

基于 CT 图像的纹理分析对体外冲击波碎石术疗效的预测价值

卢宇超,李聪,胡道予,许楚瓿

【摘要】 目的:探讨基于 CT 图像的纹理分析对体外冲击波碎石术(ESWL)疗效的预测价值。**方法:**回顾性分析 82 例进行 ESWL 碎石的患者的病例资料,男 63 例,女 19 例,评估性别、年龄、结石位置、体重指数(BMI)、结石最大长径及最大横径、 45° 结石距体表距离(SSD)、平均 CT 密度值及 CT 纹理分析定量参数平均灰度值、标准差、偏度、峰度、熵、异质性对碎石结果的影响。依据治疗后残余结石是否 <4 mm 将患者分为碎石成功组及失败组,对比两组间各纹理参数的特征及不同参数组合预测碎石效果的效能。**结果:**碎石成功组与碎石失败组的平均 CT 值 $[(699.47 \pm 176.32)$ HU, (848.48 ± 191.69) HU, $t = -3.495, P < 0.01$]、CT 纹理参数平均灰度值 $(1723.47 \pm 176.32, 1872.48 \pm 191.69, t = -3.495, P < 0.01)$ 、峰度 $(-0.82 \pm 0.34, -1.07 \pm 0.28, t = 3.400, P < 0.01)$ 及熵 $(4.26 \pm 0.87, 4.76 \pm 0.44, t = -2.809, P < 0.01)$ 的差异具有统计学意义,平均灰度值、峰度以及参数组合平均灰度值 + 标准差、平均灰度值 + 熵、平均灰度值 + 标准差 + 熵、偏度 + 峰度、峰度 + 异质性、偏度 + 峰度 + 异质性的组合预测碎石效果的效能良好 $(0.7 < \text{AUC} < 0.9)$, 余各纹理参数的 AUC 均在 $0.5 \sim 0.7$ 之间,预测碎石效果的效能一般。**结论:**CT 纹理分析定量参数有助于预测 ESWL 碎石疗效。

【关键词】 尿路结石; 体外冲击波碎石; 体层摄影术, X 线计算机; 纹理分析

【中图分类号】 R814.42; R692.4 **【文献标识码】** A **【文章编号】** 1000-0313(2019)07-0801-04

DOI:10.13609/j.cnki.1000-0313.2019.07.017

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



The predictable value of CT texture analysis to the treatment outcomes after extracorporeal shock wave lithotripsy LU Yu-chao, LI Cong, HU Dao-yu, et al. Department of Urology, Tongji Hospital, Tongji Medical College, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430030, China

【Abstract】 Objective: To study the clinical value of CT texture analysis in predicting the treatment outcomes after extracorporeal shock wave lithotripsy (ESWL). **Methods:** A total of 82 patients (63 males, 19 females) who underwent non-enhanced computed tomography before ESWL were retrospectively analyzed. The gender, age, stone location, body mass index (BMI), the maximum longitudinal and transverse diameter, 45° skin-to-stone distance (SSD), mean CT density were analyzed for predicting the treatment outcomes after ESWL, as well as the CT texture parameters including mean value, standard deviation, skewness, kurtosis, entropy and heterogeneity. The patients were divided into success or failure group due to the size of residual stones ($<4\text{mm}/\geq 4\text{mm}$) after treatment. The characteristics of texture parameters and the efficacy of different parameters' combinations in ESWL outcomes prediction were compared between two groups. **Results:** The mean CT density $(699.47 \pm 176.32, 848.48 \pm 191.69, t = -3.495, P < 0.01)$, CT texture parameters mean value $(1723.47 \pm 176.32, 1872.48 \pm 191.69, t = -3.495, P < 0.01)$, kurtosis $(-0.82 \pm 0.34, -1.07 \pm 0.28, t = 3.400, P < 0.01)$ and entropy $(4.26 \pm 0.87, 4.76 \pm 0.44, t = -2.809, P < 0.01)$ between two groups were statistically significant, mean value, kurtosis and mean value + standard deviation, mean value + entropy, mean value + standard deviation + entropy, skewness + kurtosis, kurtosis + heterogeneity, skewness + kurtosis + heterogeneity combinations predicted the results of the lithotripsy effectively $(0.7 < \text{AUC} < 0.9)$, AUC of the other texture parameters were between 0.5 and 0.7. **Conclusion:** Texture analysis of quantitative parameters or a combination of different parameters can help predict the effect of litho-

