

·临床研究·

基于CTA对肾动脉狭窄与肾动脉主干形态学特征的相关性分析

朱玉春¹ 傅行礼² 周伟¹ 王静¹ 邢伟³

¹ 昆山市第一人民医院放射科 215300; ² 江苏大学医学院研究生院, 镇江 212013; ³ 常州市第一人民医院放射科 213003

通信作者: 邢伟, Email: suzhixingwei@126.com

【摘要】目的 研究肾动脉狭窄与肾动脉主干的形态学特征,特别是与肾动脉变异曲度的相关性。**方法** 收集62例肾动脉狭窄的患者[男性37例、女性25例,年龄36~78(52.64±16.32)岁]进行肾动脉CT血管造影(CTA),分别测量狭窄侧与非狭窄侧的肾动脉主干的平均管腔直径、管腔横截面积、长度、主干CT值、肾动脉主干强化CT值与腹主动脉强化CT值的比值(RA/AA)、肾皮质的平均强化CT值、最大曲度、肾动脉主干起点至最大曲度顶点的距离以及狭窄侧肾动脉主干起点至狭窄近端的距离。组间比较采用配对样本 t 检验。**结果** 肾动脉狭窄62支,对侧肾动脉正常62支,伴有斑块形成的肾动脉狭窄侧,其肾动脉走行的最大曲度(0.15±0.02)明显大于非狭窄侧(0.08±0.02),差异有统计学意义($t=19.487, P<0.05$),而狭窄侧与非狭窄侧的肾动脉主干的平均管腔直径、管腔横截面积、长度、肾动脉主干CT值、RA/AA、肾皮质的平均强化CT值分别为(5.39±0.53) mm、(20.52±7.22) mm²、(34.51±13.12) mm、(349.54±51.23) HU、(94.25±3.46)%、(278.41±35.47) HU和(5.27±0.062) mm、(18.97±5.05) mm²、(35.27±14.74) mm、(353.31±54.37) HU、(93.46±3.62)%、(284.21±37.92) HU,二者比较差异均无统计学意义($t=1.158, 1.385, 0.303, 0.397, 1.242, 0.879$, 均 $P>0.05$)。狭窄侧与非狭窄侧肾动脉主干起点至最大曲度顶点的距离分别为(9.62±1.34) cm和(9.79±1.47) cm,差异无统计学意义($t=0.673, P>0.05$)。狭窄侧肾动脉主干起点至狭窄近端的距离为(9.42±1.61) cm,与肾动脉起点至最大曲度顶点的距离[(9.62±1.34) cm]比较,差异无统计学意义($t=0.752, P>0.05$)。**结论** CTA能够直接显示肾动脉水平的形态,其变异曲度与肾动脉狭窄有一定的相关性。

【关键词】 肾动脉梗阻; 形态学; 血管造影术; 体层摄影术, X线计算机

基金项目: 江苏大学医学临床科技发展基金(JLY20160046); 昆山市2015年社会发展科技专项(KS1529)

DOI: [10.3760/cma.j.issn.1673-4114.2019.03.007](https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.1673-4114.2019.03.007)

Correlation analysis between renal artery stenosis and renal artery trunk morphological features based on CT angiography

Zhu Yuchun¹, Fu Xingli², Zhou Wei¹, Wang Jing¹, Xing Wei³

¹Department of Radiology, the First People's Hospital of Kunshan, Kunshan 215300, China; ²Graduate School of Medicine, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China; ³Department of Radiology, the First People's Hospital of Changzhou, Changzhou 213003, China

Corresponding author: Xing Wei, Email: suzhixingwei@126.com

【Abstract】 Objective To determine the correlation between renal artery stenosis and renal artery trunk morphological features, especially the renal artery variation of curvature. **Methods** A total of 62 patients[37 men and 25 women, aged 36~78(52.64±16.32) years] with diagnosed unilateral renal artery stenosis were subjected to CT angiography. The data between stenotic renal arteries and nonstenotic renal arteries were measured. These data included the inner diameter of the renal artery trunk, cross-sectional area, length, main CT value, the ratio of CT value of renal artery to abdominal aorta(RA/AA), average enhanced CT value of the renal cortex, maximum curvature, distance from the starting point to the maximum curvature vertex of the renal artery trunk, and the distance from the

starting point to the narrow proximal side of the renal artery stenosis. Contrast analysis of the correlation was also performed. *T* test was used for all comparisons between groups in statistics.

