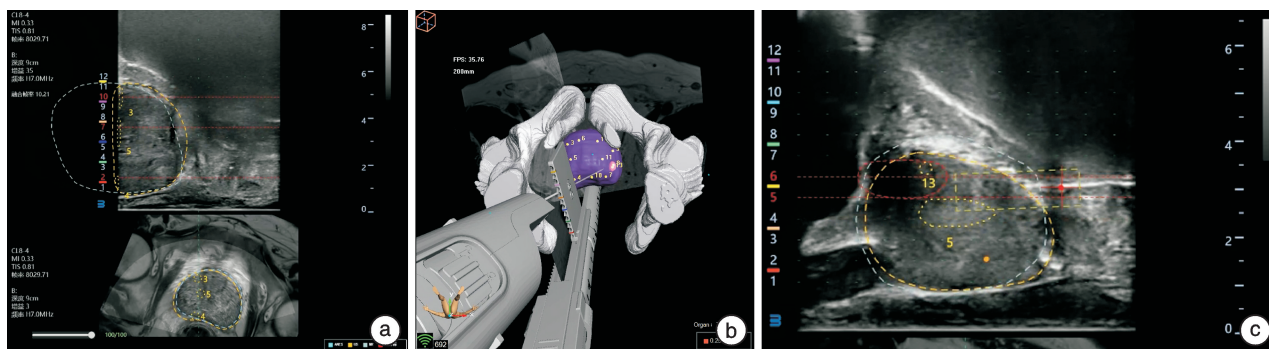


图 2 MRI-TRUS 引导下的前列腺穿刺活检
a:经直肠双平面超声探头的矢状面(上)与横截面(下)分别与前列腺 MRI 融合图像;b:手术导航 3D 可视化,显示前列腺器官、带编号的系统(黄色点)和靶向(红色点)穿刺点以及双平面超声探头、活检针在空间中相对位置;c:融合超声矢状面,显示前列腺器官轮廓、带编号的活检穿刺点(黄色椭圆虚线为系统穿刺点,红色椭圆虚线为靶向穿刺点)、穿刺引导线(红色虚线)、激发的安全区域(黄色虚线框)。

2.3 MRI-TRUS 融合影像在前列腺穿刺活检中的应用和展望

MRI-TRUS 融合引导下前列腺靶向穿刺活检可以指导医生识别与靶向定位 MRI 上的可疑病变。在穿刺活检之前,先获取前列腺 mpMRI,如 T1WI、T2WI、动态增强 MRI、MR 波谱、MR 扩散加权成像、MR 扩散张量成像等;然后对正常前列腺组织与可疑病变进行鉴别和描绘,并把描绘后的 MRI 图像导入融合软件,将活检前 MRI 与实时 TRUS 融合,再进行定位穿刺。在 Siddiqui 等^[19]的研究中,患者接受了靶向活检和标准 12 针系统活检,使用 MRI-TRUS 融合平台检测到的高危 PCa(Gleason 评分 $\geq 4+3$)比标准 TRUS 活检多 30%。在一项 III 期临床试验中,受试者接受了电磁跟踪的 MRI-TRUS 融合引导,在 72.3% 的高危病变中检测到癌症,在 47.5% 的低风险病变中检测

到癌症,这表明 csPCa 的检测有所改善^[20]。除了初次穿刺活检外,对于首次穿刺阴性的患者,MRI-TRUS 融合引导在再次穿刺及主动监测中也具有优势。在一项针对 106 例主动监测和 68 例既往 TRUS 活检阴性(PSA 持续升高)患者的研究中,MRI-TRUS 融合靶向活检监测到癌症的可能性是标准系统活检的 3 倍(21% vs 7%)^[21]。另有研究报道,在既往前列腺活检阴性的患者中,MRI-TRUS 融合靶向活检对 Gleason 评分 ≥ 7 分的 PCa 检出率高于系统活检^[22]。

