

基于多参数磁共振的影像组学在前列腺癌中的研究进展

骆俊佳¹ 综述 陈晓东^{1,2}, 罗泽斌^{1,2}, 罗树存^{1,2} 审校

1. 广东医科大学, 广东 湛江 524000;

2. 广东医科大学附属医院放射科, 广东 湛江 524000

【摘要】 前列腺癌已经成为威胁全球男性健康最常见恶性肿瘤之一。早期发现和准确诊断可以提高癌症的存活率,降低治疗成本。随着各种检查技术手段日趋发展,前列腺磁共振成像不断地显示出其独特优势,目前发展已趋于多参数磁共振成像(mp-MRI)。自精准影像医疗提出后,符合其本质要求的影像组学技术发展迅速,在前列腺癌的检出与鉴别、分级与分期、复发预后以及疗效评估等方面均起着积极的作用。本文对基于 mp-MRI 的影像组学前列腺癌的应用进展进行综述。

【关键词】 前列腺癌;多参数磁共振成像;计算机辅助诊断技术;影像组学;纹理特征;临床应用

【中图分类号】 R737.25 **【文献标识码】** A **【文章编号】** 1003-6350(2020)11-1464-05

Progress of multi-parameter MRI-based radiomics in prostate cancer. LUO Jun-jia¹, CHEN Xiao-dong^{1,2}, LUO Ze-bin^{1,2}, LUO Shu-cun^{1,2}. 1. Guangdong Medical University, Zhanjiang 524000, Guangdong, CHINA; 2. Department of Radiology, the Affiliated Hospital of Guangdong Medical University, Zhanjiang 524000, Guangdong, CHINA

【Abstract】 Prostate cancer has become one of the most common malignancies threatening men's health in the worldwide. Early detection and accurate diagnosis can improve the survival rate of the patients with prostate cancer and reduce the cost of treatment. With the development of various examination techniques, magnetic resonance imaging in prostate continues to show its unique advantages, and now the development of MRI tends to be multi-parameter magnetic resonance imaging (mp-MRI). Since precision imaging medicine was put forward, radiomics technology that meets its essential requirements has developed rapidly, and has played an active role in the detection and differentiation, classification and staging, prognosis of recurrence and evaluation of efficacy of prostate cancer. This paper reviews the application of mp-MRI-based radiomics in prostate cancer.

【Key words】 Prostate cancer; Multi-parameter magnetic resonance imaging (mp-MRI); Computer-aided diagnosis; Radiomics; Textural features; Clinical application

前列腺癌(prostate cancer, PCa)可以说是世界各地男性都非常关注的主要问题,也是在男性泌尿系统中最常见的恶性肿瘤之一。随着人民生活水平的提高、饮食结构的调整以及医疗技术水平的提高,我国的 PCa 的发病率和检出率较前明显上升,已经逐步接近西方国家,并且有不断低龄化的趋势。据 2018 年全球癌症统计报告显示,全球新增 PCa 患者 127.6 万例,死亡 35.9 万例,分别占男性癌症新发和死亡人数的 13.5% 和 6.7%^[1]。我国男性 PCa 发病率居第 6 位。PCa 起病隐匿,早期临床症状不明显,诊断困难,自然病程相对较长,患者出现自觉症状而就诊时往往病情已进展,或丧失最佳治疗时机。因此,早发现及早确诊前列腺疾病不仅可为治疗方式提供指导,同时是决定 PCa 患者预后、疗效及其生存期长短的关键。相比于传统的前列腺特异性抗原(PSA)检测和经直肠超声引导活检,磁共振成像(magnetic resonance imaging, MRI)具有软组织分辨力高的优势,能够清晰分辨出前列腺的解剖结构,提供 PCa 病变的位置、大小和周围侵袭性的信息^[2],因此逐渐被更多的应用于 PCa 的诊断。

