

· 综 述 ·

基于解剖特征预测肾肿瘤手术难度、并发症及预后——肾肿瘤评分系统的研究进展

李 根¹, 余雨豪², 范雪行¹, 李金城¹, 李嘉松¹, 李普桂¹, 陈晓鹏¹, 王 禾¹, 张 更¹, 汪 涌¹

(1.中国人民解放军空军军医大学第二附属医院泌尿外科, 陕西西安 710038; 2.西安市大兴医院泌尿外科, 陕西西安 710082)

Predicting the surgical difficulty, complications and prognosis of kidney tumors based on anatomical features: advances in renal tumor scoring systems

LI Gen¹, YU Yuhao², FAN Xuexing¹, LI Jincheng¹, LI Jiasong¹, LI Pugui¹, CHEN Xiaopen¹, WANG He¹, ZHANG Geng¹, WANG Yong¹

(1.Department of Urology, The Second Affiliated Hospital of The Air Force Military Medical University of PLA, Xi'an 710038; 2.Department of Urology, Xi'an Daxing Hospital, Xi'an 710082, China)

ABSTRACT: Renal tumor scoring systems can describe the anatomical characteristics of renal tumors. It is an important standard to evaluate the surgical complexity and to evaluate the surgical complexity and feasibility of partial nephrectomy. Scholars at home and abroad have established various scoring systems based on different anatomical parameters, such as R.E.N.A.L., PADUA, C-Index, which are used to guide the clinical selection of surgical modalities, and predict perioperative complications and prognosis. In this paper, various scoring systems are grouped into three major categories according to their functions: prediction of surgical complexity, prediction of complications, and prediction of prognosis. The contents, characteristics and clinical application value of various renal tumor scoring systems are introduced in detail to guide urologists, enhance their surgical decision-making ability, and improve the clinical outcomes.

KEY WORDS: renal tumor; scoring system; partial nephrectomy; anatomical feature

摘要: 肾肿瘤评分系统可以描述肾肿瘤的解剖特征, 是评估手术复杂程度、评价肾部分切除术可行性的一个重要标准。国内外学者基于不同解剖参数构建了许多肾肿瘤评分系统, 如 R.E.N.A.L.、PADUA、C-Index 等, 对指导临床手术方式选择、预测围手术期并发症和预后有重要意义。本文按照主要功能归纳了预测手术复杂程度的 15 个、预测并发症的 6 个、预测预后的 4 个共 3 大类 25 个评分系统, 综述各种肾肿瘤评分系统的内容、特点及临床应用价值, 以帮助泌尿外科医师根据自身经验整合运用, 增强手术决策能力, 提高临床治疗效果。

关键词: 肾肿瘤; 评分系统; 肾部分切除术; 解剖学特征

中图分类号: R737.11

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1009-8291.2025.04.016

全球范围内, 肾细胞癌的发病率位居第 14 位, 占所有新增肿瘤病例的 2.2%^[1]。随着诊断技术的不断进步, 早期肾癌的检出率越来越高^[2]。对于局限于肾脏的肾细胞癌, 首选手术治疗, 即肾部分切除术 (partial nephrectomy, PN) 或根治性肾切除术 (radical nephrectomy, RN)^[3]。PN 可有效控制肿瘤的远处转移, 降低术后并发症发生风险^[4-6], 且远期疗效和总生存率与 RN 相当^[7-8]。PN 技术较为复杂, 如果术前对于肿瘤大小、空间位置和血管等解剖学特征评估不准确, 术后容易出现血尿、漏尿、肾功能不全等并发

症。国内外诸多学者基于以上认识, 相继提出了若干术前肾脏肿瘤评分系统, 其中 R.E.N.A.L.^[9]、PADUA^[10] 及 C-Index^[11] 评分被称为第一代评分系统^[12], 在临床上被广泛运用, 其他评分系统被统称为第二代评分系统。本文基于不同评分系统的设计及功能, 对现有评分系统进行分类, 以期为临床医师合理选择手术方式和治疗策略提供参考。

1 预测肾肿瘤切除手术复杂程度的评分系统

1.1 R.E.N.A.L. 评分系统 R.E.N.A.L. 评分系统是首个根据肾肿瘤解剖特征制定的评分系统, 通过计算机断层扫描 (computed tomography, CT) 或磁共振成像 (magnetic resonance imaging, MRI) 对肿瘤半径 (R)、外生率 (E)、与集合系统 (urinary collecting system, UCS) 或肾窦的距离 (N)、前后位置 (A) 以及肿

收稿日期: 2024-12-23

修回日期: 2025-01-24

基金项目: 空军军医大学第二附属医院临床新技术基金 (No. XJSXYW-2023016)

通信作者: 汪涌, 副主任医师。E-mail: dryongwangfmmu@163.com

作者简介: 李根, 硕士研究生在读。研究方向: 泌尿系肿瘤。

E-mail: ligen0912@163.com

瘤与极线的位置关系(L)等特征进行量化并予以评分^[9],将肾肿瘤分为低复杂性(4~6分)、中复杂性(7~9分)和高复杂性(10~12分)。诸多研究证实,R.E.N.A.L.评分系统能有效预测腹腔镜PN的手术时间、热缺血时间(warm ischemia time, WIT)以及手术切缘阳性率等关键指标^[13-15]。WANG等^[16]在此基础上加入体质量指数(body mass index, BMI)、肾动脉数量和腹膜后内镜暴露情况得到了mR.E.N.A.L.评分,并回顾性纳入了52例患者,结果显示该评分的特异性、敏感性和约登指数均优于R.E.N.A.L.评分。

1.2 PADUA 评分系统 PADUA评分系统纳入了肿瘤大小、所处位置(纵向及边缘)、与肾窦及UCS的关联、肿瘤内生性等要素,可以标准化评估肾肿瘤解剖的复杂性,其将肾肿瘤分为低复杂性(6~7分)、中复杂性(8~9分)和高复杂性(10~14分)。该系统由FICARRA等^[10]提出,同时他们还验证了PADUA评分与PN的复杂程度密切相关,KARAMIK等^[17]对该评分系统的有效性进行了验证。对于接受开放性PN的患者,PADUA评分较高的患者手术时间也可能更长($P=0.0054$)^[18]。此外,PADUA评分在机器人辅助PN中也显示出对“三连胜”结果(即肿瘤完全切除、无严重并发症及肾功能保留)具有良好的预测性,低复杂性组“三连胜”失败率为7.7%,中复杂性组为38.9%,高复杂性组则高达72.4%^[19]。