目前,国际市场上已出现了一系列 MRI-TRUS 图像融合商业化平台,可用于 PCa 穿刺活检术中引导,其在软件界面、实时 3D-TRUS 图像的采集技术、探头追踪方式、图像融合方法、活检路径选择方面有所不同。然而,也有相关研究报道,经直肠超声探头对前列腺腺体的挤压、患者体位的

改变等因素会引起腺体平移和旋转,进而导致的融合精度下降,使得 MRI-TRUS 图像融合穿刺活检的阳性检出率与认知融合无显著差异^[23]。

国产 Venus 多模态影像融合超声诊断系统,采用 AI 辅助的配准融合技术^[24],结合电磁导航技术,可实现 PCa 病灶在空间上的自由追踪和定位、3D 自动布针和穿刺路径规划。通过融合影像和 3D 成像更为直观地展示病灶,从而缩短学习曲线,避免漏诊,提高阳性检出率^[25]。

目前,我国前列腺穿刺活检引导方式正处于由传统超声指引过渡到认知融合指引,大部分医院仍采用传统经直肠超声引导穿刺活检,部分三甲医院采用 MRI-TRUS 认知融合穿刺活检,仅有少数头部三甲医院开展 MRI-TRUS 图像融合穿刺活检,新技术的推广应用将有助于 PCa 精准诊疗在更多医院落地,惠及更多 PCa 患者。

3 小结

US 和 CT/MRI 融合成像技术可实现不同影像之间的优势互补,将超声的实时便携的特点与 CT/MRI 对组织结构的直观显示的特点相结合,使用者手持超声探头即可实现 CT/MRI 实时引导下的精准穿刺。随着技术的成熟,US 和 CT/MRI 融合成像技术逐步应用于泌尿外科领域,US-CT 能实时、精准、可视化建立 PCNL 通道,并在术中实时进行最优路径规划,从而精准引导经“肾盏穹隆-盏颈轴线方向”的通道建立,减少操作者经验不足所致偏差,缩短学习曲线;MRI-TRUS 能快速精准定位 PCa 可疑病灶并引导穿刺,提高穿刺阳性率、降低临床无意义 PCa 的检出。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参考文献

