

## • 综述 •

## 肾部分切除术后肾功能评估方法研究

王浩<sup>1</sup> 张孟冬<sup>2</sup> 谢大炜<sup>1</sup> 褚一凡<sup>1</sup> 王思琦<sup>1</sup> 王建文<sup>1Δ</sup>

**[摘要]** 肾细胞癌(renal cell carcinoma,RCC)是一种常见的泌尿系恶性肿瘤,随着早期肾细胞癌诊断率的不断提升,保留肾单位手术(nephron-sparing surgery,NSS)成为治疗 T<sub>1</sub> 期和部分 T<sub>2</sub> 期肾细胞癌的金标准,以肾部分切除术(partial nephrectomy,PN)应用广泛,但是该手术方式以及术后并发症存在一定的风险,因此术后评估肾功能对于评价手术安全性以及预测患者预后至关重要。本文介绍了近年来 PN 术后肾功能评估方法的研究进展。

**[关键词]** 肾细胞癌;肾部分切除术;保留肾单位手术;肾功能评估

**DOI:**10.13201/j.issn.1001-1420.2022.05.013

**[中图分类号]** R737.11 **[文献标志码]** A

## Evaluation of renal function after partial nephrectomy

WANG Hao<sup>1</sup> ZHANG Mengdong<sup>2</sup> XIE Dawei<sup>1</sup> CHU Yifan<sup>1</sup>  
WANG Siqi<sup>1</sup> WANG Jianwen<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>Department of Urology, Beijing Chaoyang Hospital Affiliated to Capital Medical University, Beijing, 100020, China; <sup>2</sup>Department of Urology, Beijing Haidian Hospital)

Corresponding author: WANG Jianwen, E-mail: wjianw99@sina.cn

**Abstract** Renal cell carcinoma (RCC) is a common urological malignancy. With the increasing diagnostic yield of early-stage RCC, nephron-sparing surgery (NSS) has become gold standard for the treatment of stage T<sub>1</sub> and partial T<sub>2</sub> RCC, and partial nephrectomy (PN) is widely used. However, there are certain risks associated with the surgical modality as well as postoperative complications, so postoperative evaluation of renal function is essential to assess surgical safety and to predict patient outcomes. This article describes recent advances in methods for the assessment of renal function after PN.

**Key words** renal cell carcinoma; partial nephrectomy; nephron-sparing surgery; renal function evaluation

肾细胞癌是泌尿系统常见的恶性肿瘤之一,发病率逐年升高,据统计,肾癌占全身恶性肿瘤新发病例总数的 2.2%,死亡率占 1.8%<sup>[1]</sup>,严重影响人类生命健康。目前随着科普宣传和体检筛查,早期肾癌的诊断率明显增加。保留肾单位手术已经成为治疗 T<sub>1</sub> 期和部分 T<sub>2</sub> 期肾癌的首选方法,以肾部分切除术(partial nephrectomy,PN)临床应用广泛<sup>[2]</sup>,与根治性肾切除术(radical nephrectomy,RN)相比,不仅有着类似的肿瘤学控制效果,而且能保留残存的肾脏功能;其中包括开放肾部分切除术(open partial nephrectomy,OPN)、腹腔镜或机器人辅助下肾部分切除术(laparoscopic partial nephrectomy,LPN/robot-assisted partial nephrectomy,RPN),并发症风险也相差较大<sup>[3]</sup>。PN 往往会

导致医源性的肾损伤,如术中阻断肾血管、肾缺血时间、手术方式、健肾实质的损失等因素均会影响术后肾功能;可能会导致残余肾功能的下降,从而进一步发展为慢性肾脏疾病。李强等<sup>[4]</sup>通过 meta 分析得出,不阻断肾血管 PN 与阻断肾血管 PN 比较,前者安全性高,术后严重并发症发生率低,在保护远期肾功能上具有一定优势。因此,PN 术后评估肾功能非常重要,直接关系到患者的预后。PN 术后肾功能评估的方法仍是一个有争议的问题,近年来,国内外学者在此方面做了较多的研究,本文主要就 PN 术后肾功能的评价方法进行综述以及探讨,以供临床更多的选择。