作者单位: 430030 武汉, 华中科技大学同济医学院附属同济医院泌尿外科(卢宇超、李聪), 放射科(胡道予、许楚瓿)

作者简介: 卢宇超(1988-), 男, 贵州贵阳人, 博士, 主治医师, 主要从事泌尿系结石的研究。

通讯作者: 许楚瓿, E-mail: xchuou@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(81771801、81571642、81701657、81801695)

tripsy after ESWL.

【Key words】 Urinary tract calculi; Extracorporeal shock wave lithotripsy; Tomography, X-ray computed; Texture analysis

泌尿系结石是泌尿系统的常见病和多发病^[1]。体外冲击波碎石术(extracorporeal shock wave lithotripsy, ESWL)曾被当作治疗尿路结石的首选手段^[2]。随着内镜及微创手术技术的不断进步, ESWL 的应用逐渐减少,但由于 ESWL 相对无创,麻醉用量较小,较易被患者所接受,仍有其独特的优势^[3]。因此,为了达到更好的结石清除率,同时避免患者进行再次的治疗,选择合适的泌尿系统结石患者进行 ESWL 治疗十分重要。

CT 平扫检查被认为是诊断尿路结石的金标准,理论上基于 CT 图像的多种特征可作为预测 ESWL 预后的因素^[4]。CT 纹理分析(CT texture analysis, CTTA)可以提取医学图像的特征,并进行定量分析和评价,已用于多种疾病的鉴别诊断和预后预测^[5]。本文旨在运用 CT 纹理分析对 ESWL 术后不同疗效组间各参数进行对比,并分析其疗效预测的价值。

材料与方法

1. 临床资料

搜集本院 2015 年 1 月—2017 年 12 月行 ESWL 治疗的 82 例输尿管结石患者的病例资料。纳入标准:①术前进行多层螺旋 CT 平扫检查;②单发输尿管结石,既往无尿路结石治疗史,结石最大横径 <1 cm;③无肾积水或肾积水 <2 cm。排除标准:①肾积水 ≥ 2 cm;②合并有其他 ESWL 禁忌证;③CT 图像质量不佳;④术后失访。本研究共纳入患者 82 例,其中男 63 例,女 19 例;年龄 21~79 岁,平均 (43.42 ± 13.31) 岁。术后 1 个月随访,依据残余结石是否 <4 mm 将患者分为碎石成功组和失败组。成功组 55 例,男 45 例,女 10 例,平均年龄 (41.67 ± 12.37) 岁;失败组 27 例,男 18 例,女 9 例,平均年龄 (47.00 ± 14.63) 岁。

2. CT 检查及 ESWL 治疗

患者于术前行常规腹部 CT 平扫检查,采用 GE Light Speed VCT 64 层螺旋 CT 扫描机进行 CT 检查,扫描参数:管电压 100~120 kV,管电流 200~350 mA,螺距 1.375,矩阵 512×512 ,层厚 5 mm,重建层厚 1.25 mm。

ESWL 治疗采用 Dornier 电磁式体外碎石机(Dornier Delta, Dornier MedTech GmbH, Germering, Germany),所有患者均运用同一台仪器,由同一医师按照相同的操作流程和步骤完成:从档位 2 开始,逐步递增至档位 4,至进行 3000 次冲击或结石粉碎为

