

三维重建应用于肾脏肿瘤外科手术专家共识

中国抗癌协会泌尿肿瘤专业委员会 中国临床肿瘤学会肾癌专家委员会

摘要 肾脏肿瘤的手术治疗一直是泌尿科领域的重点和难点。传统的二维影像学检查虽然能够提供一定的解剖信息,但在肿瘤的精确定位、手术规划和风险评估方面存在局限性。三维重建技术通过展示更为直观和详细的解剖结构,使得外科医师能够更好地理解肿瘤与周围组织的关系,从而制定更为精确和个性化的手术方案。基于相关循证医学证据和专家共识,中国抗癌协会泌尿肿瘤专业委员会联合中国临床肿瘤学会肾癌专家委员会从三维重建的临床应用角度制定了《三维重建应用于肾脏肿瘤外科手术专家共识》,旨在规范三维重建技术在肾脏肿瘤外科领域内的应用,更好地服务于临床诊治,使患者受益。

关键词 肾脏肿瘤 三维重建 外科手术 专家共识

doi:10.12354/j.issn.1000-8179.2024.20240444

Expert consensus on the application of 3D reconstruction in renal tumor surgery

China Anti-Cancer Association Committee of Urology Oncology, Chinese Society of Clinical Oncology Experts Committee on Renal Carcinoma

Correspondence to: Xin Yao; E-mail: yaoxin@tjmuch.com

Abstract The surgical treatment of renal tumors has always been a challenge in the field of urology. Although traditional two-dimensional imaging provides certain anatomical information, it is limited in accurately locating tumor positions, aiding in surgical planning, and assessing risks. Three-dimensional (3D) reconstruction technology offers a more intuitive and detailed representation of anatomical structures, enabling surgeons to better understand the relationship between tumors and surrounding tissues and develop more precise and personalized surgical plans. Based on relevant medical evidence and expert consensus, the Urological Tumor Committee of the Chinese Anti-Cancer Association and the Experts Committee on Renal Carcinoma of the Chinese Society of Clinical Oncology formulated the "Expert Consensus on the Application of 3D Reconstruction in Renal Tumor Surgery," which aims to standardize the application of 3D reconstruction in renal tumor surgery to enhance clinical diagnostics and treatment, ultimately benefiting patients.

Keywords: renal tumor, three-dimensional (3D) reconstruction, surgery, expert consensus

外科手术切除是肾脏肿瘤的主要治疗方式。在当前“精准外科”时代,随着腹腔镜及机器人技术的普及,大多数肾脏外科手术均可采用微创技术完成,然而,对于最佳手术方案规划和手术导航的需求仍未得到充分满足。三维重建是指利用 CT 或 MRI 等影像资料,结合计算机图像处理技术,进行深度的图像分析、数据融合、精确计算和精准分割,最终生成高质量的 3D 虚拟图像或实体模型。借助三维重建,脏器、肿瘤、血管等目标的形状与空间位置均能够被正确描绘与理解,其能够直观、准确地展示目标结构,更能在视觉上迅速将目标从复杂背景中分离出来,使医生能够一目了然地把握病情。在肾脏肿瘤外科手术的术前准备阶段,三维重建技术为医生提供了宝贵的认知信息,医生可以依据这些精确的 3D 模型,为患者量身定制个性化的手术方案,选择最佳的手术入路。这不仅提高了手术的精准度,也极大提升了患者的治疗效果和生活质量^[1]。此外,在微创手术过程中,将这些 3D 虚拟模型

转移并覆盖到实际手术现场,使得虚拟图像能够在内窥镜视图上实时叠加展示,为增强现实(augmented reality, AR)手术铺平了道路。

目前三维重建方式较多,不同肾脏肿瘤手术对于三维重建的需求各有不同。为规范三维重建技术在肾脏肿瘤外科手术中的应用,中国抗癌协会泌尿肿瘤专业委员会和中国临床肿瘤学会肾癌专家委员会组织国内相关领域部分专家,基于现有的循证医学证据,结合临床实践经验,经过讨论和修改,制定本专家共识,希望为此技术的临床应用提供指导。采用德尔菲方法对初拟的推荐建议进行专家函询,投票设置同意、不确定、不同意 3 个选项,1 级: 同意;2 级: 不确定;3 级: 不同意;推荐等级根据专家投票分为强推荐、弱推荐 2 个级别:“同意”票数超过 80% 为强推荐;“同意”+“不确定”票数超过 80% 为弱推荐。