### 1 肾小球滤过率(estimated glomerular filtration rate,GFR)评估

GFR 是指单位时间内双肾形成的原尿量,是反映肾功能的最佳指标。菊粉由于不参与体内代

<sup>1</sup>首都医科大学附属北京朝阳医院泌尿外科(北京,100020)

<sup>2</sup>北京市海淀区医院泌尿外科

<sup>Δ</sup>审校者

通信作者:王建文,E-mail:wjianw99@sina.cn

谢,既不被肾小管和集合管重吸收,也不被分泌,是公认检测 GFR 的标志物,但因其检测方法的侵入性和繁琐性,无法普及到临床。目前常用的是通过 2 种血清学指标进行 eGFR 的估算以判断肾功能,一种是血清肌酐(serum creatinine, Scr),另一种是血清胱抑素 C(serum cystatin-C, Scys C)。

### 1.1 根据 Scr 计算 eGFR

测量 Scr 是评估 PN 前和术后肾功能的一种简单、方便的方法,而 Scr 由肌肉分解代谢产生,其浓度受到年龄、性别、种族、机体代谢和肌肉重量等的影响,从而导致不能准确评估肾功能。因此,Scr 不能被认为是肾功能的可靠标志,特别在对侧肾功能正常的时候。

通过使用基于 Scr 的估算方程,例如 Cockcroft-Gault 方程、肾脏病膳食改良(MDRD)研究方程和慢肾脏病流行病学合作(CKD-EPI)方程,这与测量 Scr 水平相比,在反映肾功能方面更优越和准确,能够很好地估计 PN 前后肾功能的 eGFR。计算公式如下:

Cockcroft-Gault 方程<sup>[5]</sup>:体表面积(body surface area, BSA) $=0.007184 \times$ 体质量(kg) $^{0.425} \times$ 身高(cm) $^{0.725}$ ;肌酐清除率(creatinine clearance, Ccr) $=[(140 - \text{年龄}) \times \text{体重(kg)} \times (0.85 \text{ 女性})] / [72 \times \text{血肌酐}(\mu\text{mol/L})]$ ;标准化 Cockcroft-Gault 方程:eGFR $=0.84 \times \text{Ccr} \times 1.73 / \text{BSA}$ 。

简化 MDRD 方程<sup>[6]</sup>:eGFR $=175 \times (\text{Scr})^{-1.154} \times \text{年龄}^{-0.203} \times 0.742(\text{女性})$ 。

MDRD-China 方程<sup>[7]</sup>:eGFR $=175 \times (\text{Scr})^{-1.234} \times \text{年龄}^{-0.179} \times 0.79(\text{女性})$ 。

CKD-EPI<sub>Scr</sub> 方程<sup>[8]</sup>:eGFR $=a \times (\text{Scr}/b)^c \times (0.993)^{\text{年龄}}$ ;a 值:女性为 144,男性为 141;b 值:女性为 0.7,男性为 0.9;c 值:①女性:Scr $\leq 0.7$  mg/dL 者为 -0.329,Scr $> 0.7$  mg/dL 者为 -1.209;②男性:Scr $\leq 0.9$  mg/dL 者为 -0.411,Scr $> 0.9$  mg/dL 者为 -1.209。

### 1.2 根据 Scys C 计算 eGFR

胱抑素 C(CysC)是一种由管家基因编码的小分子蛋白质,肾脏是清除 CysC 的唯一器官。CysC 可自由从肾小球滤过,完全被近端肾小管上皮细胞重吸收并于细胞内降解,而不再回到血液中<sup>[9]</sup>,且相较于 Scr 来说 CysC 基本不受肌肉含量的影响。Scys C 浓度主要由 GFR 决定,是一种理想的反映 GFR 的内源性标志物,从而准确地反映肾功能。

付帅等<sup>[10]</sup>的研究表明,Scys C 公式计算所得的 eGFR 比 Scr 公式计算所得的 eGFR 准确性更高。计算公式如下:

CKD-EPI<sub>Scys C</sub> 方程<sup>[11]</sup>:eGFR $=133 \times (\text{Scys C}/0.8)^a \times (0.966)^{\text{年龄}} \times (0.932 \text{ 女性})$ ;a 值:Scys C $\leq 0.8$  mg/dL 者为 -0.499;Scys C $> 0.8$  mg/dL 者

为 -1.328。

CysC-China 方程<sup>[12]</sup>:eGFR $=78.64 \times \text{CysC}^{-0.964}$ 。

通过计算所得的 eGFR $[\text{mL} \cdot \text{min}^{-1} \cdot (1.73 \text{ m}^2)^{-1}]$ 对肾功能进行分级<sup>[13]</sup>:正常或升高:GFR $\geq 90$ ;轻度下降:60 $\leq$ GFR $< 90$ ;中度下降:30 $\leq$ GFR $< 60$ ;重度下降:GFR $< 30$ 。其中 GFR $< 60$  定义为肾功能不全。当前多数相关研究认为 PN 术后 4~12 个月时对侧肾脏或肾实质体积与术前相比,体积平均增加约 5%~10%<sup>[14-16]</sup>,对侧肾 GFR 增长 2%~6%<sup>[15,17]</sup>。因此,根据 Scr 与 Scys C 计算 GFR 的局限性在于其结果无法评估患肾和健肾的变化,忽视了对侧肾的代偿作用,从而不能及时、准确地反映早期单侧肾功能的变化。

## 2 肾显像(renal scan)

肾核素显像主要是利用示踪剂,进行“弹丸”注射和快速动态连续采集技术检测双肾的血流灌注情况,利用 GATE'S 法进行总肾和分肾的 eGFR 计算,从而评估肾功能。<sup>99m</sup>Tc-DTPA(<sup>99m</sup>Tc-二亚乙基三胺五乙酸)肾动态显像法测定的 GFR 与菊粉清除率之间一致性良好<sup>[18]</sup>,因此评价患者双肾功能差异最可靠的方法就是利用肾核素显像,同样也可以测定分肾以及总的 GFR,具有良好的临床应用价值<sup>[19]</sup>。如果手术的肾脏存在损伤,术前和术后的肾显像可以正确识别肾功能的变化。PN 术后肾功能的评估受健肾组织代偿作用的影响,因此单独使用 eGFR 可能会掩盖部分肾切除术造成的真正损害。Sankin 等<sup>[20]</sup>通过计算基于肾核素显像的肾脏功能百分比与整体 eGFR 的乘积对每个肾脏进行个体化,以确定每一侧肾脏的功能百分比,表明 eGFR 百分比结合肾核素显像是评估 PN 术后肾功能的理想选择。除<sup>99m</sup>Tc-DTPA 显像外,其他放射性显像剂有<sup>99m</sup>Tc-DMSA(<sup>99m</sup>Tc-二巯基琥珀酸)、<sup>99m</sup>Tc-MAG3(<sup>99m</sup>Tc-巯基乙酰基三甘氨酸)、<sup>131</sup>I-OIH(<sup>131</sup>I-邻碘马尿酸钠)等。

通过核素肾动态显像测得的分肾 GFR $[\text{mL} \cdot \text{min}^{-1} \cdot (1.73 \text{ m}^2)^{-1}]$ 对分肾功能进行分级:正常或升高:GFR $\geq 40$ ;轻度下降:20 $\leq$ GFR $< 40$ ;中度下降:10 $\leq$ GFR $< 20$ ;重度下降:GFR $< 10$ 。肾核素显像的局限性在于其分辨率较低,不能为临床提供清晰的肾血管影像以及周围相关组织,同时具有一定的放射性,怀孕患者禁忌使用。