Results All data were divided into two groups(62 cases of stenotic renal arteries and 62 cases of nonstenotic renal arteries). The renal maximum curvature of the plaque side(0.15 ± 0.02) was significantly greater than those in the normal side(0.08 ± 0.02), and the differences were significant($t=19.487, P<0.05$). The other parameters including the inner diameter of the renal artery trunk, cross-sectional area, length, renal artery CT value, RA/AA, and average enhanced CT value of the renal cortex were(5.39 ± 0.53) mm, (20.52 ± 7.22) mm², (34.51 ± 13.12) mm, (349.54 ± 51.23) HU, (94.25 ± 3.46)%, (278.41 ± 35.47) HU and(5.27 ± 0.62) mm, (18.97 ± 5.05) mm², (35.27 ± 14.74) mm, (353.31 ± 54.37) HU, (93.46 ± 3.62)%, (284.21 ± 37.92) HU, respectively. All differences had no statistical significance($t=1.158, 1.385, 0.303, 0.397, 1.242, \text{ and } 0.879$, respectively; all $P>0.05$). The distance from the starting point to the maximum curvature vertex of the renal artery trunk in the narrow and normal sides were(9.62 ± 1.34) cm and(9.79 ± 1.47) cm, respectively, and the difference was not statistically significant($t=0.673, P>0.05$). The distance from the starting point to the narrow proximal side of the renal artery stenosis was(9.42 ± 1.61) cm, and no significant difference($t=0.752, P>0.05$) was observed between the distance[(9.62 ± 1.34) cm] from the starting point to the maximum curvature vertex and to the narrow proximal side. **Conclusion** CT angiography can directly show the shape of renal artery trunk, which variation curvature has a certain correlation with the renal artery stenosis.

【Key words】 Renal artery obstruction; Morphology; Angiography; Tomography, X-ray computed

Fund programs: Jiangsu University Medical Clinical Science and Technology Development Fund (JLY20160046); 2015 Kunshan Social Development Science and Technology Special (KS1529)

DOI: 10.3760/cma.j.issn.1673-4114.2019.03.007

肾动脉狭窄是肾性高血压的重要病因之一，最常见的原因是动脉粥样硬化和大动脉炎，狭窄段多位于近肾门的2 cm以内，而远端或者分支狭窄相对少见^[1-3]。肾动脉的走行扭曲可导致血流动力学的改变，血管的重塑又能刺激斑块的形成。与以往的有创测量方式肾动脉造影术相比，多层螺旋CT血管造影(CT angiography, CTA)结合其强大的后处理功能，能够无创地显示肾动脉走行、曲度和斑块的形成^[3-4]。本研究旨在基于肾动脉64层螺旋CTA，通过容积再现和曲面重建技术，比较肾动脉主干形态学、强化的CT值，以及肾动脉主干的变异曲度与肾动脉狭窄的临床相关性。

1 资料与方法

1.1 一般资料

收集2016年1月至2017年12月经数字减影血管造影(digital subtraction angiography, DSA)或B超确诊的单侧动脉粥样硬化性肾动脉狭窄而对侧正常的62例患者，所有患者均进行肾动脉64层螺旋CTA，其中男性37例、女性25例，年龄36~78(52.64 ± 16.32)岁。所有患者于检查前均签署了知情

通意书。

纳入标准：(1)所有患者经临床或其他辅助检查确诊(DSA或B超)；(2)患者能够密切配合CTA检查，无明显伪影，图像质量符合临床诊断要求。排除标准：(1)有肾动脉内支架手术病史者；(2)肾动脉瘤样扩张者；(3)有碘过敏病史者。

除肾动脉狭窄外，62例患者中伴有下肢动脉狭窄或闭塞12例、冠状动脉狭窄14例、终末期肾病或尿毒症晚期6例(为了降低造影剂肾病的发生率，检查当日增加透析1次并监测肾功能)、晚期糖尿病(>10年)9例(对于服用二甲双胍的患者，根据指南及患者个体情况，于CTA前后停药48~72 h)。

1.2 扫描方法和后处理重组

采用美国GE公司Lightspeed 64 VCT螺旋CT进行扫描，扫描范围包括膈顶至耻骨联合水平，先做屏气下的平扫，增强扫描采用Medrad双筒高压注射器，以4.5 mL/s流率经肘前静脉注入60~80 mL非离子型对比剂(碘帕醇350 mgI/mL，美国GE药业)和40 mL生理盐水，在肾动脉水平的腹主动脉层面监测CT值，当阈值超过100 HU时，延时6 s

开始进行对比剂追踪智能触发扫描。扫描参数：管电压 120 kV，有效管电流 350 mA，探测器排列 64×0.625 mm，螺距 0.2，球馆旋转时间 0.35 s。容积数据进行层厚 1.0 mm，重叠间隔 0.75 mm 的薄层重组，重建矩阵 512×512，利用工作站 (GE ADW4.4) 肾动脉提取软件进行曲面重建、最大密度投影和容积再现成像。