1 肾肿瘤的术前评估

肾脏位于腹膜后间隙,周围有肝脏、脾脏和结肠

等脏器与之相隔,但部分结肠、十二指肠以及肌肉、筋膜、血管和淋巴组织等则通过疏松结缔组织与肾脏连接。疏松结缔组织的厚度决定了与其相邻的程度。在进行肾脏手术时,对肾脏血管与肿瘤进行精细的剥离,是手术成功与否的关键。因此,在诊疗过程中,对肾脏及其周围的解剖结构进行精准评估显得尤为重要。

目前,肾脏肿瘤的影像学评估主要依靠 CT/MRI,虽然 CT/MRI 对于肾脏肿瘤的鉴别诊断有较高的准确率^[2],然而,由于这些影像是二维的,无法立体方式展示肿瘤、血管、周围器官及其之间的关系,更多需要结合术者的经验预先进行手术规划,模拟手术过程。近年来,随着数字医学技术和三维重建精准诊疗理论与实践的不断发展,三维重建技术在临床应用上逐渐普及^[3]。相较于传统的二维图像,三维可视化模型具备更直观、更精确的特点^[4]。这种模型可以实现全方位旋转、任意缩放和组合显示,能够清晰展示肿瘤的大小、形态,血管的走向和形态,更深入地揭示肿瘤与周围器官及血管的解剖关系和侵犯情况(图 1)。在肾脏肿瘤的术前评估中,三维可视化模型的优势尤为突出,其减少了医生在解读原始 CT 图像时可能出现的主观失误,使术前评估更加真实可靠^[5]。深入了解肾脏的血管和肿瘤解剖结构对于避免损害肾实质和主要血管以及实现完全切除肿瘤非常重要,特别是一些复杂肾肿瘤行保留肾单位手术时(如完全内生型或位于肾窦位置肾肿瘤)。三维可视化图像还能够在软件上进行模拟切割,并评估切割体积大小,从而预测手术后残余肾脏的大小,这一功能不仅有利于医生制定更为精细的手术计划,还有助于提升医患之间的沟通效果,使患者更好地理解和接受治疗方案。

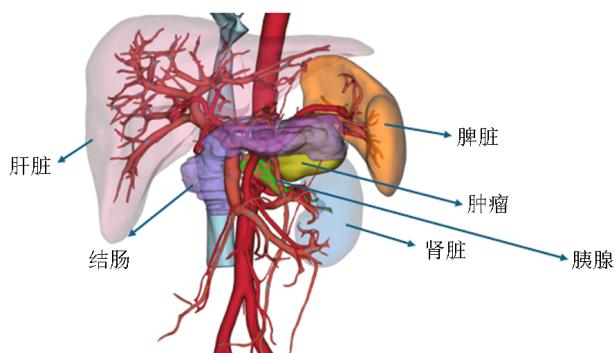


图 1 三维重建下的肾脏及其相邻脏器

共识 1: 肾肿瘤患者在接受手术前应进行手术风险评估,建议有条件的医疗单位可以利用三维重建技术对肾脏进行进一步精准评估,特别是在保留肾功能的手术中。三维重建可辅助手术规划设计,通过三维重建,可以提供更多关于肿瘤的信息,包括肿瘤边界整体形态、血液供应情况以及与肾血管的关系(图 2)(证据质量:高,推荐级别:强推荐,共识水平:同意 100%)。

