医学影像学 DOI：10.13406/j.cnki.cyxb.003562

CT图像后处理方法对颅内动脉瘤形态学参数测量准确性的影响

吴钖莹[1]，张丽娟[1]，康绍磊[2]，王国树[1]，吕发金[1]
（1.重庆医科大学附属第一医院放射科，重庆 400016；2.昆明医科大学第一附属医院影像科，昆明 650032）

【摘 要】目的：以三维数字减影血管造影（three-dimensional digital subtraction angiography，3D-DSA）为“金标准”，基于CT血管成像（CT angiography，CTA）对比最大密度投影（maximum intensity projection，MIP）联合多平面重组（multiplanar reconstruction，MPR）和减影的容积再现（volume rendering，VR）这2种图像后处理方法之间颅内动脉瘤形态学参数测量结果的差异。**方法：**回顾性分析重庆医科大学附属第一医院92例（共116个颅内未破裂动脉瘤）患者的头颈CTA和DSA影像资料。使用双盲法分别在3D-DSA的VR、CTA的MIP-MPR和减影VR图像上测量动脉瘤的形态学参数，测量2次取均值，并计算相关的形态学衍生指标。使用组内相关系数（intraclass correlation coefficient，ICC）比较观察者间测量值的一致性，利用重复测量的方差分析或Friedman秩和检验比较不同后处理图像上测量结果的差异，后续组间两两比较采用Bonferroni校正。采用卡方检验对比各组小、微小动脉瘤及宽颈动脉瘤的分布情况。**结果：**基于MIP-MPR、减影VR和3D-DSA测得的动脉瘤最大径、瘤宽和瘤高在三组间整体比较时差异无统计学意义（χ^2值分别为4.484、5.808、4.468，均$P>0.05$）；而得到的颈宽、载瘤动脉的平均直径在三组间整体比较时差异有统计学意义（χ^2值分别为48.341、87.948，均$P<0.001$）；进行后续的组间两两比较时结果存在差异，且这种差异在颈内动脉虹吸部与非虹吸部2个亚组内又有一定区别。由MIP-MPR得出的形态学衍生指标均偏大，与DSA相比差异均有统计学意义（$P<0.017$），除高宽比外，与减影VR相比差异也有统计学意义（$P<0.017$）。基于减影VR进行动脉瘤的形态学评估，仅载瘤动脉的平均直径和大小比与DSA相比差异有统计学意义（$P<0.017$），但载瘤动脉的平均直径测量差异在亚组分析时不明显（$P>0.017$）；其余参数与DSA相比差异均无统计学意义（$P>0.017$）。**结论：**减影VR上颅内动脉瘤形态学参数测量的准确性优于MIP-MPR，更适用于颈内动脉虹吸部动脉瘤的形态学评估。

【关键词】颅内动脉瘤；图像后处理；形态学；最大密度投影；多平面重组；容积再现
【中图分类号】R743 **【文献标志码】**A **【收稿日期】**2023-12-03

Comparison of CT image post-processing methods for the accuracy of morphological measurement of intracranial aneurysms

Wu Yangying[1]，*Zhang Lijuan*[1]，*Kang Shaolei*[2]，*Wang Guoshu*[1]，*Lü Fajin*[1]
（*1. Department of Radiology，The First Affiliated Hospital of Chongqing Medical University*；
2. Department of Radiology，The First Affiliated Hospital of Kunming Medical University）

【Abstract】*Objective*：To compare two image post-processing methods based on computed tomography angiography（CTA）—maximum intensity projection（MIP）combined with multiplanar reconstruction（MPR）versus subtracted volume rendering（VR）for morphological assessment of intracranial aneurysms，using three-dimensional digital subtraction angiography（3D-DSA）as the gold standard. ***Methods*：**We retrospectively analyzed the CTA and DSA data of the head and neck of 92 patients involving 116 unruptured intracranial aneurysms in the First Affiliated Hospital of Chongqing Medical University. Double-blind measurement of the morphological parameters of intracranial aneurysms was performed on 3D-DSA VR images，CTA MIP-MPR images，and subtracted CTA VR images. Two measurements each were performed to calculate the average values，and relevant derived morphological indices were computed. The intraclass correlation coefficient（ICC）was used to assess the consistency of measurements between observers. The measurement results with different post-processing methods were compared using repeated-measures analysis of variance and the Friedman rank sum test. The Bonferroni correction was used for subsequent pairwise comparisons. The distribution of microaneurysms，small aneurysms，and wide-necked aneurysms between groups was compared using the chi-square test. ***Results*：**The maximum diameter，width，and height of intracranial aneurysm measured with MIP-MPR，subtracted VR and DSA showed no significant differences（χ^2=4.484，5.808，and 4.468 respectively，all $P>0.05$）. The neck width and the mean diameter of the parent artery differed significantly among the three groups overall（χ^2=48.341，87.948，both $P<0.001$），Subse-