止,冲击波发射频率为 1.5 Hz。

3. 临床资料采集及图像分析

记录患者的性别、年龄、结石位置,计算体重指数(body mass index, BMI)。图像由有 7 年腹部影像诊断经验的放射科医师进行盲法分析。测量结石的最大长径、最大横径、 45° 结石距体表距离(skin-to-stone distance, SSD)及平均 CT 值。纹理分析采用 Fire Voxel 软件(New York University, USA)进行图像处理,选取软组织窗,除病灶刚出现及即将消失的两个层面外,在结石的每个层面勾画兴趣区(region of interest, ROI),沿结石的内缘手动勾画轮廓,获得结石的感兴趣容积(volume of interest, VOI),软件根据勾画的 VOI 提取平均灰度值、标准差、偏度、峰度、熵及异质性等参数。

4. 统计学分析

采用 SPSS 19.0 进行统计学分析。连续变量使用 Kolmogorov-Smirnov 检验是否符合正态分布。符合正态分布者用 $\bar{x} \pm s$ 表示,采用 t 检验分析;不符合正态分布者用中位数表示,采用 Mann-Whitney U 检验分析。分类变量使用卡方检验,用数目(百分比)表示。采用受试者操作特征(receiver operating characteristic, ROC)曲线对相关参数进行分析,获得曲线下面积(area under curve, AUC),根据约登指数(敏感度+特异度-1)确定截断值,并计算相应的灵敏度及特异度。以 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

结果

1. 患者的临床资料

82 例中,发生在左侧输尿管的结石 48 例,右侧 34 例。两组患者的性别、年龄、结石发生部位、BMI、结石的最大横径及最大长径、SSD 45° 的差异无统计学意义($P > 0.05$, 表 1),成功组平均 CT 值 (699.47 ± 176.32) 小于失败组 (848.48 ± 191.69) ,差异有统计学意义($t = -3.495, P < 0.01$, 表 1)。

2. 患者的 CTTA 定量参数

在 CTTA 定量参数中,碎石成功组和碎石失败组平均灰度值、标准差、偏度、峰度及熵值符合正态分布,采用独立样本 t 检验比较,异质性的数值不符合正态分布,采用 Mann-Whitney U 检验。碎石成功组与碎石失败组的平均灰度值、峰度及熵的差异具有统计学意义($t = -3.495, P < 0.01; t = 3.400, P < 0.01; t = -2.809, P < 0.01$, 表 2),而标准差、偏度及异质性的

差异不具有统计学意义($P>0.05$,表2)。

表1 碎石成功组与碎石失败组患者的一般临床情况

变量	成功组 (n=55)	失败组 (n=27)	χ^2/t	P
性别			2.335	0.126
男	45(81.82%)	18(66.67%)		
女	10(18.18%)	9(33.33%)		
年龄(岁)	41.67±12.37	47.00±14.63	-1.724	0.089
结石位置(例)			0.741	0.389
左侧输尿管	34(61.82%)	14(51.85%)		
右侧输尿管	21(38.18%)	13(48.15%)		
BMI(kg/m ²)	24.50±2.71	24.14±2.33	0.592	0.556
最大长径(mm)	9.78±3.40	10.87±2.33	-1.695	0.094
最大横径(mm)	6.30±1.94	6.99±1.54	-1.606	0.112
SSD 45°(mm)	102.15±21.1	97.87±18.88	0.891	0.375
CT密度值(HU)	699.47±176.32	848.48±191.69	-3.495	0.001

表2 碎石成功组与碎石失败组患者的CT纹理定量参数分析

定量参数	成功组 (n=55)	失败组 (n=27)	检验值	P
平均灰度值	1723.47±176.32	1872.48±191.69	-3.495	0.001
标准差	308.47±96.45	330.30±91.88	-0.978	0.331
偏度	0.17±0.35	0.10±0.34	0.875	0.384
峰度	-0.82±0.34	-1.07±0.28	3.400	0.001
熵	4.26±0.87	4.76±0.44	-2.809	0.006
异质性*	0.1800	0.1698	-0.242	0.809