1 多参数 MRI 诊断 PCa 的临床进展

随着各种检查技术手段日益发展, MRI 诊断前列腺疾病不断地显示出其独特优势,目前 MRI 技术发展已经逐渐趋于多参数磁共振成像(multi-parameter magnetic resonance imaging, mp-MRI)。Mp-MRI 是一种将形态学序列和功能成像技术组合在一起的成像方法,它将 T1 加权像(T1WI)、T2 加权像(T2WI)和功能成像技术结合起来,可以提供前列腺的形态学和功能信息,从而提高了 PCa 的诊断水平^[3]。这也有助于引导活检实现更高的肿瘤检出率,更好地反映真正的 Gleason 分级。欧洲泌尿生殖器官放射学协会(ESUR)于 2012 年建立了前列腺 mp-MRI 的前列腺成像报告和数据系统(PI-RADS)评分系统^[4]。2015 年,由美国放射学会(ACR)、欧洲放射学会(ESUR)和 AdMeTech 基金会组成的联合指导委员会宣布了前列腺成像报告和数据系统第 2 版(PI-RADS v2)的最新版本^[5],它旨在促进前列腺 mp-MRI 检查的全球标准化,减小在获取、解释和报告方面的差异。

与 PCa 相关的 MRI 序列包括:形态学序列中的 T2

通讯作者:罗泽斌,主任医师,硕士,研究生导师, E-mail: gdmcfjsjd@qq.com

加权成像(T2WI);功能成像技术中的动态增强对比MRI (dynamic contrast-enhanced MRI, DCE-MRI)、扩散加权成像(diffusion weighted imaging, DWI)、扩散张量成像(diffusion tensor imaging, DTI)、磁共振波谱学(magnetic resonance spectroscopy, MRS)、MR弹性成像(MR elastograph, MRE)、体素内不相干运动(introvoxel incoherent motion, IVIM)和扩散峰度成像(diffusion kurtosis imaging, DKI)等^[6-7]。近年来,mp-MRI在PCa的早期诊断、与分级分期、疗效与复发预后等多个方面发挥了越来越重要的作用^[2,8-9]。

1.1 T2WI T2WI序列是显示前列腺解剖结构最清楚的序列。获取高分辨率的前列腺T2WI图像不仅是mp-MRI的第一步,也是最至关重要的一步。在高分辨率T2WI图像中,正常前列腺外周带呈高信号,而中央带和移行区信号较低,因此可以清晰地勾画出前列腺的分区解剖,而外周带的PCa通常被描述为低信号区域。相关研究表明,T2WI MR成像是一种可以准确检测移行带PCa的技术^[10]。此外,T2WI图像在预测PCa的病理分期及包膜外侵犯方面也有一定价值^[11]。

1.2 DCE-MRI DCE-MRI是一种能够显示血管通透性和灌注的诊断肿瘤的重要工具。DCE-MRI对血管通透性、细胞外空间和血流变化敏感。DCE-MRI在PCa中的临床应用是基于与正常健康的前列腺组织相比较,恶性病灶的增强时间更早、速度更快、造影剂减退时间更早^[12]。DCE-MR数据可以通过各种半定量或定量模型进行分析,提取出与血管通透性、细胞外空间、血流量和水交换相关的参数^[13]。但是DCE-MRI也存在一定的局限性,首先空间分辨率较低,其次DCE-MRI数据解释的局限性包括移行带良性区域增强特性的重叠。良性前列腺增生和其他良性炎症条件在前列腺移行带也表现出实质性的高血供^[14]。

1.3 DWI 组织的扩散特性与组织间质游离水的量和渗透性有关。一般来说,肿瘤组织中水分子的扩散比正常组织更受限制,这是因为肿瘤细胞密度和细胞内膜和细胞间膜的密度更高,因此DWI图像可以从正常组织和肿瘤组织水分子扩散程度的差异中检测PCa。DWI图像通常具有不同的b值,b值可以用来计算表观扩散系数(ADC),其中的每个像素对应的ADC图像显示为ADC map。水分子在肿瘤组织中的扩散反映了组织结构,如细胞密度和细胞核/细胞质比,以及ADC值的降低。由于这些原因,ADC值在预测PCa Gleason评分中的作用受到了重视^[15-16]。