1.3 图像数据测量

图像分析以曲面重建和容积再现图像进行数据测量，肾动脉主干的定义为自腹主动脉肾动脉交叉处为起点至肾动脉第一分支为终点的肾动脉走行节段距离，具体测量狭窄侧和非狭窄侧的以下指标：(1)运用 GE vessel analysis 分析软件对肾动脉主干进行曲面重建，测量肾动脉主干的长度，取斑块近端和远端的正常管腔的平均值(避开斑块)记录管腔横截面积和平均直径；(2)在左右肾动脉主干的起始部和中、远段分别勾画一个 ROI(避开斑块部位，约 5 mm²)，记录肾动脉主干的平均 CT 值，同时于左肾动脉水平开口平面的腹主动脉内勾画 ROI(约 25 mm²)，连续测量 3 次(连续 3 个层面)，取其平均值代表腹主动脉强化平均 CT 值，计算左右肾动脉主干强化 CT 值与腹主动脉强化 CT 值的比值(the ratio of CT value of renal artery to abdominal aorta, RA/AA)，于双侧肾脏的上极、中极、下极皮质区分别勾画一个 ROI(约 5 mm²)，取其平均值代表肾皮质的强化 CT 值；(3)在肾动脉容积再现图像上以肾动脉主干最短连接长度为 D(自腹主动脉肾动脉交叉处为起点至肾动脉第一分支为终点的最短连接距离)，最大曲度顶点至 D 的垂直距离为 h，分别计算狭窄侧和非狭窄侧的肾动脉主干曲度 T(T=h/D)，并测量肾动脉起点至最大曲度顶点的距离，以及狭窄侧肾动脉主干起点至肾动脉最狭窄点的距离(图 1)。

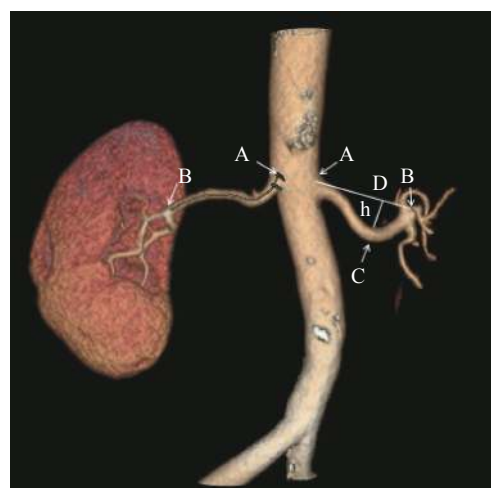


图 1 肾动脉狭窄 CTA 容积再现图 图中，A 点：腹主动脉肾动脉交叉点；B 点：肾动脉主干与第一分支交点；C 点：肾动脉主干最大曲度顶点；D：A、B 两点连线的最短距离；h：肾动脉主干最大曲度顶点(C 点)至 D 的垂直距离；右肾动脉主干长度定义为 A、B 两点的肾动脉走行节段距离；左肾动脉主干最大曲度定义为 T=h/D。CTA：CT 血管造影。

Fig. 1 CT angiography volume rendering of renal artery stenosis

1.4 统计学方法

采用 SPSS 19.0 软件进行统计学分析。狭窄侧和非狭窄侧的计量资料符合正态分布以均数±标准差($\bar{x} \pm s$)表示，方差齐性采用配对样本 t 检验进行比较，采用双侧检验。P<0.05 表示差异有统计学意义。

2 结果

62 例患者双侧均为单支肾动脉发育，未见副肾动脉，肾动脉狭窄 62 支，对侧肾动脉正常 62 支。狭窄侧和非狭窄侧肾动脉主干长度差异无统计学意义(t=0.303, P=0.924)；平均管腔直径差异亦无统计学意义(t=1.158, P=0.287)；狭窄侧管腔横截面积略大于非狭窄侧，但差异无统计学意义(t=1.385, P=0.184)(表 1)。

表 1 62 例肾动脉狭窄患者狭窄侧和非狭窄侧 CTA 结果的比较($\bar{x} \pm s$)

Table 1 The comparison of CTA data in plaque stenosis and non-stenosis renal artery for 62 patients ($\bar{x} \pm s$)

组别	肾动脉主干长度 (mm)	管腔横截面积 (mm ²)	平均管腔直径 (mm)	肾动脉主干平均CT值 (HU)	RA/AA (%)	肾皮质的平均强化CT值 (HU)
狭窄侧(n=62)	34.51±13.12	20.52±7.22	5.39±0.53	349.54±51.23	94.25±3.46	278.41±35.47
非狭窄侧(n=62)	35.27±14.74	18.97±5.05	5.27±0.62	353.31±54.37	93.46±3.62	284.21±37.92
t值	0.303	1.385	1.158	0.397	1.242	0.879
P值	0.924	0.184	0.287	0.884	0.251	0.402