作者介绍：吴钖莹，Email：YangyingWu2017@163.com，研究方向：脑血管疾病的影像技术及诊断。
通信作者：吕发金，Email：fajinlv@163.com。
优先出版：https://link.cnki.net/urlid/50.1046.R.20240819.0907.020（2024-08-19）

quent pairwise comparisons between any two groups revealed differences, with further differences also observed in terms of whether aneurysms were located at the siphon of the internal carotid artery or not. In addition, the derived morphological indicators measured with MIP-MPR were all greater, which were significantly different compared with DSA (P<0.017), and also significantly different compared with subtracted VR except for the height-to-width ratio (P<0.017). In the morphological assessment of aneurysms based on subtracted VR, only the average diameter of the parent artery and the size ratio showed significant differences compared with DSA (P<0.017), and the difference in the average diameter of the parent artery was not significant in subgroup analysis; there were no significant differences in the other parameters between subtracted VR and DSA. ***Conclusion***: Subtracted VR is more accurate in measuring the morphological parameters of intracranial aneurysms than MIP-MPR, and is more suitable for morphological assessment of internal carotid artery siphon aneurysms.

【Key words】 intracranial aneurysm; image post-processing; morphology; maximum intensity projection; multiplanar reconstruction; volume rendering

颅内动脉瘤是常见的脑血管疾病，破裂引发的蛛网膜下腔出血常伴随灾难性结局，15%的患者在入院前死亡，20%在发病后30 d内死亡，累计死亡或致残人数占比75%[1]。因此，动脉瘤初始破裂风险的准确评估尤其重要。既往动脉瘤的形态学参数与破裂风险的相关性已被广泛证实，而形态学参数的准确测量是临床应用的重要前提。既往研究多基于减影CT血管成像（CT angiography，CTA）的容积再现（volume rendering，VR）图像测量动脉瘤的形态学参数以评估其破裂风险[2-3]，但部分临床医生认为基于原始图像的多平面重组（multiplanar reconstruction，MPR）上测量的结果更准确。而最新的专家共识指出最大密度投影（maximum intensity projection，MIP）结合MPR是检出小动脉瘤和评估动脉瘤形态学的有效手段，必要时可参考原始断层图像[4]。目前，就应用CT的不同图像后处理方法上所测的颅内动脉瘤形态学参数的准确性说法不一。鉴于此，本研究拟以三维数字减影血管造影（three-dimensional digital subtraction angiography，3D-DSA）为“金标准”，探讨CT的两种图像后处理技术MIP-MPR和减影VR上动脉瘤形态学参数测量的差异，为准确进行动脉瘤形态评估提供参考依据。

1 资料与方法

1.1 研究对象

回顾性收集2020年6月至2021年12月就诊于重庆医科大学附属第一医院的颅内动脉瘤患者。纳入标准：经DSA或手术确诊的未破裂动脉瘤；患者同时接受CTA和DSA检查且2次检查时间间隔不超过1个月。排除经CT或腰椎穿刺证实为动脉瘤破裂者；梭形、夹层动脉瘤或血管畸形者；既往接受过手术治疗的复发动脉瘤；无法减影或图像重建后质量不佳者。本研究已通过本院医学伦理委员会批准（审查批号：K2023-214）。