技术进步使得DWI在高b值或超高b值(大于1 000 s/mm²)下的性能成为可能。以往的研究表明,高b值DWI图像能够增强肿瘤和健康组织之间的轮廓,这使得PCa的检测更加准确^[17]。虽然ADC map的对比度在不同的b值下没有显著变化,但是DWI图像的

对比度在b值为1 500和2 000 s/mm²时显著高于b值为800和10 00 s/mm²时^[18]。DWI图像和ADC图是前列腺MRI检查的重要组成部分。

1.4 MRS 在MRS中,每个代谢物峰在输出图中的位置反映了其氢质子的共振频率或化学位移,以及每个峰的面积反映了该代谢物的相对浓度^[19]。前列腺MRS中观察到的主要峰来自柠檬酸(2.60 ppm)、肌酸(3.04 ppm)和胆碱化合物(3.20 ppm)中的质子。MRS作为PCa的代谢生物标志物,由于数据采集时间长、复杂、分区解剖、处理、分析等因素的影响,在常规临床应用中没有得到广泛的认可。一些研究人员开始从光谱学角度开发用于PCa识别的计算机辅助诊断方案。TIWARI等^[20]开发了一种将多种学习方案(谱聚类)与无监督分层聚类算法集成在一起的方法,以鉴别PCa的相应光谱。该方案成功识别出MRS癌症体素,敏感性为77.8%,假阳性率为28.92%,假阴性率为20.88%。

1.5 其他成像方法 虽然在目前的临床工作中,T2WI、DWI、DCE-MRI和MRS更为常用,但还有一些功能MRI方法,包括弥散张量成像(DTI)、弥散峰度成像(DKI)和MR弹性成像(MRE)也已经被用于PCa的特征性研究^[21-23]。

DTI已广泛应用于临床,特别是神经和肌肉骨骼成像。DTI数据的分数各向异性(FA)和表观扩散系数(ADC)值反映了不同组织中水分扩散受限程度。病理过程可能导致正常FA值的改变和气管造影中纤维的断裂。一些研究证实了前列腺DTI的可行性;DTI示踪成像可以成功地显示前列腺周围的纤维束^[21-23]。DTI示踪成像可能适用于前列腺结构的估计^[22]、PCa的定性以及放疗下前列腺结构变化的监测^[23]。

2 影像组学概述

精准影像医学要求影像医学必须与分子生物学、分子病理学相结合,把大量必要的信息提供给个体化的生物治疗和靶向治疗。然而在过去,影像医学模式仅仅是提供形态学上的诊断,即肉眼可识别的信息。如果要使临床诊断更科学、更客观和更准确,就必须进一步有效地利用医学影像数据,不再局限于形态学的信息,而是要从肿瘤表型中获取出更多有价值的肉眼无法识别的信息,这是一个迫切等待解决的技术问题^[24]。计算能力的最新进展和基因组学的突破,催生了一个新近发展起来的研究领域——“影像组学”^[25]。“影像组学”这个概念是由荷兰学者LAMBIN等^[26]于2012年正式提出,即借助计算机辅助诊断(computer aided diagnosis, CAD)技术,从高通量的影像学图像中提取出数据特征,然后利用先进的特征分析将传统医学影像转化为大量可挖掘的数据信息。其基本流程包括以下几部分:①图像获取及重建:首先获取高质