注：表中，CTA：CT血管造影；CT：计算机体层摄影术；RA/AA：肾动脉主干强化 CT 值与腹主动脉强化 CT 值的比值。

由表1可见,狭窄侧和非狭窄侧的肾动脉主干平均CT值、RA/AA、肾皮质的平均强化CT值差异均无统计学意义($t=0.397$ 、 1.242 、 0.879 , $P=0.884$ 、 0.251 、 0.402)。

狭窄侧和非狭窄侧肾动脉最大曲度分别为(0.15 ± 0.02)和(0.08 ± 0.02),差异有统计学意义($t=19.487$, $P<0.05$),典型病例的CTA容积再现曲度测量图见图2;肾动脉主干起点至最大曲度顶点的距离分别是(9.62 ± 1.34)cm和(9.79 ± 1.47)cm,差异无统计学意义($t=0.673$, $P>0.05$);狭窄侧肾动脉主干起点至狭窄近端的距离为(9.42 ± 1.61)cm,与肾动脉主干起点至最大曲度顶点的距离[(9.62 ± 1.34)cm]比较,差异无统计学意义($t=0.752$, $P>0.05$),典型病例的CTA曲面重建肾动脉主干面积测量图和肾动脉主干走行曲度图分别见图3和图4。



图2 肾动脉狭窄患者(女性,62岁)左肾动脉CTA容积再现曲度测量图 图中,容积再现血管树显示左肾动脉起始部混合性斑块,相应管腔重度狭窄,狭窄侧肾动脉主干最大曲度为0.15。CTA:CT血管造影。

Fig. 2 Curvature measurement of left renal artery stenosis patients(female, 62 years old) in CT angiography volume rendering

3 讨论

动脉的正常解剖结构形态是保证其功能良好的前提,任何动脉解剖结构的改变(如纤细、扭曲、狭窄等)均可不同程度地对其功能产生影响,动脉扭曲是临床比较常见的血管形态学变异,过度的扭曲常常导致血流动力学的改变。既往研究结果显示,通过计算机模拟扭曲血管内血流动力学改变,其扭曲的程度越大,更容易导致血管内皮损伤,发生动脉粥样硬化的风险越大,严重的可导致供血区域的血流灌注减低,引起脏器灌注不足;然而,对

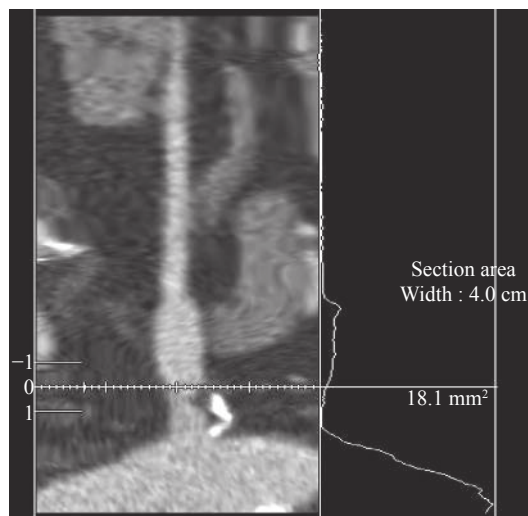


图3 肾动脉狭窄患者(男性,64岁)CTA曲面重建肾动脉主干面积测量图 图中,曲面重建图像显示狭窄侧肾动脉起始部混合性斑块,相应管腔轻度狭窄,狭窄近端肾动脉主干面积约为 18.1 mm^2 。CTA:CT血管造影。

Fig. 3 Renal artery trunk area measurement of renal artery stenosis patients(male, 64 years old) in CT angiography curved planar reformation

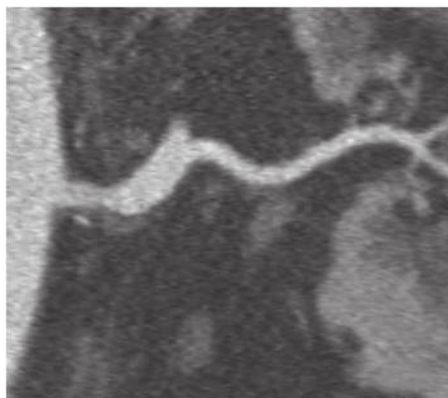


图4 肾动脉狭窄患者(男性,59岁)CTA曲面重建肾动脉主干走行曲度图 图中,曲面重建图像显示狭窄侧肾动脉混合性斑块,以脂质斑块为主,肾动脉主干走行曲度较大。CTA:CT血管造影。

Fig. 4 Renal artery trunk-path curvature diagram of renal artery stenosis patients(male, 59 years old) in CT angiography curved planar reformation