1.2 方法

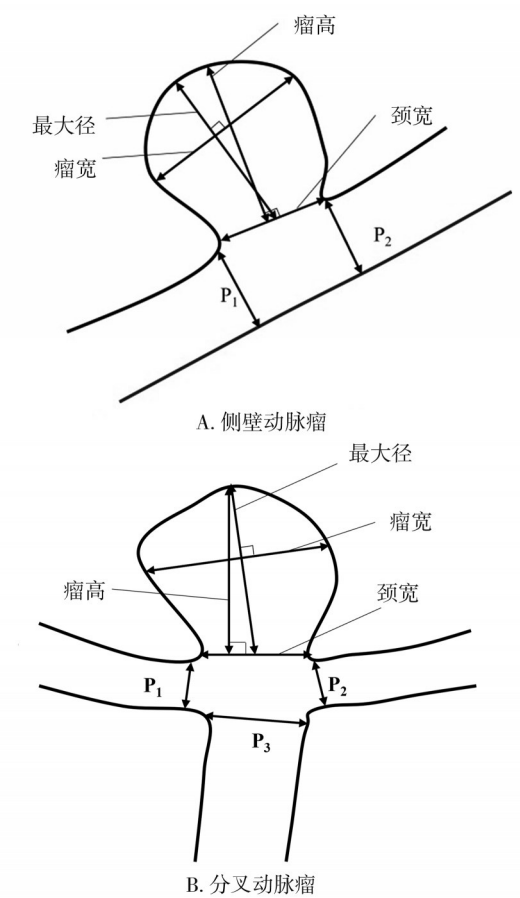
1.2.1 DSA检查 采用AXIOM Artis Zee Ceiling型数字减影血管造影X线机进行图像采集，Angiomat Illumena型高压注射器用于对比剂注射。常规术前准备，采用改良式Seldinger技术行股动脉穿刺后置入6 F动脉鞘，选用5 F造影管分导至双侧颈内动脉及椎动脉行选择性血管造影，分别取正、侧位像进行三维造影，必要时可进行斜位造影，充分显示动脉瘤的位置和形态。图像采集完毕后传至syngo XWP工作站进行血管三维重组，图像重建的阈值固定为软件提供的默认值。使用的对比剂为碘普罗胺（370 mg I/mL），颈内动脉流率3 mL/s，总量21 mL，压力180 PSI ~200 PSI；椎动脉对比剂流率2 mL/s，总量14 mL，压力120 PSI ~150 PSI。曝光参数为70 kV、100 mA，视野185 mm × 240 mm，帧速率7.5 p/s，旋转范围为180°，曝光延迟时间2~4 s。

1.2.2 CTA检查 采用TOSHIBA Aquilion ONE 320排CT机扫描。患者平卧于检查床上，固定头部，扫描范围从主动脉弓层面至颅顶。扫描参数如下：阈值触发，触发点位于降主动脉，阈值设置为150 HU~200 HU，12 s后开始监测，达到阈值后延迟2 s触发扫描，平扫及增强管电压均为100 kV，采用自动管电流调制技术，旋转速度0.5 s/r，螺距因子0.813，重建层厚0.5 mm，层间距0.3 mm，矩阵512 × 512，视野24 cm × 24 cm。使用的对比剂为碘迈伦（400 mg I/mL），剂量和流速依据P3T个性化注射方案计算，使用生理盐水50 mL，流率与对比剂相同。

1.3 图像重建与分析

由2名分别具有10年和12年脑血管相关诊断工作经验的放射科医师采用盲法分别在3D-DSA的VR图像上调整最佳观测角度，使瘤体与载瘤动脉显示于同一平面，进行动脉瘤形态学参数测量。1个月后，2名观察者独立地在CTA图像上采用MIP结合MPR技术重建，适当调整窗宽、窗位，使血管的三级分支显示清晰后用相同的方法测量。再间隔1个月，同样2名医师分别在GE AW4.7工作站上利用Add/Sub软件对CTA图像进行减影处理，采用减影VR进行图像重组并进行动脉瘤测量，每人测2次取平均值。当结果出现

分歧时经讨论达成一致。测量指标包括最大径、颈宽、瘤宽、瘤高、载瘤动脉的平均直径。最大径为瘤颈中点至瘤顶的最大距离；瘤宽即与最大径垂直且与动脉瘤壁相交形成的最长线段；瘤高指瘤颈至动脉瘤顶的最大垂直距离；颈宽为动脉瘤自血管凸起根部的连线[5]。载瘤动脉的平均直径定义为与动脉瘤相关的所有分支血管直径的平均值。具体的测量方法见图1。计算的动脉瘤形态学衍生指标包括纵横比（aspect ratio，AR）、瓶颈因子（bottle neck factor，BNF）、顶颈比（dome-to-neck ratio，DNR）、高宽比（height-to-width ratio，HWR）及大小比（size ratio，SR）：AR=瘤高/颈宽，BNF=瘤宽/颈宽，DNR=最大径/颈宽，HWR=瘤高/瘤宽，SR=最大径/载瘤动脉的平均直径。



注：P为载瘤动脉的直径

图 1　颅内动脉瘤形态学参数测量示意图

1.4　统计学方法

使用SPSS 25.0软件进行统计学分析。符合正态分布的计量资料用均数 ± 标准差（$\bar{x} \pm s$）表示，多组间的差异用重复测量的方差分析，组间两两比较采用LSD法；非正态分布的计量资料用中位数（四分位间距）[M_d（P_{25}，P_{75}）]表示，采用Friedman秩和检验进行多个相关样本的差异性分析。应用组内相关系数（intraclass correlation coefficient，ICC）进行观察者间测量值的一致性评价，具体标准参考Rajabzadeh-Oghaz H等[6]的研究。计数资料用率表示，采用卡方检验。检验水准α=0.05。为减少犯Ⅰ类错误的概率，提高统计的准确性，不同组间的两两比较进行Bonferroni校正，检验水准α=0.017。