注:*采用中位数表示,其他参数采用 $\bar{x}\pm s$ 表示。

3. CTTA 各定量参数的诊断效能

根据CTTA各定量参数绘制ROC曲线,得到相应的AUC,AUC>0.9为预测碎石结果的诊断效能显著,0.7<AUC<0.9之间为诊断效能良好,0.5<AUC<0.7为诊断效能一般。同时根据约登指数(敏感度+特异度-1)确定截断值,并计算相应的敏感度及特异度。平均灰度值及峰度的AUC分别为0.719、0.745,预测碎石结果的效能良好(表3),余各纹理分析参数的AUC均在0.5~0.7之间,预测碎石结果的诊断效能一般,且个别指标如异质性、平均灰度值的敏

感度及标准差、偏度的特异度较差。

表3 CT纹理分析各参数预测碎石成功的效能

特征	AUC (95%CI)	敏感度 (%)	特异度 (%)	截断值
平均灰度值	0.719(0.593,0.844)	48.1	92.7	<1950.000
标准差	0.600(0.469,0.730)	85.2	40.0	<270.000
偏度	0.540(0.406,0.673)	87.3	29.6	>-0.155
峰度	0.745(0.631,0.859)	52.7	88.9	>-0.865
熵	0.700(0.584,0.817)	66.7	70.9	<4.645
异质性	0.516(0.377,0.656)	25.9	92.7	>0.2421

5. CT纹理分析定量参数的不同组合的诊断效能

对上述纹理分析的定量参数进行不同组合,建立ROC曲线(图1)。因偏度、峰度及异质性的数值较小,因此进行如下组合(表4)。其中平均灰度值+标准差、平均灰度值+熵、平均灰度值+标准差+熵、偏度+峰度、峰度+异质性、偏度+峰度+异质性的组合AUC在0.7~0.9之间,判断碎石结果的诊断效能良好。余各组合的AUC在0.5~0.7之间,鉴别诊断效能一般。

表4 CT纹理分析各参数不同组合预测碎石结果的效能

特征	AUC (95%CI)	敏感度 (%)	特异度 (%)
平均灰度值+标准差	0.729(0.606,0.851)	55.6	87.3
平均灰度值+熵	0.729(0.604,0.854)	48.1	92.7
标准差+熵	0.661(0.534,0.789)	51.9	78.2
平均灰度值+标准差+熵	0.745(0.624,0.866)	55.6	90.9
偏度+峰度	0.732(0.612,0.852)	74.1	65.5
偏度+异质性	0.542(0.400,0.684)	40.7	81.2
峰度+异质性	0.748(0.632,0.864)	55.6	85.5
偏度+峰度+异质性	0.741(0.623,0.859)	51.9	91.0