于扭曲形成的原因及其对于全身各个系统的影响尚无确切结论,同时,对于动脉扭曲程度的测量和评价尚无统一的科学量化标准^[3-4]。以往的研究多基于超声或DSA检查,在肾动脉狭窄的诊断和处理的专家共识中明确指出,DSA作为传统诊断肾动脉解剖狭窄的“金标准”,在解剖特征、狭窄程度、发现斑块等方面具有良好的分辨率,但其属于有创检查,辐射剂量大,如果仅用于诊断,与

CTA 比较基本无优势,而 64 排以上的高分辨率 CTA 快速容积扫描及其强大的后处理功能,能够全面观察肾动脉管腔内外的情况,还能大致评估其实质强化程度和功能,因此,肾动脉 CTA 可作为无创评价肾动脉狭窄的“金标准”,其灵敏度、特异度和准确率极高^[5]。此外, Kadziela 等^[6] 研究结果显示,肾动脉 CTA 与 DSA 测量的肾动脉狭窄直径和长度,差异均无统计学意义。

对于左右正常肾动脉主干的长度、平均管腔直径、管腔横截面积的测量数据国内外已有相关报道,但研究结果尚未统一:国外学者 Tarzami 等^[7] 报道左右肾动脉主干的长度分别为 (32.41 ± 12.0) mm 和 (35.6 ± 17.7) mm,两者差异无统计学意义;而 Thatipelli 等^[8] 研究结果显示左右肾动脉有一定差异,右侧肾动脉主干长度 $[(44.9 \pm 7.4)$ mm] 要长于左侧 $[(39.9 \pm 6.7)$ mm];国内学者基于国人成人尸体的测量结果显示,左肾动脉主干平均长度为 (2.62 ± 1.19) cm,右肾动脉主干平均长度为 (3.49 ± 1.43) cm,左右侧肾动脉管腔直径均为 $0.68 \sim 0.77$ cm^[9]。本研究 62 例患者中,狭窄侧肾动脉主干的平均管腔直径和管腔横截面积均略大于非狭窄侧,但是两组比较差异无统计学意义,且狭窄侧和非狭窄侧的肾动脉主干长度差异亦无统计学意义,提示对于伴有肾动脉狭窄的患者,无论狭窄侧还是非狭窄侧,对于管腔直径的影响均在正常范围内,究其原因可能与选取的样本人群、肾动脉斑块狭窄的形成时间、早期斑块正性重构有一定的关系。在动脉粥样硬化的发生发展过程中,在脂质斑块形成的早期,病理机制是斑块病变处的炎症-免疫反应和氧化应激反应,机体出现代偿性保护,病变处血管管腔正性重构向外延展,CTA 中表现为狭窄段动脉壁向外膨胀性扩张,进而一定程度上缓解了病变处的管腔狭窄,管腔内径测量值接近正常水平^[2,10-12],本研究也验证了此结果,狭窄侧和非狭窄侧的管腔直径差异无统计学意义。国内外学者通过对大脑中动脉、冠状动脉、颈内动脉等不同部位的动脉粥样硬化狭窄的重构机制进行研究,结果显示其均具有相同的病理生理过程,正性重构(膨胀性生长)可以维持血管腔通畅或减轻斑块体积造成的狭窄效应,而且正性重构与斑块的易损性密切相关,此类患者更容易引起肇事斑块事件,需要临床更加关注^[10-12]。运用 CTA 能够定量评价狭窄斑块的重构和斑块发展过

程,值得临床推广应用^[13]。

陈振东等^[14] 研究结果显示肾动脉的直径、管腔面积通常与有无副肾动脉有一定的关系,若同侧伴有副肾动脉,肾动脉主干的管腔通常会小于正常范围,但肾脏的体积不受影响。本研究中 62 例患者均未见副肾动脉,故与陈振东等^[14] 报道的肾动脉主干形态学参数一致。