2　结　果

2.1　一般资料

共纳入未破裂颅内动脉瘤患者92例，其中男性30例（32.6%），年龄41~74岁，平均（56.40 ± 8.88）岁；女性62例（67.4%），年龄28~78岁，平均（55.35 ± 10.57）岁。共计116个动脉瘤，按照部位划分：颈内动脉海绵窦段动脉瘤8个（6.9%），颈内动脉床突段动脉瘤11个（9.5%），颈内动脉眼段动脉瘤48个（41.4%），颈内动脉后交通段动脉瘤17个（14.7%），脉络膜前动脉动脉瘤4个（3.4%），大脑前动脉动脉瘤2个（1.7%），前交通动脉动脉瘤7个（6.0%），大脑中动脉动脉瘤14个（12.1%），基底动脉动脉瘤4个（3.4%），小脑后下动脉动脉瘤1个（0.9%）。

2.2　观察者间测量结果的一致性比较

不同观察者在减影VR的重建图像上测量的瘤宽一致性中等（ICC=0.722），而其他指标的观察者间一致性均较好（ICC=0.783~0.988），见表1。

表1　不同观察者间颅内动脉瘤形态学参数测量的组内相关系数

测量方法	颈宽	最大径	瘤宽	瘤高	载瘤动脉的平均直径
MIP-MPR	0.933	0.981	0.975	0.982	0.865
减影VR	0.949	0.796	0.722	0.783	0.921
DSA	0.988	0.982	0.942	0.982	0.972

2.3　不同后处理图像上动脉瘤形态学参数测量结果的差异性分析

2.3.1　MIP-MPR和DSA形态学参数测量结果对比　MIP-MPR上测得的动脉瘤颈宽和载瘤动脉平均直径偏小，与DSA相比差异有统计学意义（P<0.017），而其在瘤体最大径、瘤宽和瘤高显示方面，与DSA相比差异无统计学意义（P>0.017），见表2。按动脉瘤在颈内动脉虹吸部与否进行亚组分析时，与DSA相比，MIP-MPR组动脉瘤的颈宽在虹吸部动脉瘤中差异有统计学意义（P<0.017），而在非虹吸部动脉瘤中差异无统计学意义（P>0.017），见表3。此外，依据MIP-MPR测量结果计算的形态学衍生指标均偏大，与DSA相比差异均有统计学意义（P<0.017），见表4。

2.3.2　减影VR和DSA形态学参数测量结果对比　减影VR上测得的动脉瘤颈宽、最大径、瘤宽和瘤高稍偏大，但与DSA相比差异无统计学意义（P>0.017）；而载瘤动脉的平均直径偏小，与DSA相比差异有统计学意义（P<0.017）；然而，按动脉瘤在颈内动脉虹吸部与否进行亚组分析时，载瘤动脉平均直径测量的差异无统计学意义（P>0.017），见表2、3。此外，依据减影VR上的测量值计算的AR、BNF、DNR、HWR与DSA相比差异均无统计学意义（P>0.017）；而减影VR上得出

的SR值稍偏大，与DSA相比差异有统计学意义（P<0.017），见表4。

2.3.3 MIP-MPR和减影VR形态学参数测量结果对比 MIP-MPR上测得的动脉瘤瘤颈和载瘤动脉的平均直径均偏小，与减影VR相比差异有统计学意义（P<0.017），这种差异在虹吸部或非虹吸部动脉瘤间差异均有统计学意义（P<0.017）；而就动脉瘤的最大径、瘤宽和瘤高的测量而言，MIP-MPR与减影VR两组间的差异均无统计学意义（P>0.017），见表2、3。MIP-MPR上得出的AR、BNF、DNR和SR均偏大，与减影VR上的值相比差异有统计学意义（P<0.017），在HWR方面，MIP-MPR上的值也偏大，但与减影VR相比差异无统计学意义（P>0.017），见表4。

2.4 不同后处理方式下颅内动脉瘤大小和瘤颈直径的分布情况

按瘤体最大径以3 mm和5 mm的阈值进行动脉瘤大小分类，MIP-MPR组有38个（32.8%）微小动脉瘤，减影VR组中41个（35.3%），3D-DSA中43个（37.1%）；小动脉瘤在MIP-MPR组有43个（37.1%），3D-DSA组和减影VR组中均为39个（33.6%）；组间差异无统计学意义（χ^2=0.633，P=0.959）。此外，宽颈动脉瘤在MIP-MPR中有54个（46.6%），