量、标准化的 mp-MRI 影像,确保了影像数据的准确性以及可以被重复利用的可能性。但是目前前列腺 MRI 检查没有指南和共识,不同的医疗机构之间 MRI 检查参数不同,以至于从中获取的影像数据必然会存在差异,因此不具备有可比性,不能用于影像组学的分析^[27]。②图像分割:根据目前研究,图像分割总共三种方法,包括手动、半自动以及全自动,目前应用最多的仍然是手动分割。在判断边界模糊不清的肿瘤边界时,不同诊断医师之间对其存在明显的异质性,导致手动分割的数据可重复性低,而且手动分割既耗时又低效,使用半自动或自动分割可以明显减少这种异质性,提高数据的可重复性和数据获取的效率^[28]。③特征提取及筛选:是影像组学的核心流程。提取的特征一般是两种类型:一种是病变定性的描述性信息,如形态、大小、边缘及位置等;另一种是肉眼无法识别的特征,如纹理(texture)、组织直方图(histogram)、分形维(fractal dimension)等,可定量评估肿瘤的异质性^[28]。目前研究中常用的特征筛选手段主要包括:主成分分析法、LASSO 回归模型和最大相关最小冗余法等,其中主成分分析是在多项研究中最常用的降维技术^[29]。④模型构建及数据分析:用筛选出来的组学特征或联合临床、病理特征,建立分类或预测模型。常用的模型验证方法有保留法、交叉验证法等,然后应用受试者操作特征(ROC)曲线下面积(area under the curve, AUC)、准确度、敏感性、特异性等衡量指标来进行评估,其中 AUC 是最常用的定量测量指标,在大多数研究中被用于效能评估^[29-32]。

3 影像组学在 PCa 方面的研究进展

3.1 影像组学在 PCa 检出的应用 影像组学特征在前列腺良恶性病变之间存在显著异质性,因此可被用于 PCa 的诊断与鉴别。许岗等^[33]通过对 MR-T2WI 图像分析其纹理特征,得出了部分定量特征参数(熵、平均值、标准差、不均匀度和峰值)有助于 PCa 与良性前列腺增生的鉴别。KUESS 等^[34]利用 mp-MRI 图像,分析出一阶和二阶纹理特征,发现这些特征参数均可用于鉴别前列腺外周带肿瘤和健康组织。SIDHU 等^[35]探究了 PCa 患者的前列腺移行带组学特征,发现其 ADC 直方图峰度和 T1WI 熵均较正常前列腺组织的降低。ALGOHARY 等^[36]研究表明,在前列腺癌组织与健康组织之间,T2WI 序列的影像学特征(7 个)和 ADC 图形的影像学特征(3 个)存在差异且有统计学意义($P < 0.001$)。GIAMBELLUCA 等^[37]的研究分析发现,T2WI 和 ADC 图像的纹理分析有助于识别 PI-RADS 3 病变中的 PCa。另外有学者研究发现,基于 MRI 的影像组学分析方法可以显著改善 PI-RADS v2 对外周带及移行带肿瘤的诊断效能^[38]。

3.2 影像组学与 PCa 病理分级及侵袭性评估 Gleason 评分(Gleason score, GS)系统是一种被广泛使用的 PCa 组织学分级的方法,是评估 PCa 肿瘤异质性的定量评价体系。PCa 分为低危型和高危型两种,其中高危型(临床显著癌)一般是指 Gleason 评分 ≥ 7 分,伴或不伴肿瘤体积 $\geq 0.5 \text{ cm}^3$ /包膜外侵犯^[39]。前列腺的 mp-MRI 影像组学特征可用于预估 GS。NKE-TIAH 等^[40]研究表明,T2WI 纹理特征与 GS 显著相关,对 PCa 的病理差异敏感,可作为潜在的诊断标记,并可用于鉴别 GS(3+4)与 GS(4+3)PCa。ZHANG 等^[41]也探讨了基于 T2WI 和 ADC 图像纹理参数鉴别诊断 PCa GS 评分的可行性,发现 MRI 纹理分析不仅可用于鉴别 PCa GS(3+4)与 GS(4+3),而且 ADC 的熵值鉴别二者的诊断效能最佳。同样,其他学者的研究也提出了 MRI 纹理特征对预测 PCa GS 是有价值的,可为 PCa 病理分级提供可靠的量化信息,对临床 PCa 诊疗方式的确定和预后评估具有重要价值^[42-43]。为了加强 MRI 与临床意义重大的 PCa 之间的联系,ORCZYK 等^[44]对一种新型、半自动的基于纹理的评分系统进行早期概念验证研究,证实了结合 MRI 多序列的熵值评分(entropy score, ES)标准可辅助医生进行临床显著 PCa 的检测和分层,并且该方法既可以让部分 MRI 显示的病变避免活检,又不至于遗漏重要病变。另外,MA 等^[44]研究应用影像组学特征建立一种预测 PCa 有无包膜浸润的微观模型,发现该模型在预测包膜外浸润方面优于放射科医师的目视评估。