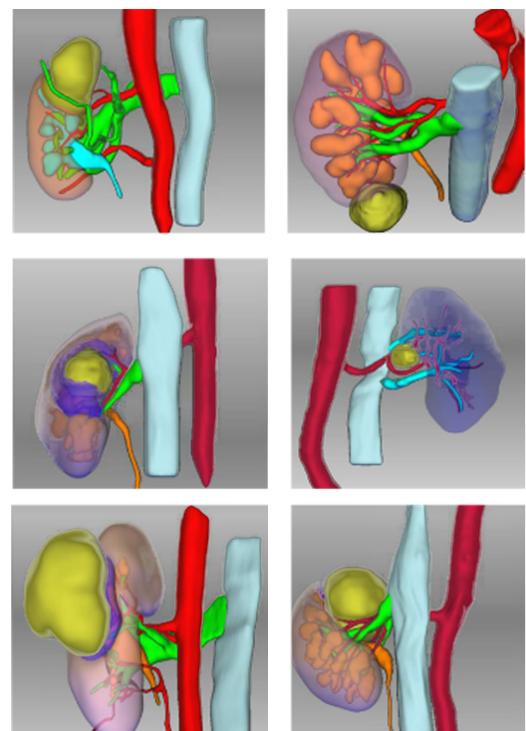


图 2 不同部位肾脏肿瘤的三维图像

2 三维重建数据采集

为获得更为精准的肾脏三维可视化重建模型,本文建议在 CT 扫描时覆盖全腹腔。为确保数据的精准程度,扫描层厚度宜设定为能够导出重建数据的最小值(≤ 1 mm)。此外,选择对比度良好的增强造影剂也至关重要,能有效提升 CT 数据的信噪比,使得图像更为清晰。扫描完成后,将强化 CT 图像数据分为三期(动脉期、静脉期、排泄期),层厚不超过 1 mm,并存储在光盘上,格式为医学数字影像与通讯(DICOM)。CT 图像数据的质量直接关系到后续肾脏三维可视化模型的准确性^[6]。MRI 检查也可用于三维重建。在 CT/MRI 扫描过程中,扫描厚度与层数对于肿瘤及血管重建的精细度起着至关重要的作用。扫描厚度减小能够提高血管显示的精密度,而层数的增多则可使肾脏及其周围的肿瘤结构展示更加明晰。

共识 2: 在进行三维重建之前,临床医生应优先调整扫描参数,确保获取高质量的强化 CT/MRI 图像数据,图像质量需符合三维重建软件的最低原始图像标准,以保证信息的完整性与精准度。随后,医生应严格遵循三维重建的操作规范,进行高标准的三维可视化处理,以提升手术规划和执行的精准度与安全性(证据质量:高,推荐级别:强推荐,共识水平:同意 100%)。

3 肾脏三维重建模型的建立

三维重建和数据分析包含以下流程:1)图像预处理,系统生成最初的三维图像。2)描绘肾脏、肿瘤及周边器官轮廓,并在系统生成的肾脏轮廓上手动调整。3)对肾脏血管进行分割及标记,可自动重现血管系统

形态,也可手动调整。4)配准和融合,确保不同图像上的所有点匹配,将不同时间段采集的动脉期和静脉期图像融合成新图像。5)可视化图像显示与操作,分别或同时显示肾脏轮廓、肾动脉、肾静脉、集合系统和病灶等。标记肿瘤解剖结构、空间定位及其侵犯范围,并可以进行放大、缩小、旋转以及透明度调整和着色等操作。从而实现全方位立体观察并了解各器官、组织解剖结构以及空间位置关系。

三维重建本质上是对二维原始图像信息的升华与重塑。在此过程中,尽管部分原始信息有所遗失,但通过先进的软件技术和医生的精确操作,仍能构建出更为直观的三维图像。目前大多数软件通过大数据学习人工智能(*artificial intelligence, AI*)自动生成肿瘤及相应脏器的三维重建,但在精准描绘肿瘤边界时,仍需要人工的精确圈定。因此,完成三维可视化处理的专业人员应具有扎实的解剖学基础、外科相关疾病知识和丰富的阅片经验,三维重建的准确性很大程度上依赖于医生阅片的准确性以及软件操作的精准度。在三维重建过程中需要结合原始二维图像进行综合判断,以减少误差发生。

共识 3:在临床实践中,多款软件皆可用于进行三维可视化重建。院外的开展三维重建检测的机构应为资质齐全、拥有成熟完善技术和完善的质量控制流程的正规公司。院内开展的三维重建检测,临床医师、影像科医师和技师应该共同合作,根据临床需求创建精确的三维可视化模型,为病情的全面评估奠定基础(证据质量:高,推荐级别:强推荐,共识水平:完全同意 100%)。