表2 不同组间颅内动脉瘤形态学参数测量结果对比[$M_d(P_{25},P_{75})$，$\bar{x}\pm s$，mm]

测量方法	颈宽	最大径	瘤宽	瘤高	载瘤动脉的平均直径
MIP-MPR	3.93(3.16,5.19)	3.78(2.53,5.89)	4.13(3.15,5.89)	3.40(2.35,4.99)	3.48±0.79
减影VR	4.55(3.51,5.75)	3.90(2.55,5.88)	4.33(3.10,6.24)	3.38(2.30,5.10)	3.87±0.92
DSA	4.46(3.47,5.83)	3.51(2.59,5.45)	4.20(3.12,6.01)	3.29(2.35,4.99)	4.37(3.52,4.83)
χ^2值	48.341	4.484	5.808	4.468	87.948
P值	<0.001	0.106	0.055	0.107	<0.001
MIP-MPR vs. DSA[a]	<0.001	0.041	0.041	0.190	<0.001
减影VR vs. DSA[a]	0.341	0.225	0.353	0.041	0.007
MIP-MPR vs. 减影VR[a]	<0.001	0.571	0.071	0.776	<0.001

注：a，MIP-MPR、减影VR、DSA 3组间测量值两两比较的P值。组间两两比较的P值需经Bonferroni校正，即与0.05/k做比较，其中k为组间两两比较的次数，此处k=3，即当P<0.017时差异有统计学意义

表3 不同组间颅内虹吸部动脉瘤形态学参数测量结果对比[$M_d(P_{25},P_{75})$，$\bar{x}\pm s$，mm]

测量方法	颈宽		最大径		瘤宽		瘤高		载瘤动脉的平均直径	
	虹吸部	非虹吸部	虹吸部	非虹吸部	虹吸部	非虹吸部	虹吸部	非虹吸部	虹吸部	非虹吸部
MIP-MPR	4.00(3.15,5.20)	3.80(3.28,5.18)	3.95(2.75,6.15)	3.40(2.43,4.98)	4.75(3.10,6.75)	3.95(3.15,5.05)	3.60(2.55,5.65)	3.05(2.25,4.60)	3.85±0.57	2.98±0.78
减影VR	4.70(3.70,6.05)	4.40(3.30,5.55)	4.15(2.55,6.30)	3.30(2.55,4.88)	4.85(3.35,6.50)	3.95(2.90,5.30)	3.65(2.35,5.65)	2.95(2.28,4.63)	4.36±0.64	3.19±0.81
DSA	4.73(3.58,5.92)	4.23(3.24,5.66)	3.83(2.71,6.39)	3.33(2.38,4.84)	4.77(3.15,6.75)	3.77(3.06,5.44)	3.43(2.36,5.48)	3.05(2.25,4.50)	4.59±0.59	3.15(2.50,4.42)
χ^2/F值	15.672[a]	7.518[a]	2.507[a]	0.819[a]	1.164[a]	0.646[a]	4.098[a]	0.495[a]	68.461[b]	25.265[a]
P值	<0.001	0.023	0.285	0.664	0.559	0.724	0.129	0.781	<0.001	<0.001
MIP-MPR vs. DSA[c]	<0.001	0.030	0.020	0.475	0.067	0.317	0.018	0.475	<0.001	<0.001
减影VR vs. DSA[c]	0.195	0.724	0.903	0.773	0.541	0.886	0.392	0.886	0.053	0.086
MIP-MPR vs.减影V[c]	0.010	0.012	0.714	0.466	0.903	0.773	1.000	0.662	<0.001	0.001

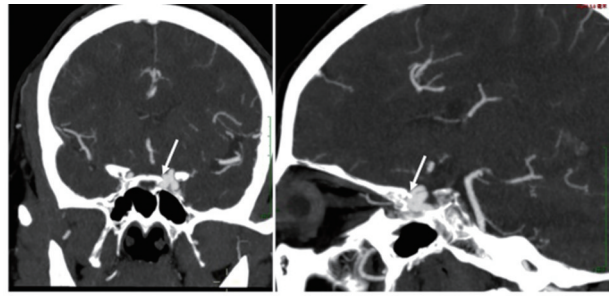
注：a，χ^2值；b，F值；c，MIP-MPR、减影VR、DSA 3组间测量值两两比较的P值。组间两两比较的P值需经Bonferroni校正，即与0.05/k做比较，其中k为组间两两比较的次数，此处k=3，即当P<0.017时差异有统计学意义

表4 不同组间颅内动脉瘤的形态学衍生指标对比[$M_d(P_{25},P_{75})$，$\bar{x}\pm s$，mm]