讨论

泌尿系结石发病率逐年增高,常伴有尿路感染、腰痛、肾积水、肾功能下降等,影响生活质量^[1]。上个世纪八十年代,ESWL被应用于医学领域,在之后的一

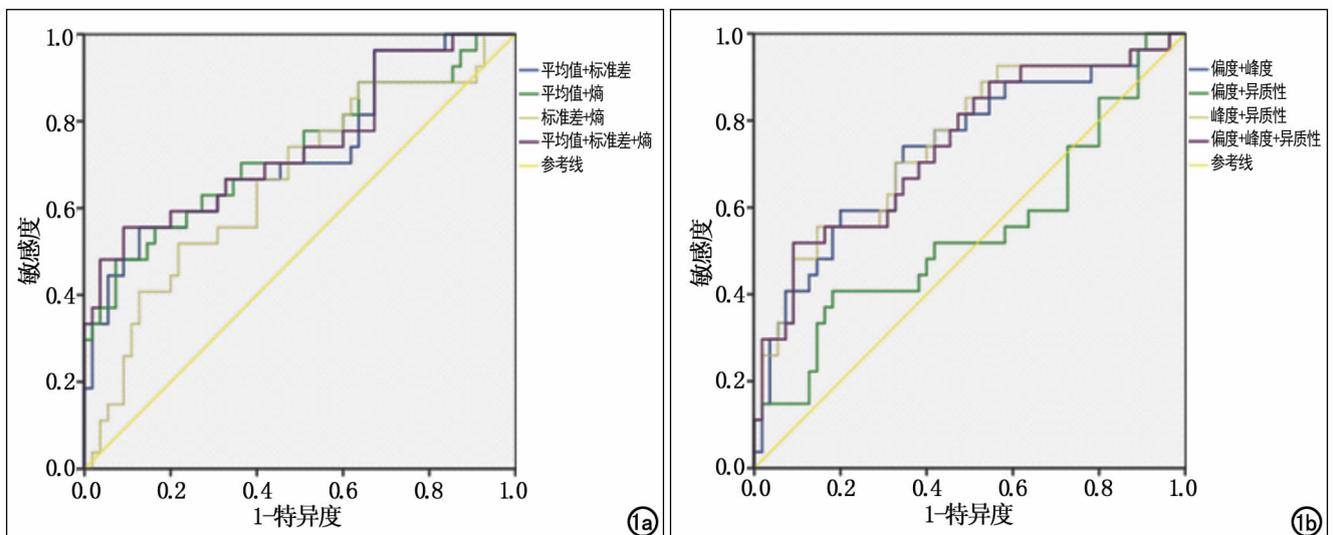


图1 预测碎石结果的ROC曲线图。a)平均灰度值+标准差、平均灰度值+熵、标准差+熵、平均灰度值+标准差+熵四种组合的ROC曲线;b)偏度+峰度、偏度+异质性、峰度+异质性、偏度+峰度+异质性四种组合的ROC曲线。

段时间内,ESWL 曾被当作治疗肾和/或输尿管结石的首选手段^[2]。随着内镜及微创手术技术的不断进步,与 ESWL 相比,后者拥有较高的结石清除率及较低的复治率,ESWL 的应用逐渐减少,然而,ESWL 仍有其独特的优势^[3]。2017 版欧洲泌尿外科学会指南仍将 ESWL 作为 <2 cm 的肾结石(1~2 cm 的肾下盏结石或存在不利于碎石的因素的情况除外)及 <1 cm 的输尿管结石的推荐治疗手段^[6]。CTTA 通过分析图像中像素或体素灰度级的分布和关系,显示组织结构的异质性,提供客观、定量的评估^[5]。有文献报道,将排出体外的尿路结石进行常规 CT 扫描及 CT 纹理分析,并进行冲击波碎石,以获得可以预测碎石效果的纹理特征^[7]。然而,目前还没有关于 CT 纹理分析在体内结石的疗效预测研究。

本研究基于 CT 平扫图像测量得到的相关数据以及 CT 纹理相关参数对影响输尿管结石体外冲击波碎石疗效的因素进行分析。碎石成功组的平均 CT 值低于碎石失败组,且差异具有统计学意义。有研究发现,在进行 ESWL 治疗的患者中,结石 CT 值 <970 HU 的,结石清除率高达 96%,而结石 CT 值 ≥ 970 HU 的结石清除率仅为 38%^[8]。关于 ESWL 碎石成功与否的平均 CT 值的截断值有很大的差异,文献报道从 593~1200 HU 不等,这可能与测量平均 CT 密度值的方法不同有关^[4]。