4 三维重建在肾脏肿瘤中的临床应用

4.1 术前规划

肾脏的血管系统复杂多变,其中肾血管数量的变异尤为显著,单纯数量异常的变异高达 30%^[7]。综合考虑肾血管在腹主动脉、下腔静脉的起始部位、数量、相互间距、血管走形以及前后关系等变异因素,总体血管变异率更高(图 3)。因此,对肾血管的精确判断显得尤为重要。在保留肾单位手术中,通过三维重建技术可以精确观察肾血管的起始位置及走形、数量和间距,从而选择合适的阻断血管及阻断位置,减少因阻断不全而引起的出血。对于实施高选择性阻断或免阻断手术的保留肾单位手术,更需要对肾血管及肿瘤供应血管进行精确评估。此外,在决定手术是经腹腔还是经后腹腔入路时,确定肿瘤的突出方向也至关重要。在这方面,三维重建技术展现出其独特的优势,能够更为直观、准确地展示肿瘤位置以及与周围血管之间的关系,为手术决策提供有力的支持。

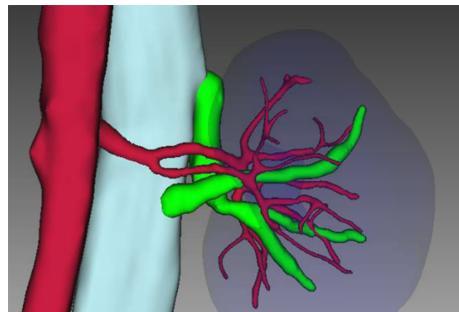


图 3 血管异常(动脉分叉过早, 静脉数目、走形异常)

肿瘤形态是选择保留肾单位手术或标准切除手术时的重要考量因素。对于肾静脉瘤栓患者,瘤栓位置的不同决定了对腔静脉分支血管如腰静脉、肝短静脉的处理方式^[8]。通过三维重建技术,能获得更清晰的可视化效果,不仅可以从屏幕上进行固相到透明度窗口的灵活切换,还能实现旋转、放大等操作,以便更细致地观察病变情况,从而帮助医生制定更精确的治疗方案。

共识 4:三维重建技术可以提供肾脏肿瘤的地形图和肾内解剖的多平面视图,从而有助于精确规划肾脏肿瘤的手术。该技术在重建肿瘤周围的解剖结构、微小血管和组织方面具有高度准确性,能够为患者创建个性化的 3D 模型,有助于外科医生更直观、更深入地了解病情。相较于原始的 2D 数据集,三维重建是一种更加精准的技术,可帮助外科医生以最小切缘切除肿瘤,更安全地完成手术(证据质量:高,推荐级别:强推荐,共识水平:同意 100%)。

共识 5:对于复杂肾肿瘤的保留肾单位手术(R.E.N.A.L 评分>7 分,完全内生性肾肿瘤,肾窦部位肿瘤)以及普通影像预估血管解剖关系复杂的肾肿瘤(图 4),建议术前三维重建评估。对于行高选择性阻断及免阻断保留肾单位手术,建议术前行三维重建评估肿瘤血供。以便辅助手术决策,做好充分的术前规划(证据质量:中等,推荐级别:强推荐,共识水平:同意 100%)。

共识 6:建议拟行微创根治性肾脏全切手术术前行三维重建评估,特别是对肾癌伴腔静脉瘤栓的患者(证据质量:低,推荐级别:弱推荐,共识水平:同意 71.4%,不确定 28.6%)。

4.2 术前评估

Bertolo 等^[9]在其实践经验中指出,术前的三维重建技术对于高度复杂的肾肿瘤保留肾单位手术具有帮助。这种先进技术能够精确地再现解剖结构,与实际解剖情况高度一致,有助于机器人辅助保留肾单位手术。近二十年来,肾脏肿瘤的术前测量评分得到迅速发展,并广泛应用于预测保留肾单位手术难度和风险。PADUA 和 R.E.N.A.L 评分就是其中的杰出代表,其