- [1] 李伟,朱学峰.医学图像融合技术及其应用[J].中国医学影像技术,2005,21(7):1126-1129.
- [2] 中华医学会泌尿外科分会结石学组,中国泌尿系结石联盟.经皮肾镜取石术中国专家共识[J].中华泌尿外科杂志,2020,41(6):401-404.
- [3] Jiang XY, Hu ZJ, Wang SH, et al. Deep learning for medical image-based cancer diagnosis [J]. Cancers, 2023,15(14):3608.
- [4] Lee MW. Fusion imaging of real-time ultrasonography with CT or MRI for hepatic intervention[J]. Ultrasonography, 2014,33(4):227-239.
- [5] Niesche A, Müller M, Ehreiser F, et al. Smart bioimpedance-controlled craniotomy: Concept and first experiments[J]. Proc Inst Mech Eng H, 2017,231(7):673-680.
- [6] Hamamoto S, Unno R, Taguchi K, et al. A new navigation system of renal puncture for endoscopic combined intrarenal surgery: real-time virtual Sonography-guided renal access[J]. Urology, 2017,109:44-50.
- [7] Yu WM, Ruan Y, Xiong Z, et al. The outcomes of minimally invasive percutaneous nephrolithotomy with different access sizes for the single renal stone ≤ 25 mm: a randomized prospective study[J]. Urol Int, 2022,106(5):440-445.
- [8] Ghani KR, Patel U, Anson K. Computed tomography for percutaneous renal access[J]. J Endourol, 2009,23(10):1633-1639.
- [9] 余伟民,曹君,阮远,等.超声引导“经肾盏穹隆-盏颈轴线两步穿刺法”建立经皮肾通道[J/OL].中华腔镜泌尿外科杂志(电子版),2016,10(3):148-152.
- [10] Lima E, Rodrigues PL, Mota P, et al. Ureterscopy-assisted percutaneous kidney access made easy: first clinical experience with a novel navigation system using electromagnetic guidance (IDEAL stage 1) [J]. Eur Urol, 2017,72(4):610-616.
- [11] 李建兴,肖博,唐宇哲,等.融合影像技术在超声定位经皮肾镜手术中的初步应用[J].中华泌尿外科杂志,2017,38(9):658-661.
- [12] Shen XB, Li KW, Wu ZY, et al. A novel computed tomography-ultrasound image fusion technique for guiding the percutaneous kidney access [J]. Urol J, 2023,20(4):208-214.
- [13] Siegel RL, Miller KD, Wagle NS, et al. Cancer statistics, 2023 [J]. CA Cancer J Clin, 2023,73(1):17-48.
- [14] Bray F, Laversanne M, Sung H, et al. Global cancer statistics 2022: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries [J]. CA Cancer J Clin, 2024,74(3):229-263.
- [15] Connor MJ, Gorin MA, Eldred-Evans D, et al. Landmarks in the evolution of prostate biopsy [J]. Nat Rev Urol, 2023,20(4):241-258.
- [16] Geiger-Gritsch S, Oberaigner W, Mühlberger N, et al. Patient-reported urinary incontinence and erectile dysfunction following radical prostatectomy: results from the European Prostate Centre Innsbruck [J]. Urol Int, 2015,94(4):419-427.
- [17] Venderink W, van der Leest M, van Luijcklaar A, et al. Retrospective comparison of direct in-bore magnetic resonance imaging (MRI)-guided biopsy and fusion-guided biopsy in patients with MRI lesions which are likely or highly likely to be clinically significant prostate cancer [J]. World J Urol, 2017,35(12):1849-1855.
- [18] Drăgoescu PO, Drocaș AI, Drăgoescu AN, et al. Transperineal Prostate Biopsy Targeted by Magnetic Resonance Imaging Cognitive Fusion [J]. DIAGNOSTICS (BASEL), 2023,13(8):1373.
- [19] Siddiqui MM, Rais-Bahrami S, Turkbey B, et al. Comparison of MR/ultrasound fusion-guided biopsy with ultrasound-guided biopsy for the diagnosis of prostate cancer [J]. JAMA, 2015,313(4):390-397.
- [20] Rastinehad AR, Turkbey B, Salami SS, et al. Improving detection of clinically significant prostate cancer: magnetic resonance imaging/transrectal ultrasound fusion guided prostate biopsy [J]. J Urol, 2014,191(6):1749-1754.