1.3 C-Index 评分系统 C-Index评分是通过CT影像测量肿瘤中心至肾脏中心的水平距离(X)和垂直距离(Y)后,利用勾股定理计算肿瘤中心到肾中心的距离(c),再除以肿瘤半径(r)得到^[11],代表肿瘤向肾脏中心的侵犯程度。0分表示肿瘤与肾脏同中心;1分表示肿瘤边缘触及肾脏中心。C-Index评分有低复杂性(>2.5分)、中复杂性(1.5~2.5分)、高复杂性(<1.5分)之分^[20],评分增加代表肿瘤与肾中心距离增加,手术难度及并发症风险随之降低。C-Index评分有定量、客观和可重复的优点,观察者间一致性较高^[21]。但肾脏及肿瘤并非标准球形,且肾脏毗邻情况复杂,单纯以肿瘤与肾脏中心距离评估手术难度并不十分准确。为解决上述问题,ITO等^[22]纳入113例肾癌患者进行研究,通过量化肿瘤中心与肾门中心的关系得到了改良C指数(modified C-Index, m-CI),研究表明m-CI越小,肿瘤越靠近肾门,且m-CI对肾功能损失的预测能力优于C-Index(Pearson相关系数分别为0.294和0.173)。

1.4 直径-轴距-极距(diameter-axial-polar, DAP)评

分系统 DAP评分整合了R.E.N.A.L.和C-Index评分系统,主要关注肿瘤直径、轴向距离和极向距离3个特征^[23]。该评分系统基于肿瘤各解剖参数的正态分布选取界值,为开发肾肿瘤评分系统提供了新思路。DAP评分的总分和各分项评分均与WIT和手术失血量相关(单变量和多变量分析 P 均<0.001),线性回归分析结果表明,DAP评分每增加1分,功能性体积保留百分比(percent functional volume preservation, PFVP)降低4%,但研究并未对DAP评分进行分组^[23]。MISHRA等^[24]将DAP评分划分为低复杂性组(3~4分)、中复杂性组(5~6分)和高复杂性组(7~9分),发现与R.E.N.A.L.评分系统相比,DAP方法更简单,在预测“三连胜”准确性方面有明显优势(低复杂性组:71.4% vs. 100%,中复杂性组:54.2% vs. 65.8%,高复杂性组R.E.N.A.L.评分无病例,DAP评分为42%, $P=0.024$)。

1.5 肾肿瘤侵袭指数(renal tumor imaging index, RTII)评分系统 RTII由肿瘤侵袭深度除以肾实质厚度得出,由NISEN等^[25]于2014年提出,其将肿瘤分为浅表组(<0.65分)、中等组(0.65~1.00分)、深层组(>1.00分)。该指标与C-Index非常相似,主要差异可能在于RTII对浅层肿瘤的评估更准确,而C-Index对深层肿瘤的评估更准确^[26]。在对280例患者的回顾性分析中,RTII深层组的尿路并发症明显多于中度和浅层肿瘤组(分别为46.5%、25.2%和18.4%, $P=0.002$)。有研究显示,在肿瘤侵犯肾脏程度方面,RTII评估的准确性可能优于接触表面积(contact surface area, CSA)和C-Index评分系统^[27]。

1.6 接触表面积(contact surface area, CSA)评分系统 CSA可以量化肿瘤与周围未受累肾实质的接触面积。CSA评分系统是利用图像处理软件手动渲染肿瘤体积和肾实质内成分后,用肿瘤总表面积($4\pi r^2$)乘以实质内肿瘤百分比自动计算得出。一项纳入162例患者的回顾性研究发现,CSA是术中失血量>500 mL($P=0.005$)、住院时间 ≥ 4 d($P=0.005$)和出现并发症($P=0.008$)的预测因素,且观察者间一致性较好(Spearman相关系数为0.91)^[28]。然而,CSA评分依赖于高质量影像学检查及三维重建技术,一定程度上限制了其广泛使用。

1.7 手术入路肾脏分级(surgical approach renal ranking, SARR)评分系统 SARR评分系统由TANNUS等^[29]于2014年提出,其纳入了肿瘤大小、内生或外生、纵向位置、肾实质受累范围、与肾窦关系、前位/后位等6个变量,将肿瘤分为低复杂性(4~

8分)、中复杂性(9~12分)、高复杂性(13~17分)。该评分系统与R.E.N.A.L.和PADUA非常相似,但相对更复杂,平均手术时间、肿瘤大小和术中估计出血量随评分增加而增加,差异有统计学意义($P<0.05$)^[29]。

1.8 梅奥粘附概率(Mayo adhesive probability, MAP)评分系统 DAVIDIUK等^[30]开发了MAP评分以预测术中遇到粘连性肾周脂肪(adherent perinephric fat, APF)的可能。MAP评分为0分,粘连性APF出现率6%;1分,出现率16%;2分,出现率31%;3~4分,出现率73%;5分,出现率100%。DI MAIDA等^[31]的一项前瞻性研究纳入了175例接受PN的患者,证实了MAP评分对APF粘连概率准确的预测能力。张锐等^[32]对168例接受腹腔镜根治性肾切除术(laparoscopic radical nephrectomy, LRN)的患者进行回顾性分析,发现MAP评分不仅可以评估手术复杂程度,还对患者预后具有良好的预测价值。

1.9 中山评分系统(zhongshan score, ZS) ZS纳入了肾实质内肿瘤最大直径、肿瘤位置和肿瘤侵犯深度。值得注意的是,考虑到外生型肿瘤更大的直径并不一定意味着更多的肾实质被侵犯,ZS创新性地采用肾实质内肿瘤最大直径替换了肿瘤最大直径,这一改进更准确地反映了肿瘤侵袭性和手术复杂度。ZS总分3~4分为低危,5~7分为中危, ≥ 8 分为高危。除了评估手术难度外,其对于手术并发症风险也有预测价值。研究表明,与低危组患者相比,高危或中危组患者的手术并发症风险分别增加8.1倍和3.3倍^[33]。

1.10 肾柱数量(number of renal columns, NRC)评分系统 随着对PN的不断探索,无夹闭开放式肾部分切除术(open partial nephrectomy, OPN)适用范围不断扩大^[34-36]。在此基础上,ZHOU等^[37]开发了NRC评分系统,用于评估肿瘤侵犯肾柱的程度。NRC评分系统是术中失血量 ≥ 500 mL、术后肾功能、手术时间和手术并发症的独立预测因素,优于R.E.N.A.L.和PADUA评分,且观察者间的Spearman相关系数为0.941($P<0.001$),显示出较高的可靠性和可重复性^[37]。