不仅成为客观分析肾肿瘤手术复杂性的有效工具,还能对实施保留肾单位手术的风险进行精准评估^[10]。值得一提的是,一些研究^[11-13]发现基于 3D 的肾脏肿瘤评分(PADUA 和 R.E.N.A.L)计算得出的结果相较于基于 2D 的评分系统更为精确,在预测主要并发症方面准确率更高。此外, Hwang 等^[14]提出一种基于 3D 多维度及交互式影像报告系统,其能够精准地跟踪和量化肾脏(肿瘤)的各项指标,这种智能的 3D 模型能够更好地识别是否存在多发性、淋巴结转移,还能更精确地反映实体瘤评价标准(RECIST)的线性测量。国内一项研究^[15]基于三维重建图像开发了 ROADS 评分系统,该系统对肾窦肿瘤提供基于 3D 解剖分类的标准化、定量评分,并根据风险程度进行层次划分,为制定个性化的手术策略提供有力支持。综上所述,这些基于 3D 重建的术前评估系统不仅提升了手术评估的精准度,更为外科医生在制定复杂肾肿瘤手术策略时提供更加全面和深入的信息。随着技术的不断进步和完善,相信这些系统在肾脏肿瘤的治疗中将发挥越来越重要的作用。

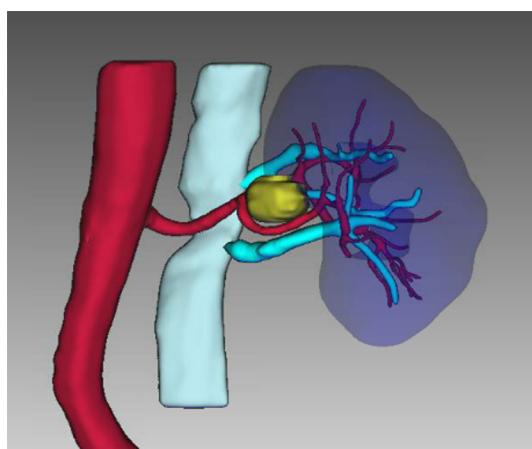


图 4 肾窦部位肿瘤与血管关系

肾脏手术后出现肾功能不全和慢性肾脏疾病是外科手术需要密切关注的问题。术后的肾功能与切除的皮质体积有着密切关系,因此在手术前可以利用三维重建图像来计算丢失的肾体积,进而预测机器人辅助下保留肾单位手术后的肾功能^[16]。Meyer 等^[17]研究发现,精确的 3D 体积分析、缺血时间、肿瘤大小以及内生/外生特征是评估肾功能丢失影响因素。此外,高精度的 3D 重建技术可以更好地重建复杂的肾肿瘤,并成功实施选择性动脉夹闭,在机器人保留部分肾单位手术期间最大限度地降低缺血造成损害^[18]。

共识 7: 保留肾单位手术,特别是对于复杂肾肿瘤的保留肾单位手术,建议在手术前进行三维重建以评估手术风险,基于三维重建的肾肿瘤评分体系更加精

确(证据质量: 中等, 推荐级别: 强推荐, 共识水平: 同意 92.9%, 不确定 7.1%)。

4.3 术中导航

全息影像技术是利用超声波、电子波等的干涉和衍射原理,对物体进行扫描记录后处理为全息图像,再通过三维重建技术制作出高清晰度、大小还原度高、立体感强的三维影像^[19]。全息影像可以在手术中通过投影的方式将虚拟的信息投影到真实环境中,通过虚拟物体叠加到现实空间的方式,让医生可以结合三维立体图像来实时指导手术操作(图 5)。目前该技术在保留肾单位手术中应该较多,其不仅有术前规划优势,还能用作术中导航。全息影像有助于医生实时判断血管位置、选择血管阻断位置和肿瘤切除边界,提供更精准的术中指导,有效避免手术的盲目性,缩短手术时间,减少并发症,提高手术的安全性和便捷性^[20]。然而,目前这种混合现实技术还处于起步阶段,在使用过程中存在一些问题。例如,在配准及跟踪方面并不能达到完全自动化,无法完美地将三维影像与实际解剖融合,此外,全息影像技术只能在 3D 腹腔镜或机器人手术系统下才能发挥作用,也限制了该技术的推广应用。