- teral strictures; initial experience of nine patients[J]. J Endourol, 2020, 34(8): 874-881.
- [24] Filipas D, Fisch M, Fichtner J, et al. The histology and immunohistochemistry of free buccal mucosa and full-skin grafts after exposure to urine[J]. BJU Int, 1999, 84(1): 108-111.
- [25] Naude JH. Buccal mucosal grafts in the treatment of ureteric lesions[J]. BJU Int, 1999, 83(7): 751-754.
- [26] Xu YJ, Sun L, Pan QF, et al. A new technique for ureteral reconstruction using lingual mucosa grafts in a beagle model[J]. Int Urol Nephrol, 2021, 53(1): 83-89.
- [27] Horiguchi A. Editorial Comment to Buccal mucosal ureteroplasty for the management of ureteric strictures: a systematic review of the literature[J]. Int J Urol, 2021, 28(2): 195.
- [28] Soave A, Dahlem R, Pinnschmidt HO, et al. Substitution urethroplasty with closure versus nonclosure of the buccal mucosa graft harvest site: a randomized controlled trial with a detailed analysis of oral pain and morbidity[J]. Eur Urol, 2018, 73(6): 910-922.
- [29] Simonato A, Gregori A, Lissiani A, et al. The tongue as an alternative donor site for graft urethroplasty: a pilot study[J]. J Urol, 2006, 175(2): 589-592.
- [30] Cheng SD, Fan SB, Wang J, et al. Laparoscopic and robotic ureteroplasty using onlay flap or graft for the management of long proximal or middle ureteral strictures: our experience and strategy[J]. Int Urol Nephrol, 2021, 53(3): 479-488.
- [31] Fan SB, Yin L, Yang KL, et al. Posteriorly augmented anastomotic ureteroplasty with lingual mucosal onlay grafts for long proximal ureteral strictures: 10 cases of experience[J]. J Endourol, 2021, 35(2): 192-199.
- [32] Yang KL, Fan SB, Wang J, et al. Robotic-assisted lingual mucosal graft ureteroplasty for the repair of complex ureteral strictures: technique description and the medium-term outcome[J]. Eur Urol, 2022, 81(5): 533-540.
- [33] 李兵, 徐玉节, 海波, 等. 腹腔镜舌黏膜输尿管成形术修复输尿管上段狭窄的初步临床应用[J]. 临床泌尿外科杂志, 2015, 30(10): 869-871.
- [34] Li B, Zhou YC, Chai SS, et al. Robotic lingual mucosal graft ureteroplasty combined with Boari flap ureteroneocystostomy for one-stage repair of complex ureteral strictures: initial experience [J]. Int Urol Nephrol, 2023, 55(4): 893-895.
- [35] 李学松. 机器人腹腔镜一期双侧输尿管狭窄修复术左侧舌黏膜补片技术+右侧阑尾补片技术[J]. 中华泌尿外科杂志, 2022, 43(8): 592.
- [36] Xu KL, Han Y, Huang YY, et al. The application of 3D bioprinting in urological diseases[J]. Mater Today Bio, 2022, 16: 100388.
- [37] Huang JW, Lv XG, Li Z, et al. Urethral reconstruction with a 3D porous bacterial cellulose scaffold seeded with lingual keratinocytes in a rabbit model[J]. Biomed Mater, 2015, 10(5): 055005.
- [38] Xu YF, Meng QH, Jin X, et al. Biodegradable scaffolds for urethra tissue engineering based on 3D printing [J]. ACS Appl Bio Mater, 2020, 3(4): 2007-2016.
- [39] Yang M, Zhang Y, Fang C, et al. Urine-microenvironment-initiated composite hydrogel patch reconfiguration propels scarless memory repair and reinvigoration of the urethra [J]. Adv Mater, 2022, 34(14): e2109522.
- [40] Sharma S, Gupta DK. Tissue engineering and stem cell therapy in pediatric urology[J]. J Indian Assoc Pediatr Surg, 2019, 24(4): 237-246.
- [41] Luo J, Zhao S, Wang J, et al. Bone marrow mesenchymal stem cells reduce ureteral stricture formation in a rat model via the paracrine effect of extracellular vesicles[J]. J Cell Mol Med, 2018, 22(9): 4449-4459.
- [42] Ueshima E, Fujimori M, Kodama H, et al. Macrophage-secreted TGF- β 1 contributes to fibroblast activation and ureteral stricture after ablation injury[J]. Am J Physiol Renal Physiol, 2019, 317(7): F52-F64.

(收稿日期: 2023-09-10)

(上接第 742 页)

- [21] Sonn GA, Natarajan S, Margolis DJ, et al. Targeted biopsy in the detection of prostate cancer using an office based magnetic resonance ultrasound fusion device [J]. J Urol, 2013, 189(1): 86-91.
- [22] Mendhiratta N, Meng XS, Rosenkrantz AB, et al. Pre-biopsy mri and MRI-ultrasound fusion-targeted prostate biopsy in men with previous negative biopsies: impact on repeat biopsy strategies[J]. Urology, 2015, 86(6): 1192-1198.
- [23] Scattoni V, Maccagnano C, Capitanio U, et al. Random biopsy: when, how many and where to take the cores? [J]. World J Urol, 2014, 32(4): 859-869.
- [24] Wu ML, He XC, Li F, et al. Weakly supervised volumetric prostate registration for MRI-TRUS image driven by signed distance map[J]. Comput Biol Med, 2023, 163: 107150.
- [25] 杨勇军, 贺显雅, 曾一鸣, 等. 局麻下电磁针尖引导经会阴前列腺 mpMRI-TRUS 影像融合靶向穿刺的临床应用[J]. 肿瘤防治研究, 2024, 51(1): 55-60.

(收稿日期: 2024-05-14)