1.11 动脉复杂性(arterial based complexity, ABC)评分系统 ABC评分系统可用于描述PN中可能横断的血管类型^[38]。从肾皮质向内,侵犯肾皮质(包括小叶间动脉和弓形动脉)评分为1分;肾髓质受累但未超过肾乳头(包括叶间动脉)为2分;侵犯肾窦(包括节段动脉及其分支)为3S;累及肾门血管为3H。SPALIVIERO等^[38]的研究发现ABC评分与WIT、术中估计失血量和尿瘘显著相关,但该评分无法预测

并发症发生情况^[39-40]。KRIEGMAIR等^[41]在此基础上增加肿瘤直径这一参数,创建了ABCD评分系统,结果显示其预测效果与R.E.N.A.L.及PADUA评分相似,3个评分系统的受试者工作特征(receiver operating characteristic, ROC)曲线下面积(area under curve, AUC)分别为0.66、0.63、0.66。

1.12 零缺血指数(zero ischemia index, ZII)评分系统 PN中肾动脉的夹闭与否一直存在争议^[42-44],理论上,缩短夹闭时间甚至无夹闭,可有效改善肾功能,但可能导致术中失血量增加和肿瘤扩散^[44]。ZII评分系统为肾实质内肿瘤直径和深度的乘积,主要用以评估PN中能否实现零缺血。低危组评分 ≤ 6 分,高危组评分 >6 分,低危组推荐进行无夹闭保留肾单位手术(nephron sparing surgery, NSS)。LI等^[45]纳入149例接受无夹闭NSS的肾癌患者,结果显示高危组的出血风险、围手术期并发症发生率均更高,手术时间更长($P<0.05$)。

1.13 RNP评分系统 RNP评分通过整合优化R.E.N.A.L.评分和MAP评分而得出,包括肿瘤半径(R)、肿瘤与UCS或肾窦距离(N)和肾后脂肪厚度(P)3个参数^[46],可同时评估肿瘤的內部和外部环境,其将肿瘤分为低复杂性(3~4分)、中复杂性(5~6分)、高复杂性(7~9分)。YANG等^[46]对159例接受腹腔镜肾部分切除术(laparoscopic partial nephrectomy, LPN)的患者进行回顾性分析显示,RNP评分在预测手术时间 >150 min、术中出血量 >20 mL、“三连胜”结果方面(AUC=0.697、0.701、0.633)优于R.E.N.A.L.评分(AUC=0.569、0.591、0.626)和MAP评分(AUC=0.655、0.606、0.526),且观察者间一致性(76.7%)优于R.E.N.A.L.评分(57.8%)。

1.14 ROADS评分系统 随着微创技术的发展,肾窦肿瘤也可采用PN治疗^[47-49]。HUANG等^[50]通过回顾性分析134例肾窦肿瘤患者的资料开发出ROADS评分系统,以期指导肾窦肿瘤的手术策略。该系统包括5个参数:肾窦区肿瘤百分比(R)、肿瘤压迫肾节段血管或UCS(O)、肿瘤与肾节段血管或UCS相对位置(A)、肿瘤直径(D)和是否单肾(S),其将肿瘤分为低复杂性(4~6分)、中复杂性(7~9分)、高复杂性(10~15分)。不同危险分组的患者采取不同的手术方式,低分组可直接在热缺血状态下进行NSS,中分组需加冰泥降温或逆行肾内冷却(retrograde intrarenal cooling, RIRC),高分组则需采取肾动脉冷灌注(renal artery cold perfusion,

RACP)。此外,ROADS 评分越高的患者,其手术时间和 WIT 越长、术中估计失血量和并发症发生率也越高^[50]。

1.15 “3S+f”评分系统 类似于 RNP 评分,“3S+f”评分系统在纳入解剖因素的基础上考虑了 APF 对手术难度的影响。该评分系统包括肾实质内肿瘤直径、肿瘤位置、肿瘤与动静脉或 UCS 的距离和肾周脂肪(size, site, side, fat)厚度 4 个参数,将肿瘤分为低复杂性(4~6 分)、中复杂性(7~9 分)、高复杂性(10~12 分)。该评分系统由 ZHANG 等^[51]建立,该团队回顾性分析了 131 例行 NSS 患者的资料,研究发现 R.E.N.A.L.、PADUA 和“3S+f”评分系统均与手术时间、WIT 和术中估计失血量显著相关(P 均 <0.05),“3S+f”评分系统在预测手术难度方面与其他两种评分系统的预测效能相当。

2 预测术中及术后并发症的评分系统

2.1 Zonal NePhRO 评分系统 Zonal NePhRO 评分系统由 HAKKY 等^[52]于 2014 年提出,主要针对 OPN,包括与 UCS 接近程度(Ne)、肿瘤位置(Ph)、肿瘤半径(R,实际为直径)及肿瘤组织(O,实际为内生率)4 个参数,将肿瘤分为低复杂性(4~6 分)、中复杂性(7~9 分)、高复杂性(10~15 分)。其中,与 UCS 接近程度分为侵犯皮质、髓质、UCS 肿瘤直径分为 <2.5 cm, $2.5\sim<4.0$ cm 和 ≥ 4.0 cm 3 个等级,较 R.E.N.A.L.评分系统更为严格。HAKKY 等^[52]对 166 例肾癌患者进行分析,发现围手术期并发症与 Zonal NePhRO 评分相关($OR=1.35$, $95\%CI:1.10\sim1.67$, $P=0.0008$),KRIEGMAIR^[53]等的研究也得到了相似的结果。

2.2 肾盂评分(renal pelvic score, RPS)系统 RPS 系统由 TOMASZEWSKI 等^[54]于 2014 年提出,以肾内肾盂占总肾盂的面积百分比,将患侧肾脏肾盂分为肾内型($RPS>50\%$)和肾外型($RPS\leq 50\%$),用于预测 PN 术后漏尿风险。一项纳入 831 例患者的前瞻性研究结果表明,RPS 显示出对于开放和机器人 PN 后漏尿有较好的预测能力^[55]。BIER 等^[56]的研究发现 RPS 不适合预测术后并发症,尤其是漏尿,但有荟萃分析验证了 RPS 对于严重漏尿有较好的预测能力($OR=34.25$, $95\%CI:13.89\sim84.43$, $P<0.001$)^[57]。

2.3 手术并发症风险(risk of surgical complication, RoSCo)评分系统 RoSCo 评分系统结合了 R.E.N.A.L.、PADUA、查尔森术前共病指数(charlson comorbidity index, CCI)和 BMI 这 4 个参