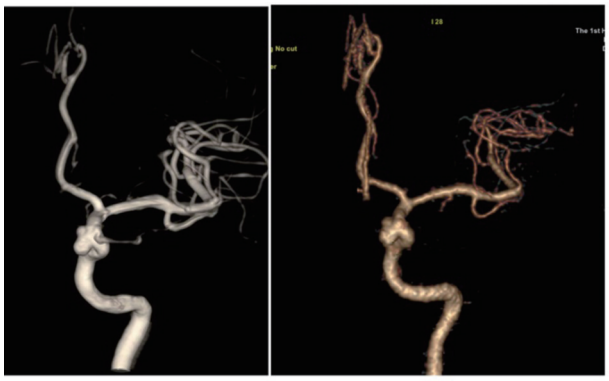
测量方法	AR	BNF	DNR	HWR	SR
MIP-MPR	0.86(0.65,1.21)	1.00(0.89,1.39)	0.94(0.74,1.35)	0.81(0.70,0.95)	1.10(0.77,1.71)
减影VR	0.71(0.60,1.00)	0.96(0.86,1.11)	0.79(0.65,1.07)	0.79(0.68,0.89)	1.01(0.68,1.48)
DSA	0.73(0.59,0.96)	0.98(0.81,1.11)	0.79(0.66,1.00)	0.79(0.70,0.89)	0.91(0.61,1.49)
χ^2值	47.356	21.845	55.909	7.362	71.086
P值	<0.001	<0.001	<0.001	0.025	<0.001
MIP-MPR vs. DSA[a]	<0.001	<0.001	<0.001	0.007	<0.001
减影VR vs. DSA[a]	0.225	0.743	0.557	0.101	0.002
MIP-MPR vs. 减影VR[a]	<0.001	<0.001	<0.001	0.294	<0.001

注：a，MIP-MPR、减影VR、DSA 3组间测量值两两比较的P值。组间两两比较的P值需经Bonferroni校正，即与0.05/k做比较，其中k为组间两两比较的次数，此处k=3，即当P<0.017时差异有统计学意义。AR，纵横比；BNF，瓶颈因子；DNR，顶颈比；HWR，高宽比；SR，大小比

而减影 VR 和 3D-DSA 中均有 71 个（61.2%），差异有统计学意义（χ^2=6.752，P=0.034）。典型病例见图 2，患者，女性，28 岁，左侧颈内动脉虹吸部不规则动脉瘤。图中白色箭头所指处代表颅内动脉瘤的显示受周围组织结构影响。



A. CTA的MIP-MPR后处理图像



B. 3D-DSA图像　　C. CTA减影的VR图像

图 2　典型病例图

3　讨　论

颅内动脉瘤形态学参数的准确评估对动脉瘤的破裂风险评估、治疗方案选择和预后预测具有重要意义。目前，已有研究基于人工智能在动脉瘤测量和分析方面进行了初步尝试，并发现了自动测量的应用潜力[6-7]，但各模型的可解释性和有效性待验证，临床使用受限。而基于动脉瘤图像的直接手动测量简便、直观，临床应用广泛，但需深入探讨可能影响手动测量的因素，提高测量准确度。耿介文等[8]发现不同经验的医师在 3D-DSA 上测量动脉瘤形态学长度类参数时相对准确，而测量入射角度时观察者间一致性较差。本研究在 CT 不同后处理图像上对比常规长度类参数测量差异的同时，创新性地分析了多个常用于破裂风险评估的形态学衍生指标，结果显示 CT 图像后处理方式的选择可能影响动脉瘤形态学参数测量的准确性，整体上，减影 VR 上的测量结果比 MIP-MPR 更准确，更适用于颈内动脉虹吸部动脉瘤的形态学评估。