共识 8: 基于三维重建的全息影像技术适合于 3D 手术视野下,可以在实施手术时提供实时指导,但目前仍处于早期应用阶段。大部分专家认为并未达到广泛应用的程度,需要后续进一步研究改进(证据质量: 低, 推荐级别: 弱推荐, 共识水平: 同意 78.6%, 不确定 21.4%)。

4.4 医学教育和医患沟通

三维重建技术在医学生教育、泌尿科住院医师培训以及科学的研究中具有实用的价值。对于正在学习保留肾单位手术的医生,准确确定肿瘤位置能够最大限度地减少主要并发症。Rai 等^[21]研究证明,与传统的二维影像教学相比,使用交互式三维虚拟现实模拟器环境(dV-Trainer 虚拟)进行培训的医学生能够更准确地定位肾脏肿块的解剖位置,而只接触二维平面图像的学员则表现较差。此外,与经验丰富的外科医生使用标准二维平面成像生成的肾测量评分系统相比,使用三维肾脏模型进行培训可以更准确地定位肾脏肿瘤^[22]。Knoedler 等^[23]也发现,使用三维打印物理模型可以提高医学生在肾脏肿瘤测量评分中 R、N 和 L 分数方面的能力。因此,在手术培训和学习能力方面,三维重建系统具有显著实用性。通过三维成像技术,外科医生更容易理解从二维图像中的位置信息,并且更准确地评估手术复杂性。

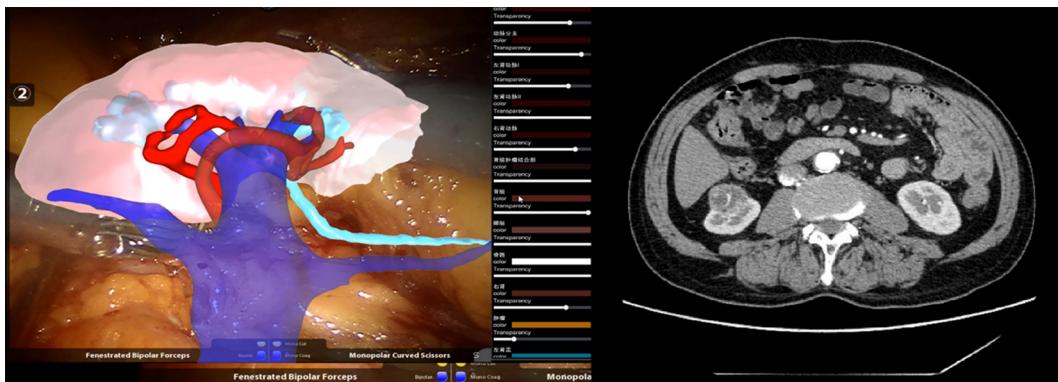


图 5 全息影像下的机器人辅助肾部分切除术

有效的医患沟通可以提升患者满意度。通常情况下,患者对于黑白色彩的横断面医学图像感到陌生。因此,针对患者制作 3D 模型可以提高其对疾病状况和任何潜在治疗目标的理解。Schmit 等^[24]研究表明,3D 冷冻消融模型对于患者了解其肾肿瘤解剖是“绝对推荐的”,并且得到了较高的满意度评分 [平均等级 > 9 分(0~10 分制)]。此外,与单独 2D 成像相比,3D 打印模型可以改善术前会诊期间的医患沟通,在这方面,许多患者和家属口头表达了能更好地理解自己的病情和治疗方案^[25]。进一步的研究显示,在使用个人 3D 肾脏模型后,患者在基本肾脏生理、肾脏解剖、肿瘤特征以及计划手术过程的了解都有显著提高^[26]。值得一提的是,在对患者进行保留肾单位手术的术前沟通时,年龄较大的人群(65 岁或以上)仅使用 2D CT 扫描成像难以理解解剖学和肿瘤形态学信息,因此 3D 模型在这些情况下尤为重要^[27]。