## 3 CT 与肾体积分析法(volumetric assessment)

由于肾核素显像价格昂贵、具有放射性危害的局限性,近年来,使用 CT 对肾体积的测量逐渐取代了肾显像。Lee 等<sup>[21]</sup>研究表明,以 CT 计算的分肾体积与<sup>99m</sup>Tc-DMSA 肾核素显像测量的分肾功能有很强的相关性;说明 PN 前后基于 CT 的分肾体积测量可作为肾解剖和功能评估的单一方法。

Bertolo 等<sup>[22]</sup>证明了 CT 扫描半自动容积评估方法评估的肾体积损失与<sup>99m</sup>Tc-MAG3 肾扫描评估的肾体积损失之间的直接相关性。由于术后肾体积的保留与肾功能密切相关<sup>[23]</sup>,因此 CT 体积评估不仅可以评估肿瘤情况,还能评估 PN 术后肾功能并可作为随访工具。应用 CT 测量肾体积来评估肾功能的方法较多,Soga 等<sup>[24]</sup>提出并比较 6 种方法,结果表明经改良后的椭球法所测得的肾体积代表的肾功能与核素肾功能相关性最好,具有准确性高、重复性好的优点;其次为由 3D 重建技术半自动测量所得到的肾体积。

### 3.1 根据残留肾实质体积评估肾功能

既往的研究显示,术中缺血性损伤是影响术后肾功能可改变的决定因素,而 Mir 等<sup>[14]</sup>研究表明 PN 术后最终肾功能主要与肾实质体积保留相关,而缺血起次要作用。Mir 等<sup>[14]</sup>应用 3D 重建技术更精确地计算 PN 术后肾实质的保留程度,比较了 92 例行 PN 患者的肾实质体积,结果显示肾实质体积相对保留 83% 时,GFR 相对保留 79%。刘鹏飞等<sup>[25]</sup>通过手术前后的 CT 影像,并使用椭球体近似法测量功能肾实质体积(functional parenchymal volume,FPV),患肾 FPV 保存率(术后患肾 FPV 与术前 FPV 的比值)与患肾 GFR 保存率(术后 GRF 与术前 GRF 的比值)呈极强正相关,即患肾 FPV 保存率越大,患肾 GFR 保存率越高,肾功能就越好。因此,在将缺血持续时间降至最低的情况下以及完整切除肾肿瘤的前提下,在 PN 期间应优先考虑 PN 最大肾单位数量的保留,这对肾功能预后起决定性作用。

### 3.2 根据切除标本中健康肾实质体积评估肾功能

在 PN 术中为了切缘阴性而损失了健康的肾组织即 EVL(excisional volume loss)表示手术标本与肾肿瘤组织的差异,其因肿瘤直径、切缘和内生/外生性质的不同而不同。Lai 等<sup>[26]</sup>研究表明,通过计算这一部分损失的肾脏体积,就可以预测和评估 PN 术后肾功能。其计算方法如下:①通过腹部 CT 扫描或 MRI 计算肾脏的体积( $\text{cm}^3$ )=肾脏长度(cm)×横径×前后径× $6/\pi$ ;②EVL=术前肾脏体积-内生性肿瘤体积-术后肾脏体积;③EVL 比(EVL-P)=EVL/术前肾脏体积;④eGFR 比(eGFR-P)=eGFR/术前 eGFR。该研究结果显示,EVL-P 与 eGFR-P、EVL 与术后 eGFR 下降显著相关,表明 EVL 能显著影响术后肾功能的下降。

Plattner 等<sup>[27]</sup>也提出了其他 2 种切缘体积的计算方法,一种是平面测量法:通过对切除的肾肿块每隔 5 mm 进行一次横断面切片,将每个样本切缘面积与厚度相乘,随后相加即得切缘体积;另一种是单片估计法:通过假设的 2 个同心圆,利用肿瘤与健康切缘的接触角建立单层方程计算。Shar-

ma 等<sup>[28]</sup>的研究结果与 Lai 等<sup>[26]</sup>的研究相似,PN 术后 3 d GFR 下降百分率与体积损失百分率之间相关性较低( $r=0.28, P=0.22$ ),而在 2~6 个月时二者之间存在中等相关性( $r=0.48, P=0.03$ )。另外,Mitsui 等<sup>[29]</sup>研究了基于三维重建技术计算切除肾皮质切缘的体积与术后肾功能的关系,利用切除肾皮质的体积来预测 eGFR,随后与实际的 eGFR 进行比较。该研究结果表明,预测 eGFR 与实际随后测得的 eGFR 具有很高的相关性,而且这种切除肾皮质精确体积的评估能够替代肾核素显像,更准确地预测和评估肾功能。