CTA 有多种后处理技术如 MIP、MPR、VR 等，可充分显示动脉瘤的形态及与周围组织结构的关系，各种方式各有特点，优势互补。MIP 对密度变化较敏感，可清晰显示血管的狭窄、扩张及充盈缺损，易于区分血管内的钙化和对比剂，但其为二维显示，易受观测角度的影响，遗漏部分信息；而 MPR 可从任意角度斜面重建，弥补了 MIP 的不足[4]。Kim HJ 等[9]测量颅内动脉瘤径线时发现，瘤颈直径测量值的观察者内和观察者间的异质性高于测得的瘤高和瘤宽，但该研究排除了形状复杂的动脉瘤，且测量基于 CTA 的 VR 和 3D-TOF MRA 的 MIP 图像，结果可能受图像重建算法的影响，应用相对局限。而本研究基于同一种检查方式对比不同图像后处理技术对动脉瘤形态学参数测量的影响，减少了混杂因素的干扰，实用性强。本研究发现 MIP-MPR 和减影 VR 均可准确反映瘤体的最大径、瘤高及瘤宽，而载瘤动脉的平均直径和颈宽的测量结果在不同后处理图像中具有异质性。其中 MIP-MPR 瘤颈测量的差异主要体现在颈内动脉虹吸部动脉瘤上，提示测量差异的形成可能与动脉瘤周围的环境相关。颈内动脉虹吸部解剖结构复杂，周围毗邻硬膜环、结缔组织、神经、骨等多种组织结构，瘤颈的显示可能受干扰。此外，此处血管走形迂曲，当动脉瘤过大时可能与周围的载瘤动脉重叠，遮挡部分瘤颈。而减影 CTA 可有效去除颅底骨质结构，全方位、直观立体地显示颅内血管全貌，充分展示动脉瘤形态及与周围血管的空间位置关系，在虹吸部动脉瘤显示方面优势显著。蒋永明[10]发现多层螺旋 CT 的 VR 重建的动脉瘤检出率及图像质量均高于 MIP 和 MPR。王晓慧等[11]报道 3D-CTA（即减影 CTA 的 VR）可准确诊断颅内动脉瘤，其显示的颈宽及最大径与 3D-DSA 一致。而本研究更深入细致地分析了多个动脉瘤的形态学参数及其衍生指标，结果显示减影 VR 上得出的动脉瘤颈宽、最大径等形态学参数及其衍生指标相对准确，且这种差异不受动脉瘤在虹吸部与否的影响，进一步证实了减影 VR 在动脉瘤评估中的优势。

形态学参数测量的差异对动脉瘤评估有潜在影响。宽颈动脉瘤的治疗方式复杂且复发风险高[12-15]。本研究显示 MIP-MPR 上动脉瘤的颈宽偏小，且有 17 例（14.7%）宽颈动脉瘤被归入窄颈动脉瘤的类别，这种测量差异可能影响动脉瘤治疗策略选择和预后评估。载瘤动脉的直径与血管内介入术中支架的选择紧密相关。本研究中，动脉瘤载瘤动脉的平均直径由高到低依次为 3D-DSA，减影 VR，MIP-MPR，其中 MIP-MPR 与 DSA 相比测量差异最大，而减影 VR 与 DSA 的差异在亚组分析时不显著。这种差异将影响血管内介入术中支架的选

择，选用的支架过小可能造成支架贴壁不良。支架贴壁不良可能引发血栓、动脉瘤内漏、支架移位等并发症，影响患者的疗效[16]。因此，需结合多种图像后处理技术从多角度进行载瘤血管的评估。

不同形态学指标对颅内动脉瘤的破裂风险有不同影响，其中SR是预测动脉瘤破裂风险的关键指标。SR越大，瘤体破裂风险越高[17]。在本研究中基于减影VR和MIP-MPR得出的SR值均高于3D-DSA上的值，除了SR外基于VR得出的所有形态学衍生指标与3D-DSA相似，而MIP-MPR上的动脉瘤形态学衍生指标整体偏大。这可能影响动脉瘤破裂风险评估的准确性及可靠性。因此，医生在应用时需结合各种后处理技术整体评估，而不能单纯依靠某一形态学指标主观判断。

本研究的局限性：首先，仅为单中心研究，结果仍需进一步证实。其次，纳入的病例数有限，但是研究对象均为未破裂的颅内动脉瘤，且DSA和CTA检查的时间间隔不超过1个月，避免了动脉瘤破裂后的形态改变和动脉瘤生长对测量结果的影响，样本具有代表性。此外，本研究的数据全部基于手动测量，相对耗时且未与人工智能对比，后续有待纳入更多病例进一步探索。

由本研究可知，颅内动脉瘤形态学参数测量的准确性与CT图像后处理方式及颈内动脉虹吸部的结构存在关联。整体而言，基于减影VR的测量值比MIP-MPR更准确，更适用于颈内动脉虹吸部动脉瘤的观测。测量的准确性与临床诊疗的有效性密切相关，临床实践中需根据动脉瘤形态及部位选择合适的图像重建方法，或采用多种图像后处理技术相结合综合评估。

参 考 文 献

[1] Etminan N, MacDonald RL. Neurovascular disease, diagnosis, and therapy: subarachnoid hemorrhage and cerebral vasospasm[J]. Handb Clin Neurol, 2021, 176: 135-169.

[2] Wang GX, Liu J, Chen YQ, et al. Morphological characteristics associated with the rupture risk of mirror posterior communicating artery aneurysms[J]. J Neurointerv Surg, 2018, 10(10): 995-998.