共识 9: 对于肾脏外科手术的处于学习阶段的医生,术前三维重建可以缩短其学习曲线。在条件允许情况下,学习曲线阶段尽量行术前三维重建来缩短学习曲线,减少手术风险(证据质量: 中等, 推荐级别: 弱推荐, 共识水平: 同意 71.4%, 不确定 28.6%)。

共识 10: 针对高风险肾脏手术,建议使用术前三维重建来帮助患者更好地理解手术过程及可能的风险,有助于医患之间的沟通交流(证据质量: 中等, 推荐级别: 强推荐, 共识水平: 同意 100%)。

5 结语与展望

本共识根据近期研究成果,将三维重建在肾脏肿瘤外科手术中的应用情况,从辅助学习手术、医患沟通、手术决策制定、手术风险评估、手术方案设计等方面进行了推荐。三维重建技术的规范应用将为肾脏肿瘤患者个体化精准诊疗奠定基础。相信随着这项技术的普及,临床实践将会越来越规范,也将在肾脏肿瘤外科临床诊疗中发挥更加重要的作用。

共识编写专家委员会

组长:

姚 欣 天津医科大学肿瘤医院

专家组成员(按姓氏拼音顺序排列):

陈旭升	天津医科大学肿瘤医院
董 培	中山大学附属肿瘤医院
李恭会	浙江大学医学院附属邵逸夫医院
李宁忱	北京大学首钢医院
李学松	北京大学第一医院
刘 谦	天津市第一中心医院
刘志宇	大连医科大学附属第二医院
马 鑫	中国人民解放军总医院
史本康	山东大学齐鲁医院
魏 峰	河北省沧州中西医结合医院
姚 欣	天津医科大学肿瘤医院
张爱莉	河北医科大学第四医院
张海梁	复旦大学附属肿瘤医院
朱 刚	北京和睦家医院

执笔人:

廖文峰 天津医科大学肿瘤医院

本文无影响其科学性与可信度的经济利益冲突。

参考文献

- [1] Komai Y, Sakai Y, Gotohda N, et al. A novel 3-dimensional image analysis system for case-specific kidney anatomy and surgical simulation to facilitate clampless partial nephrectomy[J]. Urology, 2014, 83(2):500-506.
- [2] Vogel C, Ziegermüller B, Ljungberg B, et al. Imaging in suspected renal-cell carcinoma: systematic review[J]. Clin Genitourin Cancer, 2019, 17(2):e345-e355.
- [3] Piramide F, Kowalewski KF, Cacciamani G, et al. Three-dimensional model-assisted minimally invasive partial nephrectomy: a systematic review with meta-analysis of comparative studies[J]. Eur Urol Oncol, 2022, 5(6):640-650.
- [4] Shirk JD, Thiel DD, Wallen EM, et al. Effect of 3-dimensional virtual reality models for surgical planning of robotic-assisted partial nephrectomy on surgical outcomes: a randomized clinical trial[J]. JAMA Netw Open, 2019, 2(9):e1911598.
- [5] Shirk JD, Kwan L, Saigal C. The use of 3-dimensional, virtual reality models for surgical planning of robotic partial nephrectomy[J]. Urology, 2019, 125:92-97.
- [6] Geng J. Three-dimensional display technologies[J]. Adv Opt Phot