3.3 PCa 的复发预测与疗效评估 由于有相当多的 PCa 患者即使接受了根治性手术或放疗,仍然有可能出现生化复发,因此,能够在治疗前预先评估生化复发的风险,然后再进行个体化的精准治疗,这将会减低患者得复发率。为了探讨 MRI 与 PCa 放疗后生化复发的关系,GNEP 等^[46]提取出 T2WI 的纹理特征,研究其与外周带 PCa 放疗后生化复发之间是否存在相关性,证实了 MRI T2WI 纹理特征和几何参数显示与 PCa 放疗后的生化复发密切相关,特别是在高危 PCa 组。ALGOHARY 等^[36]研究结果发现,7 个基于 T2WI 和 3 个基于 ADC 图像的影像组学特征与 PCa 进展有关,因此基于影像组学的评估对主动监测 PCa 患者的临床意义重大。SHIRADKAR 等^[47]研究发现治疗前 T2WI 和 ADC 图的影像组学特征可用于预测 PCa 治疗后的生化复发,并有助于判断辅助治疗效果。

放射治疗会引起 PCa 患者各种临床并发症的出现,为了探究 MRI 纹理特征与 PCa 患者的放疗相关并发症的联系,ABDOLLAHI 等^[48]通过 MR-T2WI 图像纹理特征分析来评估接受强调放疗前后前列腺癌患者膀胱壁的结构变化,并将图像纹理变化与辐射剂量和尿毒性联系起来,研究结果表明,纹理特征改变与辐射

剂量及辐射致尿毒性有良好的相关性,并且可以用来评估辐射导致的膀胱损伤的机制。ROSSI等^[48]探讨应用患者三维剂量分布的纹理特征,改进PCa放疗所导致的直肠毒性和肾毒性等并发症预测模型,使该模型预测效能得到提高。REISCHAUER等^[49]研究结果显示,ADC图的肿瘤总体积结构分析在PCa骨转移的ADT治疗反应评估方面具有应用价值,绝大多数的一阶和二阶统计纹理特征具有较高的精度和对治疗反应的变化。

4 困境与未来

目前,影像组学仍然是一个新兴的研究领域,技术研究暂处于初步阶段,虽然在PCa鉴别诊断、病理分级及侵袭、复发预测、转移评估及疗效判断等方面均具有良好研究前景和临床应用价值,但就眼前而言,研究成果还相对较少,仍然面临着许多挑战。首先是影像数据的获取缺乏规范,图像扫描参数不统一、不同机构机型不同、数据样本不平衡等问题均可能导致处理结果的偏差。因此,制定标准化规范是亟待解决的问题。其次是不同的ROI勾画方式也会影响最终结果。目前仍然是手动勾画ROI,手动方式准确度高但受勾画者主观性影响较大,可重复性差。随着计算机技术的发展以及图像分割算法的不断改进,全自动分割方法将会逐渐取代手动方法,成为今后图像分割的主要方法。只有解决好上述方面的重点和难点,影像组学技术才能更进一步发展,逐渐在医学领域得到广泛应用。

