

孔玲玲, 徐驰杰, 赵旻月, 等. 双能量 CT 虚拟单能量成像在鉴别脊柱急慢性压缩骨折中的应用价值[J]. CT 理论与应用研究, 2021, 30(2): 209-216. DOI:10.15953/j.1004-4140.2021.30.02.08.
KONG L L, XU C J, ZHAO M Y, et al. The application value of dual-energy ct virtual monoenergetic imaging in the differential diagnosis of acute and chronic spinal compression fractures[J]. CT Theory and Applications, 2021, 30(2): 209-216. DOI:10.15953/j.1004-4140.2021.30.02.08. (in Chinese).

双能量 CT 虚拟单能量成像在鉴别脊柱 急慢性压缩骨折中的应用价值

孔玲玲, 徐驰杰, 赵旻月, 邓小毅[✉]

(江苏大学附属澳洋医院影像科, 江苏 苏州 215600)

摘要:目的: 探讨双能量 CT 虚拟单能量成像在鉴别脊柱急慢性压缩骨折中的应用价值。方法: 收集 85 例脊柱压缩性骨折患者行双能量 CT 及 MRI 检查并进行回顾性分析, 其中 50 例急性压缩性骨折 (共 60 个椎体)、35 例慢性压缩性骨折 (共 48 个椎体)。所有病灶椎体均有 MRI 诊断结果作为参照。将双能量 CT 图像数据进行虚拟单能量重建, 分别得到 40~120 keV 的 9 组图像。对双能量 CT 虚拟单能量不同能级图像质量进行评分, 作 Kappa 检验评价观察者间一致性。测量脊柱急慢性压缩骨折椎体在双能量 CT 虚拟单能量不同能级 CT 值, 作 Mann-Whitney *U* 检验比较两者 CT 值之间差异性。通过 ROC 曲线分析虚拟单能量成像不同能级对脊柱急慢性压缩性骨折的鉴别诊断效能。结果: 两名观察者对图像质量主观评估一致性较好 (Kappa = 0.805) 且在虚拟单能量 80 keV 能级下图像质量评分最高。脊柱急慢性椎体在虚拟单能量不同能级下 CT 值之间差异有统计学意义, *P* 值均 < 0.05。ROC 曲线分析显示在 120 keV 时 AUC 值最高为 0.72, 相应敏感性为 86.7%。结论: 相较于常规 CT, 双能量虚拟单能量成像能通过形态学特征及不同能级定量值进行综合评估, 更好地鉴别脊柱急慢性压缩性骨折, 从而帮助指导临床治疗决策及改善患者预后质量。

关键词: 虚拟单能量; 双能量 CT; 能量曲线

DOI:10.15953/j.1004-4140.2021.30.02.08 中图分类号: R 814 文献标志码: A

脊柱压缩性骨折分为急性、慢性, 急性多为创伤或病理性骨折所致, 慢性多为老年性骨质疏松导致, 两者虽然病理成分不同, 但在影像学上均可表现为椎体压缩性改变, 形成“异病同影”, 容易导致误诊而延缓治疗。MRI 被认为是鉴别急慢性压缩性骨折的“金标准”, 但 MRI 检查时间长、禁忌症较多, 在实际使用过程中受到一定限制。

近年来, 双能量 CT 在骨骼肌肉系统的应用越来越广泛^[1-2], 它能通过虚拟单能量成像进行多组单能量图像重建, 在优化图像质量的同时为疾病的诊断提供多参数依据, 通过椎体形态学改变及椎体 CT 值进行定性及定量综合分析, 帮助放射科医生更好地进行鉴别诊断, 从而及时评估患者情况并帮助临床治疗。

本文通过对脊柱急慢性压缩性骨折患者双能量 CT 虚拟单能量成像进行定性及定量分析, 探讨其在脊柱急慢性压缩性骨折中的临床应用价值。

1 资料与方法

1.1 一般资料

收集我院 2017 年 12 月至 2019 年 10 月期间 95 例脊柱压缩性骨折患者。纳入标准:

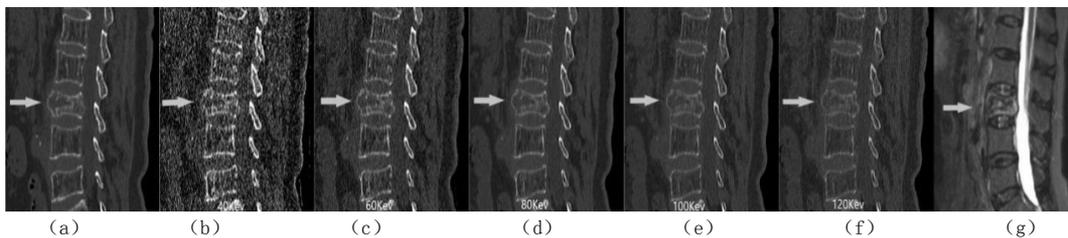
①常规 CT 或者 DR 检查确诊脊柱压缩性骨折的患者，并行 MR 检查；②能顺利完成双能量 CT 扫描。排除标准：①有原发恶性肿瘤病史患者；②严重椎体压缩骨折者（椎体高度低于 4 mm）；③经皮穿刺椎体成形术患者。

1.2 检查方法及参数

使用西门子双源 CT 扫描仪（Somatom Definition Flash dual-source CT）。扫描条件设置：A 球管电压 100 kV，有效电流 250 mAs；B 球管电压 140 kV，有效电流 483 mAs；开启实时管电流调制技术（CARE Dose4D），旋转时间 0.5 s/周，螺距为 0.5。准直器宽度 32×0.6 mm，卷积核值 I70 f，自动重建层厚 1 mm，重建间隔 0.7 mm。将扫描后的两组双能量数据（100 kV 和 140 kV 数据）调入“Dual Energy Syngo Via”软件内，选择“Monoenergetic”进行虚拟单能量重建，得到 40~120 keV（间隔 10 keV）的 9 组单能级图像。