- tonics, 2013, 5(4):456-535.
- [7] Bouali O, Labarre D, Molinier F, et al. Anatomic variations of the renal vessels: focus on the precaval right renal artery[J]. *Surg Radiol Anat*, 2012, 34(5):441-446.
- [8] Wang BJ, Li HZ, Huang QB, et al. Robot-assisted retrohepatic inferior vena Cava thrombectomy: first or second *Porta hepatis* as an important boundary landmark[J]. *Eur Urol*, 2018, 74(4):512-520.
- [9] Bertolo R, Autorino R, Fiori C, et al. Expanding the indications of robotic partial nephrectomy for highly complex renal tumors: urologists' perception of the impact of hyperaccuracy three-dimensional reconstruction[J]. *J Laparoendosc Adv Surg Tech A*, 2019, 29(2):233-239.
- [10] Schiavina R, Novara G, Borghesi M, et al. PADUA and R.E.N.A.L. nephrometry scores correlate with perioperative outcomes of robot-assisted partial nephrectomy: analysis of the Vattikuti Global Quality Initiative in Robotic Urologic Surgery (GQI-RUS) database[J]. *BJU Int*, 2017, 119(3):456-463.
- [11] Bianchi L, Schiavina R, Bortolani B, et al. Interpreting nephrometry scores with three-dimensional virtual modelling for better planning of robotic partial nephrectomy and predicting complications[J]. *Urol Oncol*, 2021, 39(12):836.e1-836836.
- [12] Porpiglia F, Amparore D, Checcucci E, et al. Three-dimensional virtual imaging of renal tumours: a new tool to improve the accuracy of nephrometry scores[J]. *BJU Int*, 2019, 124(6):945-954.
- [13] Liu JC, Liu J, Wang S, et al. Three-dimensional nephrometry scoring system: a precise scoring system to evaluate complexity of renal tumors suitable for partial nephrectomy[J]. *PeerJ*, 2020, 8: e8637.
- [14] Hwang DH, Ma K, Yipes F, et al. Multidimensional Interactive Radiology Report and Analysis: Standardization of workflow and reporting for renal mass tracking and quantification[J]. *Proc SPIE Int Soc Opt Eng*, 2015, 9681:96810C.
- [15] Huang QB, Gu LY, Zhu J, et al. A three-dimensional, anatomy-based nephrometry score to guide nephron-sparing surgery for renal sinus tumors[J]. *Cancer*, 2020, 126(Suppl_9):2062-2072.
- [16] Corradi R, Kabra A, Suarez M, et al. Validation of 3D volumetric-based renal function prediction calculator for nephron sparing surgery[J]. *Int Urol Nephrol*, 2017, 49(4):615-621.
- [17] Meyer A, Woldu SL, Weinberg AC, et al. Predicting renal parenchymal loss after nephron sparing surgery[J]. *J Urol*, 2015, 194(3): 658-663.
- [18] 郭胜杰, 魏力超, 卓水清, 等. 三维手术规划系统引导机器人辅助选择性血管阻断肾部分切除术治疗完全内生型肾肿瘤的临床效果分析[J]. 中华外科杂志, 2022, 60(11):992-998.
- [19] Ukimura O. Image-guided surgery in minimally invasive urology[J]. *Curr Opin Urol*, 2010, 20(2):136-140.
- [20] Wu XH, Liu R, Yu J, et al. Mixed reality technology-assisted orthopedics surgery navigation[J]. *Surg Innov*, 2018, 25(3):304-305.
- [21] Rai A, Scovell JM, Xu A, et al. Patient-specific virtual simulation-a state of the art approach to teach renal tumor localization[J]. *Urology*, 2018, 120:42-48.
- [22] Lee H, Nguyen NH, Hwang SI, et al. Personalized 3D kidney model produced by rapid prototyping method and its usefulness in clinical applications[J]. *Int Braz J Urol*, 2018, 44(5):952-957.
- [23] Knoedler M, Feibus AH, Lange A, et al. Individualized physical 3-dimensional kidney tumor models constructed from 3-dimensional printers result in improved trainee anatomic understanding[J]. *Urology*, 2015, 85(6):1257-1261.
- [24] Schmit C, Matsumoto J, Yost K, et al. Impact of a 3D printed model on patients' understanding of renal cryoablation: a prospective pilot study[J]. *Abdom Radiol (NY)*, 2019, 44(1):304-309.
- [25] Silberstein JL, Maddox MM, Dorsey P, et al. Physical models of renal malignancies using standard cross-sectional imaging and 3-dimensional printers: a pilot study[J]. *Urology*, 2014, 84(2):268-272.
- [26] Bernhard JC, Isotani S, Matsugasumi T, et al. Personalized 3D printed model of kidney and tumor anatomy: a useful tool for patient education[J]. *World J Urol*, 2016, 34(3):337-345.
- [27] Teishima J, Takayama Y, Iwaguro S, et al. Usefulness of personalized three-dimensional printed model on the satisfaction of preoperative education for patients undergoing robot-assisted partial nephrectomy and their families[J]. *Int Urol Nephrol*, 2018, 50(6):1061-1066.

(编辑:武斌 校对:郑莉)