在 CTTA 相关参数中,平均灰度值、峰度及熵的差异具有统计学意义。平均灰度值表示在选取的 ROI 内大于零的像素的平均值,该值越高,意味着 ROI 内的区域更为明亮。本文研究显示,碎石失败组的平均灰度值较大,这可能与碎石失败组的平均 CT 值较高、ROI 内的区域更为明亮有关。熵表示在 ROI 内像素的紊乱程度,Cui 等^[7]研究发现,对排出体外的尿路结石进行 CTTA,熵与清除结石所需的 ESWL 冲击次数成正相关,熵值越大,清除结石所需的冲击波次数越多,同时,峰度与清除结石所需的 ESWL 冲击次数成负相关,峰度的绝对值越大,清除结石所需的冲击波次数越多。本研究也发现,碎石成功组的熵值较失败组小,峰度值绝对值较失败组小,且差异具有统计学意义,是与前者的研究结果相一致的。

本研究根据 CT 纹理分析各参数绘制 ROC 曲线,以判断各参数判断碎石结果的效能,平均灰度值及峰度的 AUC > 0.7,判断结果的效能良好。余各纹理参

数的 AUC 均在 0.5~0.7 之间,判断碎石结果的效能一般,说明这些参数在术前预测碎石结果的价值有限。将不同参数进行组合,其中平均灰度值+标准差、平均灰度值+熵、平均灰度值+标准差+熵、偏度+峰度、峰度+异质性及偏度+峰度+异质性组合的 AUC 均在 0.7~0.9 之间,判断碎石结果的效能良好,余各组合的 AUC 在 0.5~0.7 之间,鉴别诊断效能一般。对比单个参数值,组合参数判断结果的效能相对有所提高,但仍然不是十分理想,还需要进一步的研究。

本研究的局限性:本研究的病例数目相对较少,后续还需大样本、多中心的前瞻性研究来进一步验证研究结果;本研究为回顾性研究,选择存在偏倚。

综上所述,利用纹理分析定量参数或不同参数的组合,可用于预判 ESWL 术碎石疗效,有助于临床判断是否选择 ESWL 作为治疗手段,以提高患者的结石清除率,避免再次治疗和并发症的发生。

参考文献:

- [1] Wang W, Fan J, Huang G, et al. Prevalence of kidney stones in mainland China: a systematic review[J]. *Sci Rep*, 2017, 7:41630.
- [2] Torricelli FC, Danilovic A, Vicentini FC, et al. Extracorporeal shock wave lithotripsy in the treatment of renal and ureteral stones[J]. *Rev Assoc Med Bras (1992)*, 2015, 61(1): 65-71.
- [3] Zheng C, Yang H, Luo J, et al. Extracorporeal shock wave lithotripsy versus retrograde intrarenal surgery for treatment for renal stones 1~2cm: a meta-analysis[J]. *Urolithiasis*, 2015, 43(6): 549-556.
- [4] Yamashita S, Kohjimoto Y, Iwahashi Y, et al. Noncontrast computed tomography parameters for predicting shock wave lithotripsy outcome in upper urinary tract stone cases[J]. *Biomed Res Int*, 2018, 2018:9253952.
- [5] Lubner MG, Smith AD, Sandrasegaran K, et al. CT texture analysis: definitions, applications, biologic correlates, and challenges [J]. *Radiographics*, 2017, 37(5): 1483-1503.
- [6] Turk C, Petrik A, Sarica K, et al. EAU guidelines on interventional treatment for urolithiasis[J]. *Eur Urol*, 2016, 69(3): 475-482.
- [7] Cui HW, Devlies W, Ravenscroft S, et al. CT texture analysis of ex vivo renal stones predicts ease of fragmentation with shockwave lithotripsy[J]. *J Endourol*, 2017, 31(7): 694-700.
- [8] Ouzaid I, Al-Qahtani S, Dominique S, et al. A 970 hounsfield units (HU) threshold of kidney stone density on non-contrast computed tomography (NCCT) improves patients' selection for extracorporeal shockwave lithotripsy (ESWL): evidence from a prospective study[J]. *BJU Int*, 2012, 110(11 Pt B): E438-E442.

(收稿日期:2019-03-08 修回日期:2019-05-21)