CTA 中肾动脉主干 CT 值的强化程度受到血管内含碘对比剂的浓度、流速、血管腔容积等因素的影响,在对比剂浓度相同的前提下,注射速率越高,其肾动脉主干的 CT 值越高,为了保证良好的 CT 图像质量,提高注射速率是行之有效的手段,高速率可以提高单位容积碘含量。理论上讲 CT 血管增强中管腔内的 CT 值与其碘浓度呈正相关,即管腔内碘浓度越高,其 CT 值越大,血管强化越明显,重组图像越好。虽然对于 CTA 中腔内 CT 值阈值尚无具体标准,但是 Claves 等^[15] 研究认为在 CTA 中使用非离子型对比剂,当目标血管腔内 CT 值大于 250 HU 时,图像质量满足诊断要求;国内学者刘静红等^[16] 研究结果显示,最佳期相选择的肾动脉 CT 值超过 300 HU 时,图像质量满足重建要求。本研究中肾动脉 CTA 采用高浓度含碘的非离子型对比剂碘帕醇(350 mgI/mL),以 4.5 mL/s 流率快速团注 60~80 mL,并以相同的速率跟注 40 mL 生理盐水,结果显示狭窄侧和非狭窄侧的肾动脉主干平均 CT 值分别为 (349.54 ± 51.23) HU 和 (353.31 ± 54.37) HU,差异无统计学意义,其肾动脉主干的 CT 值均大于 340 HU,完全能够满足诊断需要。本研究中狭窄侧和非狭窄侧的肾动脉主干 CT 值、RA/AA、肾皮质的平均强化 CT 值差异均无统计学意义,提示动脉粥样硬化斑块引起的肾动脉狭窄对肾动脉主干的强化、肾脏皮质的血流灌注无明显影响,究其原因可能是本研究中多数为轻中度肾动脉狭窄患者,其斑块的形成尚属于代偿期,并未对血流动力学产生较大的影响,故测得的强化 CT 值和肾脏皮质血流灌注无异常。研究结果显示只有当肾动脉狭窄程度导致管腔直径减少 $\geq 50\%$,或者狭窄两端收缩压差 ≥ 20 mmHg(1 mmHg = 0.133 kPa)或平均压差 ≥ 10 mmHg 时,这种程度的狭窄才可能引起显著的肾血流量下降,并影响肾灌注压和肾小球滤过率,激活其病理生理进程,临床上主要表现为肾血管性高血压和缺血性肾病^[1-2,17-18]。

血管扭曲的数理定义为在血管走行长轴上产生不同程度曲率的改变,理论上,其动脉扭曲可以造成相应动脉血流管腔内血流动力学的改变,扭曲的严重程度多数认为与其造成的血流动力学影响具有一定的相关性^[19-20]。本研究基于肾动脉CTA显示,在肾动脉狭窄侧的肾动脉主干扭曲的程度明显高于非狭窄侧,其差异有统计学意义,且CTA为无创检查,后处理重建的二维和三维图像使得测量可重复性高,不受投射截面和血管长短的影响,具有较大的临床应用价值。本研究中,狭窄侧肾动脉最大曲度大于非狭窄侧,差异有统计学意义,而狭窄侧和非狭窄侧肾动脉主干起点至最大曲度顶点的距离比较,以及狭窄侧肾动脉主干起点至狭窄近端的距离与肾动脉主干起点至最大曲度顶点的距离比较,差异均无统计学意义,研究结果显示肾动脉狭窄与其肾动脉主干的曲度密切相关。本研究通过对肾动脉的薄层后处理重建,可以真实反映肾动脉主干的弯曲程度,通过显示其走行和测量曲度参数的比较,提示肾动脉的曲率越大,其弯曲的程度也越大。既往较多研究结果表明,肾动脉的曲度可导致血流动力学的湍流的形成,促使血栓形成动脉粥样硬化,而斑块的形成更进一步促进肾动脉弯曲的形成,代偿期双肾皮质无明显血流异常^[21-22]。但是随着病程进展,血管曲度增加使得血液流速降低,导致远端血管的血流灌注下降,又协同降低了血栓的清除率。如此恶性循环,最终导致相应肾脏血流灌注异常和动脉粥样硬化^[23-24]。因此,肾动脉的弯曲程度与动脉粥样斑块的形成密切相关。

综上所述,伴有斑块形成的肾动脉狭窄侧,其肾动脉走行的曲度明显大于非狭窄侧,而肾动脉主干的平均管腔直径、管腔横截面积、长度、肾动脉主干CT值、RA/AA、肾皮质的平均强化CT值之间的差异无统计学意义。因此,在临床工作中,应重视肾动脉狭窄患者肾动脉主干弯曲程度的精准评估,基于64层螺旋CTA,能够一站式评估肾动脉的走行和弯曲程度,为临床肾动脉狭窄风险预测提供帮助。

利益冲突 本研究由署名作者按以下贡献声明独立开展,不涉及任何利益冲突。

作者贡献声明 朱玉春负责实验设计、方法建立、论文的撰写和修改;傅行礼负责实验设计、统计学分析指导;周伟和王静负责数据收集、处理和图像分析;邢伟负责技术指导、论文审阅。