## 4 功能性核磁共振成像(FMRI)评估

### 4.1 动脉自旋标记(ASL)MRI 技术

ASL MRI 技术主要是将位于动脉血液中的水质子作为内源性示踪剂,利用磁场产生的射频脉冲对感兴趣区(region of interest,ROI)上游的血流状态进行反转处理,被标记的血流进入 ROI 成像平面完成图像的采集,通过标记图像与对照图像相减即可获得血流灌注图像;目前其初步应用于肾脏各种疾病的诊断,如肾肿瘤、急性肾损伤、肾动脉狭窄和肾移植等。因而 ASL MRI 技术具有安全无创、无辐射、重复性高、对局部微血管灌注进行定量分析优点,同时消除了对比剂所造成的过敏以及对对比剂肾病的可能,为临床上分肾功能的评估提供了一种新的影像学评价指标<sup>[30]</sup>。

计算 GFR 主要以肾小球滤过分数和肾血流量(renal blood flow,RBF)为重要参数,一定水平的 RBF 才能维持正常的肾功能,因而 RBF 水平则能够间接反映肾功能是否处于正常水平。RBF 可通过计算公式  $\text{RBF}(\text{mL} \cdot 100 \text{ g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}) = (\lambda/2\alpha \cdot \text{TI})(\Delta\text{M} \cdot \text{TI}/\text{M}_0) \exp(\text{TI}/\text{T}_1)$  可得,其中  $\lambda$  为常数  $80 \text{ mL}/100 \text{ g}$ ,代表血液组织分配系数; $\alpha$  为 1,代表反转效率; $\Delta\text{M}$  代表标记图与未标记图产生的纵向磁化矢量差值;TI 代表反转时间; $\text{M}_0$  代表平衡磁化强度; $\text{T}_1$  代表纵向弛豫时间。温成龙等<sup>[31]</sup>的研究表明,ASL 测得的健侧肾皮质 RBF 与 GFR 成正相关( $r=0.638, P<0.05$ ),患侧残余肾组织 RBF 值较术前升高约  $53.7(\text{mL} \cdot 100 \text{ g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1})$ ,健侧肾组织 RBF 值较术前下降约  $49.3(\text{mL} \cdot 100 \text{ g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1})$ ,说明 RBF 可以作为临床评价肾脏滤过功能的重要指标,可评估 PN 术后残余肾功能。同时,张莎莎等<sup>[32]</sup>的研究也显示,ASL 技术可反映残余肾脏内部的血流灌注水平,有较高的应用价值。

### 4.2 体素内不相干运动(IVIM)MRI 技术

DWI 是对活体生物组织中水分子的布朗运动进行成像的一种方法,IVIM MRI 是一种基于 DWI MRI 的一系列低中高 b 值的技术,能更精确、周全地反映水分子扩散和组织微循环灌注情况,对这 2