数,并将评分结果分为低危组(3~4 分)、中危组(5~6 分)、高危组(使用 R.E.N.A.L.评分 7~10 分;使用 PADUA 评分 7~8 分)。该评分对手术并发症的预测准确率为 68%,相较于 PADUA 评分(64%)提高了 4%,相较于 R.E.N.A.L.评分(60%)提高了 8%^[58]。RoSCo 评分的中、高危组患者发生严重并发症的风险分别为低危组的 3 倍和 6 倍^[58]。

2.4 肿瘤为中心的多平面重建(tumor-centered multiplanar reconstruction, TC-MPR)评分系统 术中侵犯 UCS 与术后漏尿密切相关^[55,59-60],TC-MPR 评分系统可用于评估肿瘤边缘与 UCS 的关系。研究显示,术中侵犯 UCS 患者的 R.E.N.A.L.评分更高、多维平面重建角度更宽、多维平面重建距离更短(P 均 <0.05)。多因素分析显示,多维平面重建角度是术中侵犯 UCS 的独立危险因素($P<0.001$)^[61]。

2.5 直径-深度-距离(diameter-depth-distance, DDD)评分系统 DDD 评分可用于评价腹膜后 PN 的复杂程度和术后效果,包括肾实质内肿瘤最大直径、肿瘤至 UCS 最深部分、肿瘤至主要肾血管最短距离 3 个参数^[62],将肿瘤分为低复杂性(3~4 分)、中复杂性(5~7 分)、高复杂性(≥ 8 分)。ZAHNG 等^[62]回顾性分析了 232 例接受 PN 患者的临床资料,认为 DDD 评分与 WIT($P=0.007$)和术中估计失血量($P=0.017$)显著相关。高或中分组出现并发症的总体风险分别是低分组的 13.6 倍和 8.4 倍($P<0.05$)。此外有研究显示,DDD 评分对于高级别肾细胞癌有较好的预测能力($OR=1.411$, $95\%CI:1.280\sim1.555$, $P<0.001$)^[63]。

2.6 简化的 PADUA 肾脏评分系统(simplified PADUA renal nephrometry system, SPARE)

SPARE 是在去掉 PADUA 评分中的纵向位置和 UCS 受累情况 2 项参数的基础上,对其余参数评分适当修改而形成,将肿瘤分为低危组(0~3 分)、中危组(4~7 分)、高危组(8~10 分)。该系统由 FICARRA 等^[64]对 531 例接受 PN 患者的资料进行多中心回顾性分析后建立,其 AUC 与 PADUA 相似(0.657 vs. 0.664),预测任何并发症的能力不弱于 R.E.N.A.L.和 PADUA 评分,且 CSA 增加对预测并发症的整体准确性无显著影响。此外,SPARE 评分显示出更好的观察者间一致性^[65-66]。

3 预测肾肿瘤预后的评分系统

3.1 SSIGN 评分系统 SSIGN 评分系统综合了肿瘤大小、病理分级、坏死状况、淋巴结转移及远处转移

等指标来预测肾癌患者的生存可能性^[67]。该系统由 FRANK 等^[67]通过回顾性分析 1801 例接受 RN 治疗的单侧 RCC 患者的资料所建立,该团队研究发现 TNM 分期($P=0.001$)、肿瘤直径 $>5\text{ cm}$ ($P=0.001$)、核分级($P=0.001$)和肿瘤坏死($P=0.001$)与癌症特异性生存(cancer-specific survival, CSS)显著相关。USHER-SMITH 等^[68]对该评分系统的研究显示,SSIGN 评分在预测 CSS 方面,超过半数研究的 C 统计量 ≥ 0.80 ;在预测整体生存期(overall survival, OS)方面,所有研究的 C 统计量均 ≥ 0.70 ,进一步验证了 SSIGN 在评估患者预后方面有较高的价值。

3.2 切除及缺血体积(resected and ischemic volume, RAIV)评分系统 RAIV 评分系统由肾实质缺血和切除的宽度、肿瘤侵犯深度以及肿瘤半径组成,用于计算 PN 前切除及缺血肾体积^[69]。该评分依赖高精度的 CT 或 MRI 影像,且需要积分公式运算,使用相对复杂。SHIN 等^[69]分析了 210 例接受机器人辅助 PN 的患者资料,多变量分析结果显示肾小球滤过率估值(estimated glomerular filtration rate, eGFR)下降的绝对值和百分比与 RAIV 评分增加显著相关($\beta=0.348, 0.331, P$ 均 <0.0001),且观察者间一致性较好(Spearman 相关系数 $=0.92, P<0.001$)。

3.3 Spectrum 评分系统 SHAH 等^[70]通过对 PN 患者的长期研究发现缺血组和非缺血组的 eGFR 差异无统计学意义,推测是由于正常肾脏的代偿掩盖了手术肾脏的急性缺血性损伤。基于此,ZHANG 等^[71]开发了 Spectrum 评分系统用以反映手术肾脏缺血性损伤程度及其与术后肾功能恢复的关系。Spectrum 评分 $=(\text{观察到的 SCr 峰值}-\text{SCr 理想峰值})/(\text{SCr 最差值}-\text{SCr 理想峰值})$ 。研究表明,较长的缺血时间与较高的 Spectrum 评分正相关,缺血时间每增加 10 min, Spectrum 评分增加 0.08 分($P=0.003$);缺血类型与功能恢复显著相关,相比于冷缺血,热缺血的 Spectrum 评分增加 0.11 分($P=0.034$)^[71]。同时 LEE 等^[72]的研究进一步证明了 Spectrum 评分的可靠性,发现更长的 WIT、术前同侧肾功能下降与更高的 Spectrum 评分显著相关($P<0.05$)。Spectrum 评分填补了非孤立肾患者接受 PN 后手术侧肾脏急性肾损伤无法定量评估的空白,并为预测术后短期肾功能恢复提供了参考^[73]。

3.4 瘤周动脉评分系统(peritumoral artery scoring system, PASS) PASS 使用三维动脉造影评估瘤周动脉特征(分类和直径)对肾功能预后的影响。该评分

表 1 不同肾肿瘤评分系统纳入的解剖特征汇总

分系统根据肾实质平均厚度和肾动脉解剖结构,将肿瘤边缘 5 mm 内的动脉定义为瘤周动脉,分为 6 级,并以此分组:高危组(I、II 级,包括任何直径的动脉)、中危组(III 级,或直径 $\geq 2\text{ mm}$ 的动脉)和低危组(IV、V、VI 级,且直径 $<2\text{ mm}$ 的动脉)^[74]。一项纳入 220 例接受 LPN 患者的回顾性研究结果显示,相较于低危组,中、高危组的 WIT 更长($P=0.009$)、肾功能下降幅度更大($P<0.001$)^[74]。VECCIA 等^[57]的荟萃分析证实了 PASS 评分系统对预后的预测较准确($OR=45.785, 95\% CI: 3.885 \sim 539.242, P=0.002$)。有研究证实,与 ABC 评分相比, PASS 评分对肾动脉的分类更细致,这可能是其准确性更高的原因^[75]。