参 考 文 献

- [1] 田冰, 乔英. 肾血管影像解剖学的研究现状[J]. *中国中西医结合影像学杂志*, 2017, 15(4): 491-493. DOI: 10.3969/j.issn.1672-0512.2017.04.036.
Tian B, Qiao Y. Study current status of renal vessels imaging anatomy[J]. *Chin Imaging J Integr Tradit West Med*, 2017, 15(4): 491-493. DOI: 10.3969/j.issn.1672-0512.2017.04.036.
- [2] 赵哲维, 刘昌伟. 动脉粥样硬化性肾动脉狭窄介入治疗的现状与展望[J]. *中华医学杂志*, 2016, 96(4): 318-320. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0376-2491.2016.04.020.
Zhao ZW, Liu CW. Present situation and progress of interventional therapy for atherosclerotic renal artery stenosis[J]. *Natl Med J China*, 2016, 96(4): 318-320. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0376-2491.2016.04.020.
- [3] Espinola-Klein C. ESC guidelines 2017 on peripheral arterial diseases: summary of the most important recommendations and innovations[J]. *Herz*, 2017, 42(8): 721-727. DOI: 10.1007/s00059-017-4638-2.
- [4] Kawarada O, Yokoi Y, Sakamoto S, et al. Impact of aortorenal morphology on renal artery stent procedures: significance of aortic tortuosity and renal artery derivation[J]. *J Endovasc Ther*, 2014, 21(1): 140-147. DOI: 10.1583/13-4455MR.1.
- [5] 中国医疗保健国际交流促进会血管疾病高血压分会专家共识起草组. 肾动脉狭窄的诊断和处理中国专家共识[J]. *中国循环杂志*, 2017, 32(9): 835-844. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3614.2017.09.002.
The Experts' Consensus Drafting Group of Vascular Disease Hypertension Branch of China International Exchange and Promotion Association for Medical and Healthcare. Chinese experts' consensus on diagnosis and management of renal artery stenosis[J]. *Chin Circ J*, 2017, 32(9): 835-844. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3614.2017.09.002.
- [6] Kadziela J, Michalowska I, Pregowski J, et al. Stent sizing strategies in renal artery stenting: the comparison of conventional invasive renal angiography with renal computed tomographic angiography[J]. *Postepy Kardiol Interwencyjne*, 2016, 12(2): 116-121. DOI: 10.5114/aic.2016.59361.
- [7] Tarzamni MK, Nezami N, Rashid RJ, et al. Anatomical differences in the right and left renal arterial patterns[J]. *Folia Morphol(Warsz)*, 2008, 67(2): 104-110.
- [8] Thatipelli MR, Sabater EA, Bjarnason H, et al. CT angiography of renal artery anatomy for evaluating embolic protection devices[J]. *J Vasc Interv Radiol*, 2007, 18(7): 842-846. DOI: 10.1016/j.jvir.2007.04.030.
- [9] 王杭, 王国民, 罗宝国, 等. 国人肾血管应用解剖学研究及其临床意义[J]. *复旦学报: 医学版*, 2007, 34(1): 119-121. DOI: 10.3969/j.issn.1672-8467.2007.01.027.
Wang H, Wang GM, Luo BG, et al. The clinical meanings of