种情况进行量化分析,即  $S(b)/S(0) = (1 - PF) \times \exp(-b \times ADC_{slow}) + PF \times \exp(-b \times ADC_{fast})$ <sup>[33]</sup>。定量参数包括:①肾皮髓质的表观扩散系数(apparent diffusion coefficient, ADC);②单纯扩散系数( $ADC_{slow}$ ),表示组织内水分子扩散的真实部分;③微循环灌注系数( $ADC_{fast}$ ),表示组织内水分子扩散中微循环灌注的扩散部分;④灌注分数(perfusion fraction, PF),表示微循环灌注在整体扩散信号衰减中所占的比例。杨莹等<sup>[34]</sup>对56例因蛋白尿或持续微量蛋白尿就诊的患者行IVIM模型分析,分别得到慢、快扩散系数和快扩散系数的分数,结果表明上述参数与eGFR呈线性相关( $r > 0.357, P < 0.05$ ),说明基于IVIM模型分析的多b值DWI具有预测GFR的潜力。另外,温成龙<sup>[35]</sup>的研究证明,IVIM相关指标( $ADC_{fast}$ 、PF)与RBF、eGFR呈正相关性,其中肾皮质 $ADC_{fast}$ 、PF与GFR的R值分别为0.532、0.678,肾皮质 $ADC_{fast}$ 、PF与RBF的R值分别为0.537、0.598,能够良好的反应灌注信息,说明IVIM MRI能够评价肾脏皮髓质的血流灌注特点,从而可以反映PN术后的肾功能。

ASL、IVIM MRI技术除了能做形态相关的检查外,还能定量地反映微观结构层面的变化,具有安全无创、重复性高的优点,二者联合应用于评估PN术后肾血流灌注情况,能够更好地评估肾功能。通过ASL、IVIM MRI对手术前后肾脏RBF进行对比,可能情况有:①健侧肾、患侧残余肾术后RBF均降低。原因考虑为术前患肾功能基础差、恢复障碍或延迟<sup>[22]</sup>。②健侧肾、患侧残余肾术后RBF均升高。原因可能是健肾代偿状态不正常或缺血再灌注,需继续对患侧残余肾血流灌注水平进行监测。③健侧肾术后RBF降低,患侧残余肾增加。原因可能是术前由于肿瘤的压迫,导致患肾灌注水平降低、健肾血流代偿性增加;术后肿瘤压迫解除,则患肾残余肾组织灌注水平开始增高,健肾无需代偿而血液灌注逐渐下降。④健侧肾术后RBF增加,患侧残余肾降低。考虑为手术时为保证切缘阴性,对患肾正常组织过度切除,进而导致患侧残余肾血流灌注减少,健肾灌注水平代偿性升高。

## 5 总结

PN的理想目标是达成三连胜(Trifecta),即完整切除肿瘤保证切缘阴性、最大程度保留正常肾单位功能和远期并发症,其中最重要的是保证肿瘤切缘阴性<sup>[36]</sup>。一些不可改变的术前因素,如基线肾功能、孤肾、年龄、性别、肿瘤大小和复杂性以及手术因素等;可改变的因素,如缺血类型和持续的时间、健康肾实质的保留、手术方法等,都可能会影响PN术后的肾功能。因此,尽可能地控制可变因素,最大限度地保留肾实质及保护肾功能,这对患者的

预后至关重要。

综上所述,应用血清学指标评估PN术后肾功能中,因特异度和灵敏度不甚理想应避免单独使用血肌酐来评估;通过基于血肌酐和胱抑素C使用公式计算eGFR是一个可行的选择。肾动态核素显像结合eGFR是评估PN术后肾功能的理想选择,对分肾功能的反映更为精确,但具有一定的局限性。近年来,CT和3D重建技术测量肾体积估计PN后肾实质体积损失的方法来预测和评估肾功能,证实了其准确性。动脉自旋标记(ASL)MRI和体内不相干运动(IVIM)MRI等fMRI技术安全无创,可定量测量,二者联合应用能更好地评价肾功能,有较高的应用价值。在临床实践中,应根据患者的实际情况进行综合评价,选择评估PN术后肾功能的最佳方法。