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] CHATTERJEE A, TOKDEMIR S, GALLAN AJ, et al. Multiparametric mri features and pathologic outcome of wedge-shaped lesions in the peripheral zone on T2-weighted images of the prostate [J]. *AJR Am J Roentgenol*, 2019; 212(1): 124-129.
- [3] WANG S, BURTT K, TURKBAY B, et al. Computer Aided-diagnosis of prostate cancer on multiparametric MRI: a technical review of current research [J]. *Biomed Res Int*, 2014, 2014: 789561.
- [4] BARENTSZ JO, RICHENBERG J, CLEMENTS R, et al. ESUR prostate MR guidelines 2012 [J]. *Eur Radiol*, 2012, 22(4): 746-757.
- [5] WEINREB JC, BARENTSZ JO, CHOYKE PL, et al. PI-RADS prostate imaging-reporting and data system: 2015, Version 2 [J]. *Eur Urol*, 2016, 69(1): 16-40.
- [6] 穆玖汐, 李琳, 曹绍东, 等. MRI在前列腺癌诊断和判断侵袭性中的进展[J]. *临床放射学杂志*, 2018, 37(8): 1409-1412.
- [7] 刘晓敏, 陈昆涛. 前列腺癌的多参数MRI研究进展[J]. *国际医学放射学杂志*, 2018, 41(3): 328-331.
- [8] DIKAIOS N, GIGANTI F, SIDHU HS, et al. Multi-parametric MRI zone-specific diagnostic model performance compared with experienced radiologists for detection of prostate cancer [J]. *Eur Radiol*, 2018, 29(8): 4150-4159.
- [9] DUVNJAK P, SCHULMAN AA, HOLTZ JN, et al. Multiparametric Prostate MR Imaging: Impact on Clinical Staging and Decision Making [J]. *Radiol Clin North Am*, 2018, 56(2): 239-250.
- [10] AKIN O, SALA E, MOSKOWITZ CS, et al. Transition zone prostate cancers: features, detection, localization, and staging at endorectal MR imaging [J]. *Radiology*, 2006, 239(3): 784-792.
- [11] CORNUD F, ROUANNE M, BEUVON F, et al. Endorectal 3D T2-weighted 1mm-slice thickness MRI for prostate cancer staging at 1.5Tesla: should we reconsider the indirect signs of extracapsular extension according to the D'Amico tumor risk criteria? [J]. *Eur J Radiol*, 2012, 81(4): e591-e597.
- [12] DURMUS T, BAUR A, HAMM B. Multiparametric magnetic resonance imaging in the detection of prostate cancer [J]. *Aktuelle Urol*, 2014, 45(2): 119-126.
- [13] EWING JR, BAGHER-EBADIAN H. Model selection in measures of vascular parameters using dynamic contrast-enhanced MRI: experimental and clinical applications [J]. *NMR Biomed*, 2013, 26(8): 1028-1041.
- [14] PADHANI AR, GAPINSKI CJ, MACVICAR DA, et al. Dynamic contrast enhanced MRI of prostate cancer: correlation with morphology and tumour stage, histological grade and PSA [J]. *Clin Radiol*, 2000, 55(2): 99-109.
- [15] TOIVONEN J, MERISAARI H, PESOLA M, et al. Mathematical models for diffusion-weighted imaging of prostate cancer using b values up to 2 000 s/mm²: correlation with Gleason score and repeatability of region of interest analysis [J]. *Magn Reson Med*, 2015, 74(4): 1116-1124.
- [16] BOESEN L, CHABANOVA E, LOGAGER V, et al. Apparent diffusion coefficient ratio correlates significantly with prostate cancer gleason score at final pathology [J]. *J Magn Reson Imaging*, 2015, 42(2): 446-453.
- [17] KITAJIMA K, TAKAHASHI S, UENO Y, et al. Clinical utility of apparent diffusion coefficient values obtained using high b-value when diagnosing prostate cancer using 3 tesla MRI: comparison between ultra-high b-value (2 000 s/mm²) and standard high b-value (1 000 s/mm²) [J]. *J Magn Reson Imaging*, 2012, 36(1): 198-205.
- [18] WETTER A, NENSA F, LIPPONER C, et al. High and ultra-high b-value diffusion-weighted imaging in prostate cancer: a quantitative analysis [J]. *Acta Radiol*, 2015, 56(8): 1009-1015.
- [19] NETO JA, PARENTE DB. Multiparametric magnetic resonance imaging of the prostate [J]. *Magn Reson Imaging Clin N Am*, 2013, 21(2): 409-426.
- [20] TIWARI P, VISWANATH S, KURHANEWICZ J, et al. Multimodal wavelet embedding representation for data combination (MaWER-iC): integrating magnetic resonance imaging and spectroscopy for prostate cancer detection [J]. *NMR Biomed*, 2012, 25(4): 607-619.
- [21] PANEBIANCO V, BARCHETTI F, SCIARRA A, et al. *In vivo* 3D neuroanatomical evaluation of periprostatic nerve plexus with 3T-MR diffusion tensor imaging [J]. *Eur J Radiol*, 2013, 82(10): 1677-1682.
- [22] SINHA S, SINHA U. In vivo diffusion tensor imaging of the human prostate [J]. *Magn Reson Med*, 2004, 52(3): 530-537.
- [23] XU J, HUMPHREY PA, KIBEL AS, et al. Magnetic resonance diffusion characteristics of histologically defined prostate cancer in humans [J]. *Magn Reson Med*, 2009, 61(4): 842-850.
- [24] 冯晓源. 精准医疗, 影像先行[J]. *中华放射学杂志*, 2016, 50(1): 1-2.