[3] 黄 中，姜 雪，蔡 焰，等. 基于容积CT数字减影血管成像对颈内虹吸部动脉瘤破裂风险的研究[J]. 中国医学计算机成像杂志，2022，28(1)：26-31.

Huang Z, Jiang X, Cai Y, et al. Study on the risk of aneurysm rupture in the siphon of the neck based on volumetric CT digital subtraction angiography[J]. Chin Comput Med Imag, 2022, 28(1): 26-31.

[4] 中国医师协会神经介入专业委员会，中国颅内动脉瘤计划研究组. 颅内动脉瘤影像学判读专家共识 [J]. 中国脑血管病杂志，2021，18(7)：492-504.

Chinese Federation of Interventional and Therapeutic Neuroradiology, Chinese Intracranial Aneurysm Project Study Group. Expert consensus on imaging interpretation of intracranial aneurysms [J]. Chin J Cerebrovasc Dis, 2021, 18(7): 492-504.

[5] Dhar S, Tremmel M, Mocco J, et al. Morphology parameters for intracranial aneurysm rupture risk assessment[J]. Neurosurgery, 2008, 63(2): 185-196.

[6] Rajabzadeh-Oghaz H, Varble N, Shallwani H, et al. Computer-assisted three-dimensional morphology evaluation of intracranial aneurysms[J]. World Neurosurg, 2018, 119: 541-550.

[7] Geng JW, Hu P, Ji Z, et al. Accuracy and reliability of computer-assisted semi-automated morphological analysis of intracranial aneurysms: an experimental study with digital phantoms and clinical aneurysm cases[J]. Int J Comput Assist Radiol Surg, 2020, 15(10): 1749-1759.

[8] 耿介文，吉 喆，沈 杰，等. 不同经验医师测量颅内动脉瘤形态学参数的一致性分析[J]. 中国脑血管病杂志，2019，16(12)：633-636.

Geng JW, Ji Z, Shen J, et al. Consistency analysis of aneurysm morphological parameters measurements by different experienced physicians[J]. Chin J Cerebrovasc Dis, 2019, 16(12): 633-636.

[9] Kim HJ, Yoon DY, Kim ES, et al. Intraobserver and interobserver variability in CT angiography and MR angiography measurements of the size of cerebral aneurysms[J]. Neuroradiology, 2017, 59(5): 491-497.

[10] 蒋永明. MSCTA图像后处理技术对颅内动脉瘤的应用价值[J]. 检验医学与临床，2017，14(21)：3189-3190，3192.

Jiang YM. Application value of MSCTA image post-processing technique in intracranial aneurysms[J]. Lab Med Clin, 2017, 14(21): 3189-3190, 3192.

[11] 王晓慧，杨 娟，张 瑜. 3D-CTA对颅内动脉瘤诊断效能及治疗指导的价值研究[J]. 中国CT和MRI杂志，2022，20(1)：18-20.

Wang XH, Yang J, Zhang Y. Study on diagnostic efficacy of 3D-CTA on intracranial aneurysms and value of treatment guidance[J]. Chin J CT MRI, 2022, 20(1): 18-20.

[12] Fernandez Zubillaga A, Guglielmi G, Viñuela F, et al. Endovascular occlusion of intracranial aneurysms with electrically detachable coils: correlation of aneurysm neck size and treatment results[J]. AJNR Am J Neuroradiol, 1994, 15(5): 815-820.

[13] Vinacci G, Celentano A, Agosti E, et al. Comaneci-assisted coiling of wide-necked intracranial aneurysm: a single-center preliminary experience[J]. J Clin Med, 2022, 11(22): 6650.

[14] Pierot L, Cognard C, Anxionnat R, et al. Endovascular treatment of ruptured intracranial aneurysms: factors affecting midterm quality anatomic results: analysis in a prospective, multicenter series of patients (CLARITY)[J]. AJNR Am J Neuroradiol, 2012, 33(8): 1475-1480.

[15] Nakazaki M, Nonaka T, Nomura T, et al. Cerebral aneurysm neck diameter is an independent predictor of progressive occlusion after stent-assisted coiling[J]. Acta Neurochir, 2017, 159(7): 1313-1319.

[16] 付培基. 颅内动脉瘤栓塞辅助支架贴壁情况观察及影响因素分析[D]. 郑州：郑州大学，2020.

Fu PJ. Observation of the stent attachment of stent-assisted embolization of intracranial aneurysms and analysis of the influencing factors[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2020.

[17] Pei YS, Xu ZH, Liang GB, et al. Risk factors of anterior circulation intracranial aneurysm rupture: extracranial carotid artery tortuosity and aneurysm morphologic parameters[J]. Front Neurol, 2021, 12: 693549.

（责任编辑：曾 玲）