4 小结与展望

肾肿瘤评分系统在肾肿瘤的临床诊疗过程中不可或缺。各类评分系统从手术复杂性、并发症风险、疾病预后等多个维度为临床医生提供了量化评估手段,有效推动了治疗方案的制定、手术决策的优化以及患者预后的改善。本文对各个评分系统的划分基于使用功能及应用场景,并非绝对,优先考虑了其设计思路 and 主要目的,表 1 总结了不同评分系统所纳入的解剖特征。单个评分系统可能具有多种用途,如 R.E.N.A.L. 评分系统不仅能够反映手术难度,还可用于预测术中、术后并发症的发生风险^[9]; TC-MPR 评分系统除了通过描述术中 UCS 侵犯的风险从而预测术后漏尿外,也在一定程度上反映了手术的复杂程度^[61]; PASS 评分系统则由于考虑了瘤周动脉特征,既能预测患者肾功能预后又能体现手术难度^[74]。笔者认为每个评分系统都有其适用范围和优缺点,对于某些复杂病例,应该联合多种优势互补的评分系统,或根据不同目的选择适合的评分系统进行评估,以便更好地提供临床决策。例如,针对肥胖且存在肾血管变异的肾门部肿瘤患者的术前评估,可联合应用 MAP、ROADS 和 PASS 评分系统,对手术复杂程度、并发症及预后进行准确预测,合理制定手术方案。

综上所述,一个理想的评分系统应有效整合肾肿瘤的一系列相关特性,并具备良好的稳定性和重复性;同时,该系统还应该简洁且便于临床应用。在此基础上,尽管现有的肾肿瘤评分系统的价值已被部分研究所证实,并取得了显著成绩,但评分系统的临床应用仍是一个值得讨论的问题。未来仍需广大研究人员不断推陈出新,推动肾肿瘤的临床诊疗技术迈向新的高度。

评分系统	肿瘤 半径 /直径	肾实质 内肿瘤 直径	体积 和面积	外生 /内生	肿瘤 浸润 深度	与肾脏 的空间 关系	与集合 系统的 关系	与肾血 管的 关系	与肾窦 的关系	肾柱 侵犯	肾周 脂肪/ BMI	孤立 肾
预测手术复杂程度												
R.E.N.A.L. ^[9] , 2009	+			+		+	+		+			
PADUA ^[10] , 2009	+			+	+	+	+		+			
C-Index ^[11] , 2010	+				+							
DAP ^[23] , 2012	+				+	+						
RTII ^[25] , 2014					+							
CSA ^[28] , 2014			+									
SARR ^[29] , 2014	+			+	+	+			+			
MAP ^[30] , 2014											+	
ZS ^[33] , 2015		+			+	+						
NRC ^[37] , 2015										+		
ABC ^[38] , 2016								+				
ZII ^[45] , 2017		+			+							
RNP ^[46] , 2020	+						+		+		+	
ROADS ^[50] , 2020	+						+	+	+			+
“3S+f” ^[51] , 2022		+			+	+					+	
预测术中及术后并发症												
Zonal NePhRO ^[52] , 2014	+			+	+	+						
RPS ^[54] , 2014							+					
RoSCo ^[58] , 2014	+			+	+	+	+		+		+	
TC-MPR ^[61] , 2018							+					
DDD ^[62] , 2019		+			+			+				
SPARE ^[64] , 2019	+			+	+				+			
预测肾肿瘤预后												
SSIGN ^[67] , 2002	+											
RAIV ^[69] , 2015	+		+		+							
Spectrum ^[71] , 2016			+									
PASS ^[74] , 2017								+				

DAP:直径-轴距-极距评分系统;RTII:肾肿瘤侵袭指数评分系统;CSA:接触表面积评分系统;SARR:手术入路肾脏分级评分系统;MAP:梅奥粘附概率评分系统;ZS:中山评分系统;NRC:肾柱数量评分系统;ABC:动脉复杂性评分系统;ZII:零缺血指数评分系统;RPS:肾盂评分系统;RoSCo:手术并发症风险评分系统;TC-MPR:肿瘤为中心的多平面重建评分系统;DDD:直径-深度-距离评分系统;SPARE:简化的 PADUA 肾脏评分系统;RAIV:切除及缺血体积评分系统;PASS:瘤周动脉评分系统;BMI:身体质量指数。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] LIU P, LI Y, SHI B, et al. The outcome of sutureless in partial nephrectomy; a systematic review and meta-analysis[J]. Biomed Res Int, 2022, 2022: 5260131.
- [3] ROSE TL, KIM WY. Renal cell carcinoma; a review[J]. JAMA, 2024, 332(12): 1001-1010.
- [4] GERSHMAN B, THOMPSON RH, BOORJIAN SA, et al. Radical versus partial nephrectomy for cT1 renal cell carcinoma [J]. Eur Urol, 2018, 74(6): 825-832.
- [5] CAI Y, LI HZ, ZHANG YS. Comparison of partial and radical laparoscopic nephrectomy; long-term outcomes for clinical T1b renal cell carcinoma[J]. Urol J, 2018, 15(2): 16-20.
- [6] YANG F, ZHOU Q, XING N. Comparison of survival and renal function between partial and radical laparoscopic nephrectomy for T1b renal cell carcinoma[J]. J Cancer Res Clin Oncol, 2020, 146(1): 261-272.
- [7] XIA L, ZHANG X, WANG X, et al. Transperitoneal versus