**利益冲突** 所有作者均声明不存在利益冲突

## 参考文献

- [1] Bray F, Ferlay J, Soerjomataram I, et al. Global cancer statistics 2018: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries[J]. CA Cancer J Clin, 2018, 68(6):394-424.
- [2] Ljungberg B, Albiges L, Abu-Ghanem Y, et al. European Association of Urology Guidelines on Renal Cell Carcinoma: The 2019 Update[J]. Eur Urol, 2019, 75(5):799-810.
- [3] 中国医促会泌尿健康促进分会, 中国研究型医院学会泌尿外科学专业委员会. 肾部分切除术安全共识[J]. 现代泌尿外科杂志, 2020, 25(6):474-481, 500.
- [4] 李强, 李铁军, 刘亮程, 等. 机器人辅助腹腔镜下阻断与不阻断肾血管肾部分切除术比较的系统评价和Meta分析[J]. 临床泌尿外科杂志, 2020, 35(9):709-715.
- [5] 古志明. 三种评估活体供肾者肾小球滤过率方法的对比研究[J]. 医学综述, 2014, 20(5):956-958.
- [6] Levey AS, Bosch JP, Lewis JB, et al. A more accurate method to estimate glomerular filtration rate from serum creatinine: a new prediction equation. Modification of Diet in Renal Disease Study Group[J]. Ann Intern Med, 1999, 130(6):461-470.
- [7] Ma YC, Zuo L, Chen JH, et al. Modified glomerular filtration rate estimating equation for Chinese patients with chronic kidney disease[J]. J Am Soc Nephrol, 2006, 17(10):2937-2944.
- [8] Levey AS, Stevens LA, Schmid CH, et al. A new equation to estimate glomerular filtration rate[J]. Ann Intern Med, 2009, 150(9):604-612.
- [9] 陈利翔, 杨桂芝, 李高兰, 等. 肌酐与胱抑素C计算肾小球滤过功能的方法比较[J]. 医学检验与临床, 2012, 23(2):80, 85.
- [10] 付帅, 徐丝, 杨敏, 等. 血清胱抑素C公式和肌酐公式对评估中国人肾小球滤过率精准度的比较[J]. 临床肾脏病杂志, 2020, 20(5):351-356, 384.