- [25] ACHARYA UR, HAGIWARA Y, SUDARSHAN VK, et al. Towards precision medicine: from quantitative imaging to radiomics [J]. *J Zhejiang Univ Sci B*, 2018, 19(1): 6-24.
- [26] LAMBIN P, RIOS-VELAZQUEZ E, LEIJENAAR R, et al. Radiomics: Extracting more information from medical images using advanced feature analysis [J]. *Eur J Cancer*, 2012, 48(4): 441-446.
- [27] 王敏, 宋彬, 黄子星, 等. 大数据时代的精准影像医学: 放射组学[J]. *中国普外基础与临床杂志*, 2016, 23(6): 752-755.
- [28] GILLIES RJ, KINAHAN PE, HRICAK H. Radiomics: images are more than pictures, they are data [J]. *Radiology*, 2016, 278(2): 563-577.
- [29] VARGHESE B, CHEN F, HWANG D, et al. Objective risk stratification of prostate cancer using machine learning and radiomics applied to multiparametric magnetic resonance images [J]. *Sci Rep*, 2019, 9(1): 1570.
- [30] 彭涛, 肖建明, 张仕慧, 等. 基于多参数 MRI 及影像组学建立机器学习模型诊断临床显著性前列腺癌[J]. *中国医学影像技术*, 2019, 35(10): 1526-1530.
- [31] 楚蕾, 斯艺, 刘荣波. MRI 纹理分析在识别前列腺导管内癌成分中的价值[J]. *四川大学学报(医学版)*, 2020, 51(1): 42-48.
- [32] ROSSI L, BIJMAN R, SCHILLEMANS W, et al. Texture analysis of 3D dose distributions for predictive modelling of toxicity rates in radiotherapy [J]. *Radiother Oncol*, 2018, 129(3): 548-553.
- [33] 许岗, 赵文露, 李梦娟, 等. MR-T2WI 纹理分析在前列腺癌诊断中初步应用[J]. *医学影像学杂志*, 2019, 29(3): 458-462.
- [34] KUESS P, ANDRZEJEWSKI P, NILSSON D, et al. Association between pathology and texture features of multi parametric MRI of the prostate [J]. *Phys Med Biol*, 2017, 62(19): 7833-7854.
- [35] SIDHU HS, BENIGNO S, GANESHAN B, et al. Textural analysis of multiparametric MRI detects transition zone prostate cancer [J]. *Eur Radiol*, 2017, 27(6): 2348-2358.
- [36] ALGOHARY A, VISWANATH S, SHIRADKAR R, et al. Radiomic features on MRI enable risk categorization of prostate cancer patients on active surveillance: Preliminary findings [J]. *J Magn Reson Imaging*, 2018.
- [37] GIAMBELLUCA D, CANNELLA R, VERNUCCIO F, et al. PI-RADS 3 Lesions: role of prostate mri texture analysis in the identification of prostate cancer [J]. *Curr Probl Diagn Radiol*, 2019. pii: S0363-0188(19)30222-1.