- retroperitoneal robot-assisted partial nephrectomy: a systematic review and meta-analysis[J]. *Int J Surg*, 2016, 30: 109-115.
- [8] SHRIVASTAVA N, BHARGAVA P, SHARMA G, et al. Transperitoneal versus retroperitoneal robot-assisted partial nephrectomy: a systematic review and meta-analysis[J]. *World J Urol*, 2024, 42(1): 83.
- [9] KUTIKOV A, UZZO RG. The R.E.N.A.L. nephrometry score: a comprehensive standardized system for quantitating renal tumor size, location and depth[J]. *J Urol*, 2009, 182(3): 844-853.
- [10] FICARRA V, NOVARA G, SECCO S, et al. Preoperative aspects and dimensions used for an anatomical (PADUA) classification of renal tumours in patients who are candidates for nephron-sparing surgery[J]. *Eur Urol*, 2009, 56(5): 786-793.
- [11] SIMMONS MN, CHING CB, SAMPLASKI MK, et al. Kidney tumor location measurement using the C index method[J]. *J Urol*, 2010, 183(5): 1708-1713.
- [12] TOBERT CM, SHOEMAKER A, KAHNOSKI RJ, et al. Critical appraisal of first-generation renal tumor complexity scoring systems: creation of a second-generation model of tumor complexity[J]. *Urol Oncol*, 2015, 33(4): 161-167.
- [13] DAZA J, OKHAWERE KE, IGE O, et al. The role of RENAL score in predicting complications after robotic partial nephrectomy[J]. *Minerva Urol Nephrol*, 2022, 74(1): 57-62.
- [14] 梁陈, 王明, 何卫阳, 等. R.E.N.A.L.评分系统与保留肾单位手术围手术期相关问题的关系[J]. *现代泌尿外科杂志*, 2017, 22(4): 253-257.
- [15] SHI N, ZU F, SHAN Y, et al. The value of renal score in both determining surgical strategies and predicting complications for renal cell carcinoma: a systematic review and meta-analysis[J]. *Cancer Med*, 2020, 9(11): 3944-3953.
- [16] WANG Q, QIAN B, LI Q, et al. Application of modified R.E.N.A.L. nephrometry score system in evaluating the retroperitoneal partial nephrectomy for T1 renal cell carcinoma[J]. *Int J Clin Exp Med*, 2015, 8(4): 6482-6488.
- [17] KARAMIK K, ISLAMOGLU E, ERDEMIR AG, et al. The associations of RENAL, PADUA and C-Index nephrometry scores with perioperative outcomes and postoperative renal function in minimally invasive partial nephrectomy[J]. *Turk J Urol*, 2021, 47(1): 14-21.
- [18] SEMPELS M, BEN CM, MEUNIER P, et al. Open and laparoscopic partial nephrectomy: comparison and validation of preoperative scoring systems, including PADUA, RENAL, ABC nephrometric scores and perinephric fat evaluation with Mayo adhesive probability score[J]. *Res Rep Urol*, 2021, 13: 509-517.
- [19] KARAMIK K, AKTAS Y, ERDEMIR AG, et al. Predicting strict trifecta outcomes after robot-assisted partial nephrectomy: comparison of RENAL, PADUA, and C-Index Scores [J]. *J Kidney Cancer VHL*, 2021, 8(4): 1-12.
- [20] SIMMONS MN, HILLYER SP, LEE BH, et al. Nephrometry score is associated with volume loss and functional recovery after partial nephrectomy[J]. *J Urol*, 2012, 188(1): 39-44.
- [21] KRIEGMAIR MC, MANDEL P, MOSES A, et al. Defining renal masses: comprehensive comparison of RENAL, PADUA, NePhRO, and C-Index score[J]. *Clin Genitourin Cancer*, 2017, 15(2): 248-255.
- [22] ITO H, MAKIYAMA K, KAWAHARA T, et al. Modified C index: novel predictor of postoperative renal functional loss of laparoscopic partial nephrectomy[J]. *Can Urol Assoc J*, 2017, 11(5): E215-E221.
- [23] SIMMONS MN, HILLYER SP, LEE BH, et al. Diameter-axial-polar nephrometry: integration and optimization of R.E.N.A.L. and centrality index scoring systems[J]. *J Urol*, 2012, 188(2): 384-390.
- [24] MISHRA SK, BOAZ RJ, JAYASIMHA S, et al. A comparison of DAP and RENAL scoring systems in the achievement of trifecta in laparoscopic partial nephrectomy[J]. *Urologia*, 2022, 89(1): 94-99.
- [25] NISEN H, RUUTU M, GLUCKER E, et al. Renal tumour invasion index as a novel anatomical classification predicting urological complications after partial nephrectomy[J]. *Scand J Urol*, 2014, 48(1): 41-51.
- [26] 杨浩森, 阴克强, 双卫兵. 肾肿瘤评分系统的研究进展[J]. *现代泌尿生殖肿瘤杂志*, 2019, 11(4): 252-256.
- [27] 朱森强, 郝元元, 毕然, 等. 机器人辅助下肾部分切除术后患者肾功能保留和三连胜结局的影响因素分析[J]. *吉林大学学报(医学版)*, 2023, 49(6): 1569-1577.
- [28] LESLIE S, GILL IS, DE CASTRO AA, et al. Renal tumor contact surface area: a novel parameter for predicting complexity and outcomes of partial nephrectomy[J]. *Eur Urol*, 2014, 66(5): 884-893.
- [29] TANNUS M, GOLDMAN SM, ANDREONI C. Practical and intuitive surgical approach renal ranking to predict outcomes in the management of renal tumors: a novel score tool[J]. *J Endourol*, 2014, 28(4): 487-492.
- [30] DAVIDIUK AJ, PARKER AS, THOMAS CS, et al. Mayo adhesive probability score: an accurate image-based scoring system to predict adherent perinephric fat in partial nephrectomy[J]. *Eur Urol*, 2014, 66(6): 1165-1171.
- [31] DI MAIDA F, VITTORI G, CAMPI R, et al. Clinical predictors and significance of adherent perinephric fat assessed with Mayo adhesive probability (MAP) score and perinephric fat surface density (PnFSD) at the time of partial nephrectomy for localized renal mass. A single high-volume referral center experience[J]. *Minerva Urol Nephrol*, 2021, 73(2): 225-232.
- [32] 张锐, 李雪琴, 刘娟, 等. MAP评分对经腹腔镜根治性肾切除术手术难度的预测价值[J]. *现代泌尿外科杂志*, 2023, 28(8): 649-653.
- [33] ZHOU L, GUO J, WANG H, et al. The Zhongshan score: a novel and simple anatomic classification system to predict perioperative outcomes of nephron-sparing surgery[J]. *Medicine (Baltimore)*, 2015, 94(5): e506.
- [34] ANTONELLI A, CINDOLO L, SANDRI M, et al. Is off-clamp robot-assisted partial nephrectomy beneficial for renal function? Data from the CLOCK trial[J]. *BJU Int*, 2022, 129(2): 217-224.
- [35] SHRIVASTAVA N, SHARMA G, AHLUWALIA P, et al. Off-clamp versus on-clamp robot-assisted partial nephrectomy: a sys-