- [11] Levin A, Tevens PE. Summary of KDIGO 2012 CKD Guideline; behind the scenes, need for guidance, and a framework for moving forward[J]. *Kidney Int*, 2014, 85(1):49-61.
- [12] Feng JF, Qiu L, Zhang L, et al. Multicenter study of creatinine-and/or cystatin C-based equations for estimation of glomerular filtration rates in Chinese patients with chronic kidney disease [J]. *PLoS One*, 2013, 8(3):e57240.
- [13] National Kidney Foundation. K/DOQI clinical practice guidelines for chronic kidney disease: evaluation, classification, and stratification [J]. *Am J Kidney Dis*, 2002, 39(2 Suppl 1):S1-S266.
- [14] Mir MC, Campbell RA, Sharma N, et al. Parenchymal volume preservation and ischemia during partial nephrectomy; functional and volumetric analysis [J]. *Urology*, 2013, 82(2):263-268.
- [15] Takagi T, Mir MC, Sharma N, et al. Compensatory hypertrophy after partial and radical nephrectomy in adults [J]. *J Urol*, 2014, 192(6):1612-1518.
- [16] Kim DK, Jang Y, Lee J, et al. Two-year analysis for predicting renal function and contralateral hypertrophy after robot-assisted partial nephrectomy: A three-dimensional segmentation technology study [J]. *Int J Urol*, 2015, 22(12):1105-1111.
- [17] Mir MC, Ercole C, Takagi T, et al. Decline in renal function after partial nephrectomy: etiology and prevention [J]. *J Urol*, 2015, 193(6):1889-1898.
- [18] Delpassand ES, Homayoon K, Madden T, et al. Determination of glomerular filtration rate using a dual-detector gamma camera and the geometric mean of renal activity: correlation with the Tc-99 m DTPA plasma clearance method [J]. *Clin Nucl Med*, 2000, 25(4):258-262.
- [19] 梁丽, 彭焱, 吴震杰, 等.  $^{99m}\text{Tc}$ -DTPA GFR 评估气腹-热缺血损伤腹腔镜下肾部分切除术后术侧和健侧肾功能变化 [J]. *山西医科大学学报*, 2013, 44(5):391-393.
- [20] Sankin A, Sfakianos JP, Schiff J, et al. Assessing renal function after partial nephrectomy using renal nuclear scintigraphy and estimated glomerular filtration rate [J]. *Urology*, 2012, 80(2):343-346.
- [21] Lee CH, Park YJ, Ku JY, et al. Clinical application of calculated split renal volume using computed tomography-based renal volumetry after partial nephrectomy: Correlation with technetium-99 m dimercaptosuccinic acid renal scan data [J]. *Int J Urol*, 2017, 24(6):433-439.
- [22] Bertolo R, Fiori C, Piramide F, et al. Assessment of the relationship between renal volume and renal function after minimally-invasive partial nephrectomy: the role of computed tomography and nuclear renal scan [J]. *Minerva Urol Nefrol*, 2018, 70(5):509-517.
- [23] Marconi L, Desai MM, Ficarra V, et al. Renal Preservation and Partial Nephrectomy: Patient and Surgical Factors [J]. *Eur Urol Focus*, 2016, 2(6):589-600.
- [24] Soga S, Britz-Cunningham S, Kumamaru KK, et al. Comprehensive comparative study of computed tomography-based estimates of split renal function for potential renal donors: modified ellipsoid method and other CT-based methods [J]. *J Comput Assist Tomogr*, 2012, 36(3):323-329.
- [25] 刘鹏飞, 侯广东, 倪建鑫, 等. 保留肾单位手术后肾功能预后的影响因素分析 [J]. *中华泌尿外科杂志*, 2020, 41(3):179-184.
- [26] Lai GS, Hung SC, Chang LW, et al. Renal volume matters; Assessing the association between excisional volume loss and renal function after partial nephrectomy [J]. *Asian J Surg*, 2020, 43(1):257-264.
- [27] Plattner HS, Sundaram CP, Cheng L, et al. Renal Volume Loss During Partial Nephrectomy Due to Resected Healthy Parenchyma: A Tool for Quick Estimation [J]. *J Endourol*, 2020, 34(8):856-861.
- [28] Sharma N, O'Hara J, Novick AC, et al. Correlation between loss of renal function and loss of renal volume after partial nephrectomy for tumor in a solitary kidney [J]. *J Urol*, 2008, 179(4):1284-1288.
- [29] Mitsui Y, Sadahira T, Araki M, et al. The 3-D Volumetric Measurement Including Resected Specimen for Predicting Renal Function After Robot-assisted Partial Nephrectomy [J]. *Urology*, 2019, 125:104-110.
- [30] 刘波, 梁明龙, 张久权, 等. 动脉自旋标记 MRI 评估 2 型糖尿病患者肾皮质灌注水平 [J]. *中国医学影像技术*, 2017, 33(5):747-751.
- [31] 温成龙, 任涛, 陈丽华, 等. 动脉自旋标记 MRI 评价肾癌部分切除术后残余肾功能的价值 [J]. *中国医学影像学杂志*, 2017, 25(7):555-558.
- [32] 张莎莎, 蒲伟, 徐超, 等. 动脉自旋标记 MRI 技术在肾癌部分切除术后残余肾功能评估中的作用分析 [J]. *医药前沿*, 2018, 8(34):134.
- [33] 黄晓霞, 叶裕丰, 张徐雯, 等. 体素内不相干运动的扩散加权像在肾病中的研究进展 [J]. *中华介入放射学电子杂志*, 2019, 7(2):155-159.
- [34] 杨莹, 俞胜男, 蒋振兴, 等. 体素内不相干运动预测肾小球滤过率的初步研究 [J]. *临床放射学杂志*, 2016, 35(11):1690-1692.
- [35] 温成龙. fMRI 纵向评估肾癌患者腹腔镜下肾部分切除术后余肾功能的初步研究 [D]. 天津: 天津医科大学, 2017:1-71.
- [36] Shah PH, Moreira DM, Okhunov Z, et al. Positive Surgical Margins Increase Risk of Recurrence after Partial Nephrectomy for High Risk Renal Tumors [J]. *J Urol*, 2016, 196(2):327-334.

(收稿日期:2021-08-22)