- [38] WANG J, WU CJ, BAO ML, et al. Machine learning-based analysis of MR radiomics can help to improve the diagnostic performance of PI-RADS v2 in clinically relevant prostate cancer [J]. *Eur Radiol*, 2017, 27(10): 4082-4090.
- [39] BARRETT T, TURKBEBY B, CHOYKE PL. PI-RADS version 2: what you need to know [J]. *Clin Radiol*, 2015, 70(11): 1165-1176.
- [40] NKETIAH G, ELSCHOT M, KIM E, et al. T2-weighted MRI-derived textural features reflect prostate cancer aggressiveness: preliminary results [J]. *Eur Radiol*, 2017, 27(7): 3050-3059.
- [41] 张宏江, 毕国力, 李洪亮, 等. MRI 纹理分析评价前列腺癌 Gleason 评分 7 分肿瘤异质性的初步研究[J]. *实用放射学杂志*, 2019, 35(11): 1794-1798.
- [42] 张沥, 张鑫, 王睿, 等. MRI 纹理分析对前列腺癌及 Gleason 分级的诊断价值[J]. *国际医学放射学杂志*, 2019, 42(3): 264-268.
- [43] 范婵媛, 闵祥瑞, QUIBAI LI, 等. 基于 ADC 图的纹理分析在低、高级别前列腺癌诊断中的价值[J]. *中华放射学杂志*, 2019, 53(10): 859-863.
- [44] ORCZYK C, VILLERS A, RUSINEK H, et al. Prostate cancer heterogeneity: texture analysis score based on multiple magnetic resonance imaging sequences for detection, stratification and selection of lesions at time of biopsy [J]. *BJU Int*, 2019, 124(1): 76-86.
- [45] MA S, XIE H, WANG H, et al. MRI-based radiomics signature for the preoperative prediction of extracapsular extension of prostate cancer [J]. *J Magn Reson Imaging*, 2019, 50(6): 1914-1925.
- [46] GNEP K, FARGEAS A, GUTIERREZ-CARVAJAL RE, et al. Haralick textural features on T2-weighted MRI are associated with biochemical recurrence following radiotherapy for peripheral zone prostate cancer [J]. *J Magn Reson Imaging*, 2017, 45(1): 103-117.
- [47] SHIRADKAR R, GHOSE S, JAMBOR I, et al. Radiomic features from pretreatment biparametric MRI predict prostate cancer biochemical recurrence: Preliminary findings [J]. *J Magn Reson Imaging*, 2018, 48(6): 1626-1636.
- [48] ABDOLLAHI H, TANHA K, MOFID B, et al. MRI radiomic analysis of imrt-induced bladder wall changes in prostate cancer patients: a relationship with radiation dose and toxicity [J]. *J Med Imaging Radiat Sci*, 2019, 50(2): 252-260.
- [49] REISCHAUER C, PATZW AHL R, KOH D, et al. Texture analysis of apparent diffusion coefficient maps for treatment response assessment in prostate cancer bone metastases—A pilot study [J]. *Eur J Radiol*, 2018, 101: 184-190.

(收稿日期:2020-03-16)