- tematic review and quantitative synthesis by the european association of urology young academic urologists renal cancer study group[J]. *Eur Urol Open Sci*, 2023, 58: 10-18.
- [36] FONG KY, GAN V, LIM B, et al. Off-clamp *vs.* on-clamp robot-assisted partial nephrectomy: a systematic review and meta-analysis[J]. *BJU Int*, 2024, 133(4): 375-386.
- [37] ZHOU L, CAO Y, BIAN T, et al. Number of renal columns invaded by tumor: a novel parameter for predicting complexity and outcomes of off-clamp open partial nephrectomy[J]. *J Am Coll Surg*, 2015, 221(2): 539-549.
- [38] SPALIVIERO M, POON BY, KARLO CA, et al. An arterial based complexity (ABC) scoring system to assess the morbidity profile of partial nephrectomy[J]. *Eur Urol*, 2016, 69(1): 72-79.
- [39] GU L, MA X, LI H, et al. External validation of the arterial based complexity (ABC) scoring system in renal tumors treated by minimally invasive partial nephrectomy[J]. *J Surg Oncol*, 2017, 116(4): 507-514.
- [40] 王冰, 刁英智. 一项基于术前 ABC 评分系统评估后腹腔镜肾部分切除术难度及并发症发生率的临床应用[J]. *现代泌尿外科杂志*, 2020, 25(1): 50-54.
- [41] KRIEGMAIR MC, HETJENS S, MANDEL P, et al. Tumor size and invasiveness matters for partial nephrectomy: external validation and modification of the arterial based complexity score[J]. *J Surg Oncol*, 2017, 115(6): 768-774.
- [42] CHAN E, BOYLE SL, CAMPBELL J, et al. Ipsilateral renal function preservation following minimally invasive partial nephrectomy: the effect of tumour characteristics and warm ischemic time[J]. *Can Urol Assoc J*, 2017, 11(10): 344-349.
- [43] CHUNG JS, HONG SK, LEE SC, et al. Impact of short warm ischemic time on longitudinal kidney function and survival rate after partial nephrectomy for renal cell carcinoma in patients with pre-existing chronic kidney disease stage III: a multi-institutional propensity score-matched study[J]. *Eur J Surg Oncol*, 2021, 47(2): 470-476.
- [44] AYYAD M, AYAAD O, ALKHATATBEH H, et al. Laparoscopic partial nephrectomy: off-clamp versus on clamp[J]. *Asian Pac J Cancer Prev*, 2022, 23(5): 1719-1723.
- [45] LI Y, ZHOU L, BIAN T, et al. The zero ischemia index (ZII): a novel criterion for predicting complexity and outcomes of off-clamp partial nephrectomy[J]. *World J Urol*, 2017, 35(7): 1095-1102.
- [46] YANG B, MA LL, QIU M, et al. A novel nephrometry scoring system for predicting peri-operative outcomes of retroperitoneal laparoscopic partial nephrectomy[J]. *Chin Med J (Engl)*, 2020, 133(5): 577-582.
- [47] SIMONE G, TUDERTI G, ANCESCHI U, et al. "Ride the green light": indocyanine green-marked off-clamp robotic partial nephrectomy for totally endophytic renal masses[J]. *Eur Urol*, 2019, 75(6): 1008-1014.
- [48] ALVIM RG, TIN AL, NOGUEIRA L, et al. Functional and oncological outcomes of renal surgery for hilar tumors: informing the decisions in risk-adapted management[J]. *Urology*, 2021, 157: 174-180.
- [49] BAO X, DONG W, WANG J, et al. Robot-assisted versus conventional laparoscopic partial nephrectomy for renal hilar tumors: parenchymal preservation and functional recovery[J]. *Int J Urol*, 2022, 29(10): 1188-1194.
- [50] HUANG Q, GU L, 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.
- [51] ZHANG S, QIN Z, BI H, et al. A "3S+f" nephrometry score system to predict the clinical outcomes of laparoscopic nephron-sparing surgery[J]. *Front Oncol*, 2022, 12: 922082.
- [52] HAKKY TS, BAUMGARTEN AS, ALLEN B, et al. Zonal NePhRO scoring system: a superior renal tumor complexity classification model [J]. *Clin Genitourin Cancer*, 2014, 12(1): e13-e18.
- [53] KRIEGMAIR MC, MANDEL P, MOSES A, et al. Zonal NephRO score: external validation for predicting complications after open partial nephrectomy[J]. *World J Urol*, 2016, 34(4): 545-551.
- [54] TOMASZEWSKI JJ, CUNG B, SMALDONE MC, et al. Renal pelvic anatomy is associated with incidence, grade, and need for intervention for urine leak following partial nephrectomy[J]. *Eur Urol*, 2014, 66(5): 949-955.
- [55] TOMASZEWSKI JJ, SMALDONE MC, CUNG B, et al. Internal validation of the renal pelvic score: a novel marker of renal pelvic anatomy that predicts urine leak after partial nephrectomy[J]. *Urology*, 2014, 84(2): 351-357.
- [56] BIER S, AUFDERKLAMM S, TODENHÖFER T, et al. Prediction of postoperative risks in laparoscopic partial nephrectomy using RENAL, Mayo adhesive probability and renal pelvic score [J]. *Anticancer Res*, 2017, 37(3): 1369-1373.
- [57] VECCIA A, ANTONELLI A, UZZO RG, et al. Predictive value of nephrometry scores in nephron-sparing surgery: a systematic review and meta-analysis [J]. *Eur Urol Focus*, 2020, 6(3): 490-504.
- [58] ROSCIGNO M, CERESOLI F, NASPRO R, et al. Predictive accuracy of nephrometric scores can be improved by adding clinical patient characteristics: a novel algorithm combining anatomic tumour complexity, body mass index, and Charlson comorbidity index to depict perioperative complications after nephron-sparing surgery[J]. *Eur Urol*, 2014, 65(1): 259-262.
- [59] ZARGAR H, KHALIFEH A, AUTORINO R, et al. Urine leak in minimally invasive partial nephrectomy: analysis of risk factors and role of intraoperative ureteral catheterization[J]. *Int Braz J Urol*, 2014, 40(6): 763-771.
- [60] KOLA O, SMIGELSKI M, NAGPAL S, et al. Urine leak and vascular complications following robotic partial nephrectomy: a contemporary single-center experience[J]. *J Robot Surg*, 2024, 18(1): 387.
- [61] UEHARA S, YOSHIDA S, TANAKA H, et al. Prediction of intraoperative urinary collecting system entry in patients with peripheral renal tumors undergoing partial nephrectomy: usefulness of tumor-centered multiplanar reconstruction[J]. *Urol Int*, 2018, 100(1): 85-91.