- applied anatomy of renal vessel in Chinese body[J]. *Fudan Univ J Med Sci*, 2007, 34(1): 119–121. DOI: 10.3969/j.issn.1672-8467.2007.01.027.
- [10] Ma N, Jiang WJ, Lou X, et al. Arterial remodeling of advanced basilar atherosclerosis: a 3-tesla MRI study[J]. *Neurology*, 2010, 75(3): 253–258. DOI: 10.1212/WNL.0b013e3181e8e714.
- [11] Raffel OC, Merchant FM, Tearney GJ, et al. *In vivo* association between positive coronary artery remodelling and coronary plaque characteristics assessed by intravascular optical coherence tomography[J]. *Eur Heart J*, 2008, 29(14): 1721–1728. DOI: 10.1093/eurheartj/ehn286.
- [12] 唐小平, 魏俊, 王志强, 等. 大脑中动脉粥样硬化狭窄重构模式、斑块内出血与脑卒中风险的关系[J]. 第三军医大学学报, 2016, 38(1): 65–69. DOI: 10.16016/j.1000-5404.201504165. Tang XP, Wei J, Wang ZQ, et al. Relationship of stroke risk with intra-plaque hemorrhage and wall remodeling in atherosclerotic middle cerebral artery: clinical report of 127 cases[J]. *J Third Mil Med Univ*, 2016, 38(1): 65–69. DOI: 10.16016/j.1000-5404.201504165.
- [13] 刘修健, 徐创业, 何玉娜, 等. 运用CTA影像定量评价冠脉重构及斑块发展[J]. *北京生物医学工程*, 2015, 34(2): 140–145. DOI: 10.3969/j.issn.1002-3208.2015.02.05. Liu XJ, Xu CY, He YN, et al. Quantitative assessment of the coronary plaque progression and arterial remodeling with computed tomography angiography[J]. *Beijing Biomed Eng*, 2015, 34(2): 140–145. DOI: 10.3969/j.issn.1002-3208.2015.02.05.
- [14] 陈振东, 付峰, 朱海东, 等. CT血管成像对副肾动脉的发生与肾动脉直径相关性的评估[J]. *医学影像学杂志*, 2011, 21(2): 241–244. DOI: 10.3969/j.issn.1006-9011.2011.02.030. Chen ZD, Fu F, Zhu HD, et al. Relationship between the existence of an accessory renal artery and the diameter of the renal Artery: CI angiographic evaluation[J]. *J Med Imaging*, 2011, 21(2): 241–244. DOI: 10.3969/j.issn.1006-9011.2011.02.030.
- [15] Claves JL, Wise SW, Hopper KD, et al. Evaluation of contrast densities in the diagnosis of carotid stenosis by CT angiography[J]. *AJR Am J Roentgenol*, 1997, 169(2): 569–573. DOI: 10.2214/ajr.169.2.9242779.
- [16] 刘静红, 刘爱连, 刘义军, 等. 肾动脉CTA最佳成像时间点分析: CT灌注成像与CTA对比[J]. *中国介入影像与治疗学*, 2017, 14(2): 108–112. DOI: 10.13929/j.1672-8475.201610019. Liu JH, Liu AL, Liu YJ, et al. Analysis of optimal imaging time for renal CTA: comparison of CT perfusion[J]. *Chin J Interv Imaging Ther*, 2017, 14(2): 108–112. DOI: 10.13929/j.1672-8475.201610019.
- [17] Zhang WS, Qian Y, Lin J, et al. Hemodynamic analysis of renal artery stenosis using computational fluid dynamics technology based on unenhanced steady-state free precession magnetic resonance angiography: preliminary results[J]. *Int J Cardiovasc Imaging*, 2014, 30(2): 367–375. DOI: 10.1007/s10554-013-0345-0.
- [18] 刘波, 迟路湘, 吕建峰, 等. 动脉粥样硬化性肾动脉狭窄与冠状动脉病变及外周血管病变关系的Meta分析[J]. *重庆医学*, 2014, 43(35): 4751–4754. DOI: 10.3969/j.issn.1671-8348.2014.35.015. Liu B, Chi LX, Lyu JF, et al. Correlation of atherosclerotic renal artery stenosis with coronary artery disease and peripheral arterial disease: a Meta-analysis[J]. *Chongqing Med*, 2014, 43(35): 4751–4754. DOI: 10.3969/j.issn.1671-8348.2014.35.015.
- [19] 袁学文. 动脉粥样硬化性肾动脉狭窄与高血压相关性的MDCTA研究[J]. *医学影像学杂志*, 2012, 22(8): 1344–1347. DOI: 10.3969/j.issn.1006-9011.2012.08.032. Yuan XW. The correlative study between atherosclerotic renal artery stenosis and hypertension by multi-detector CT angiography[J]. *J Med Imaging*, 2012, 22(8): 1344–1347. DOI: 10.3969/j.issn.1006-9011.2012.08.032.
- [20] 曹海明, 王洪阳, 邓荣海, 等. 应用个体化3D模型分析肾动脉狭窄与肾动脉弯曲程度的相关性[J]. *中山大学学报: 医学科学版*, 2016, 37(1): 61–65. DOI: 10.13471/j.cnki.j.sun.yat-sen.univ(med.sci).2016.0010. Cao HM, Wang HY, Deng RH, et al. Correlative study of renal artery stenosis and bend using patient-specific 3D models[J]. *J Sun Yat-sen Univ: Med Sci*, 2016, 37(1): 61–65. DOI: 10.13471/j.cnki.j.sun.yat-sen.univ(med.sci).2016.0010.
- [21] 刘一莹, 杨成明, 吴晨飞, 等. 基于冠状动脉CTA图像对冠状动脉空间扭曲程度的量化测量[J]. *重庆医学*, 2015, 44(22): 3093–3095. DOI: 10.3969/j.issn.1671-8348.2015.22.025. Liu YX, Yang CM, Wu CF, et al. Measurement of coronary tortuosity in three-dimension based on computed tomography coronary imaging[J]. *Chongqing Med*, 2015, 44(22): 3093–3095. DOI: 10.3969/j.issn.1671-8348.2015.22.025.
- [22] Li X, Sun BB, Zhao HL, et al. Retrospective study of hemodynamic changes before and after carotid stenosis formation by vessel surface repairing[J/OL]. *Sci Rep*, 2018, 8(1): 5493[2018-06-06]. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5883012>. DOI: 10.1038/s41598-018-23842-0.
- [23] Hoganson DM, Hinkel CJ, Chen XM, et al. Validation of computational fluid dynamics-based analysis to evaluate hemodynamic significance of access stenosis[J]. *J Vasc Access*, 2014, 15(5): 409–414. DOI: 10.5301/jva.5000226.
- [24] Wang HY, Liu LS, Cao HM, et al. Hemodynamics in transplant renal artery stenosis and its alteration after stent implantation based on a patient-specific computational fluid dynamics model[J]. *Chin Med J(Engl)*, 2017, 130(1): 23–31. DOI: 10.4103/0366-6999.196569.