- [62] ZHANG ZY, PAN X, FAN Y, et al. DDD score for renal tumor: an intuitive and comprehensive anatomical scoring system to access the outcomes of retroperitoneal laparoscopic partial nephrectomy[J]. *Int J Urol*, 2019, 26(4): 451-456.
- [63] ZHU J, PAN X, XIE JY, et al. The DDD score outperforms the RENAL score in predicting high-grade renal cell carcinoma[J]. *Int J Urol*, 2024, 31(5): 536-543.
- [64] FICARRA V, PORPIGLIA F, CRESTANI A, et al. The simplified PADUA renal (SPARE) nephrometry system: a novel classification of parenchymal renal tumours suitable for partial nephrectomy[J]. *BJU Int*, 2019, 124(4): 621-628.
- [65] WEPRIN S, FALAGARIO U, VECCIA A, et al. Simplified PADUA renal (SPARE) nephrometry scoring system: external validation, interobserver variability, and comparison with RENAL and PADUA in a single-center robotic partial nephrectomy series[J]. *Eur Urol Focus*, 2021, 7(3): 591-597.
- [66] DIANA P, LUGHEZZANI G, ULERI A, et al. Multi-institutional retrospective validation and comparison of the simplified PADUA renal nephrometry system for the prediction of surgical success of robot-assisted partial nephrectomy[J]. *Eur Urol Focus*, 2021, 7(5): 1100-1106.
- [67] FRANK I, BLUTE ML, CHEVILLE JC, et al. An outcome prediction model for patients with clear cell renal cell carcinoma treated with radical nephrectomy based on tumor stage, size, grade and necrosis: the SSIGN score[J]. *J Urol*, 2002, 168(6): 2395-2400.
- [68] USHER-SMITH JA, LI L, ROBERTS L, et al. Risk models for recurrence and survival after kidney cancer: a systematic review [J]. *BJU Int*, 2022, 130(5): 562-579.
- [69] SHIN TY, KOMNINOS C, KIM DW, et al. A novel mathematical model to predict the severity of postoperative functional reduction before partial nephrectomy: the importance of calculating resected and ischemic volume[J]. *J Urol*, 2015, 193(2): 423-429.
- [70] SHAH PH, GEORGE AK, MOREIRA DM, et al. To clamp or not to clamp? Long-term functional outcomes for elective off-clamp laparoscopic partial nephrectomy[J]. *BJU Int*, 2016, 117(2): 293-299.
- [71] ZHANG Z, ZHAO J, DONG W, et al. Acute ipsilateral renal dysfunction after partial nephrectomy in patients with a contralateral kidney: spectrum score to unmask ischemic injury[J]. *Eur Urol*, 2016, 70(4): 692-698.
- [72] LEE Z, UZZO R, ASGHAR A, et al. Functional parenchymal volume-based spectrum score is able to quantify ischemic injury after partial nephrectomy[J]. *Urology*, 2018, 120: 150-155.
- [73] 张志凌. 肾部分切除术后急性肾损伤及其对手术侧肾脏的远期影响[J]. *现代泌尿外科杂志*, 2024, 29(9): 766-770.
- [74] ZHANG R, WU G, HUANG J, et al. Peritumoral artery scoring system: a novel scoring system to predict renal function outcome after laparoscopic partial nephrectomy [J]. *Sci Rep*, 2017, 7(1): 2853.
- [75] XIAO Y, SHAN ZJ, YANG JF, et al. Nephrometric scoring system: recent advances and outlooks[J]. *Urol Oncol*, 2023, 41(1): 15-26.
- (编辑 郭楚君)
- ~~~~~
- (上接第 349 页)
- [18] WYNDAELE JJ, WYNDAELE M, ROSIER P. Sensations reported during urodynamic bladder filling in spinal cord injury patients give additional important information[J]. *Int Neurourol J*, 2022, 26(Suppl 1): S30-S37.
- [19] LYU L, YAO YX, LIU EP, et al. A Study of urodynamic parameters at different bladder filling stages for predicting upper urinary tract dilatation[J]. *Int Neurourol J*, 2022, 26(1): 52-59.
- [20] AUSTIN PF, BAUER SB, BOWER W, et al. The standardization of terminology of lower urinary tract function in children and adolescents: update report from the standardization committee of the International Children's Continence Society [J]. *Neurourol Urodyn*, 2016, 35(4): 471-481.
- [21] SONG S, ZHANG H, WANG X, et al. The role of mechanosensitive Piezo 1 channel in diseases[J]. *Prog Biophys Mol Biol*, 2022, 172: 39-49.
- [22] MIYAMOTO T, MOCHIZUKI T, NAKAGOMI H, et al. Functional role for Piezo1 in stretch-evoked Ca^{2+} influx and ATP release in urothelial cell cultures[J]. *J Biol Chem*, 2014, 289(23): 16565-16575.
- [23] LI X, HU J, ZHAO X, et al. Piezo channels in the urinary system [J]. *Exp Mol Med*, 2022, 54(6): 697-710.
- [24] SZCZOT M, NICKOLLS AR, LAM RM, et al. The form and function of Piezo 2[J]. *Annu Rev Biochem*, 2021, 90: 507-534.
- [25] GAILLY P, DEVUYST O. Piezo 2, a mechanosensor in the urinary bladder[J]. *Kidney Int*, 2021, 100(1): 9-11.
- [26] XU H, HE Y, HONG T, et al. Piezo 1 in vascular remodeling of atherosclerosis and pulmonary arterial hypertension: a potential therapeutic target[J]. *Front Cardiovasc Med*, 2022, 9: 1021540.
- [27] CHEN J, MIAO J, ZHOU D, et al. Upregulation of mechanosensitive channel Piezo 1 involved in high shear stress-induced pulmonary hypertension[J]. *Thromb Res*, 2022, 218: 52-63.
- [28] SHIMIZU N, SAITO T, WADA N, et al. Molecular mechanisms of neurogenic lower urinary tract dysfunction after spinal cord injury[J]. *Int J Mol Sci*, 2023, 24(9): 7885.
- [29] SAITO T, GOTOH D, WADA N, et al. Time-dependent progression of neurogenic lower urinary tract dysfunction after spinal cord injury in the mouse model[J]. *Am J Physiol Renal Physiol*, 2021, 321(1): F26-F32.
- [30] HOBBS KT, KRISCHAK M, TEJWANI R, et al. The importance of early diagnosis and management of pediatric neurogenic bladder dysfunction[J]. *Res Rep Urol*, 2021, 13: 647-657.
- (编辑 闫玉梅)