1.3 图像分析

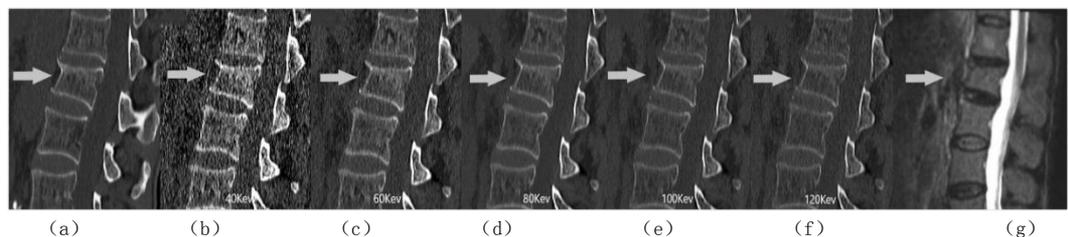
由两名放射科医师（分别具有 5 年和 8 年骨骼肌肉诊断经验）对双能量 CT 虚拟单能量不同能级下的病灶进行主观评分（图 1 和图 2）。评价标准^[3]：病灶椎体解剖学结构清晰，周围结构显示清晰，能精确诊断为 5 分；病灶椎体形态、范围边缘清晰，能进行诊断为 4 分；病灶椎体解剖学结构基本清晰，能基本诊断为 3 分；病灶椎体解剖学结构不清晰，部分图像不能评价，影响诊断为 2 分；病灶椎体解剖学不清晰，不能诊断为 1 分。



注：女性，70 岁，外伤致腰部疼痛不适伴活动受限。(a) 常规 CT 显示图；(b) ~ (f) L3 椎体在虚拟单能量不同能级下（40、60、80、100 和 120 keV）显示图；(g) MRI T₂WI/STIR 序列显示 L3 椎体急性压缩性骨折。

图 1 腰 3 椎体急性压缩性骨折患者

Fig.1 Patients with L3 vertebral body acute compression fracture



注：男性，73 岁，腰背部疼痛。(a) 常规 CT 显示图；(b) ~ (f) L1 椎体在虚拟单能量不同能级下（40、60、80、100 和 120 keV）显示图；(g) MRI T₂WI/STIR 序列显示 L1 椎体慢性压缩性骨折。

图 2 腰 1 椎体慢性压缩性骨折患者

Fig.2 Patients with L1 vertebral body chronic compression fracture

由另一名高年资放射科医师（具有 10 年以上骨骼肌肉诊断经验）测量双能量 CT 虚拟单能量成像不同能级下病灶椎体的 CT 值，勾画感兴趣区（region of interest, ROI），一

般面积为 0.5 cm^2 , 尽量避开边缘骨皮质及硬化区域^[4] (图 3)。

1.4 统计学分析

利用 SPSS 19.0 软件进行统计学分析。作 Kappa 检验评价两名观察者图像质量主观评分的一致性。Kappa 值认为一般为 0.41~0.60、较好为 0.61~0.80 和很好的一致性为 0.81~1.00。使用 Mann-Whitney *U* 检验比较脊柱急慢性压缩骨折 CT 值之间差异性。使用 ROC 曲线分析比较虚拟单能量成像对脊柱急慢性压缩性骨折的鉴别诊断效能。

表 1 虚拟单能量不同能级下图像质量主观评分表
Table 1 Subjective scores of image quality at different levels of virtual monoenergetic imaging

能级/keV	主观评分	
	观察者 A	观察者 B
40	1.00 ± 0.00	1.00 ± 0.00
50	1.17 ± 0.37	1.33 ± 0.69
60	2.73 ± 0.56	2.99 ± 0.87
70	4.09 ± 0.44	4.07 ± 0.77
80	4.99 ± 0.96	4.98 ± 0.52
90	4.98 ± 0.00	4.93 ± 0.25
100	4.96 ± 0.19	4.95 ± 0.21
110	4.46 ± 0.50	4.37 ± 0.49
120	4.00 ± 0.10	3.97 ± 0.44

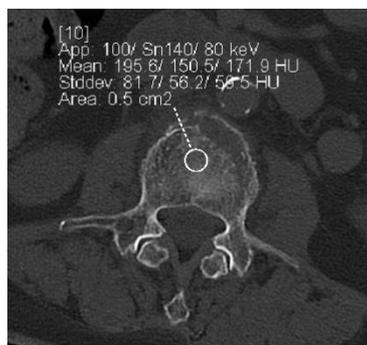


图 3 椎体感兴趣区 ROI 的选取
Fig.3 Selection of ROI of vertebral body

表 2 虚拟单能量不同能级下图像质量主观评分结果
Table 2 Subjective evaluation results of image quality at different levels of virtual monoenergetic imaging

观察者 A	观察者 B/个					合计
	1分	2分	3分	4分	5分	
1分	192	7	4	0	0	203
2分	9	8	14	0	1	32
3分	3	10	59	10	3	85
4分	0	0	21	202	25	248
5分	0	0	1	27	376	404
合计	204	25	99	239	405	972

2 结果

共 95 例完成了双能量 CT 和 MRI 检查, 其中存在严重椎体压缩骨折 8 例、经皮穿刺椎体成形术 2 例, 予以排除 10 例患者。

最终 85 例患者共计 108 个椎体纳入研究。其中, 脊柱慢性压缩性骨折患者 35 例共 48 个椎体, 男性 11 例, 女性 24 例, 年龄 42~95 岁, 平均年龄 (69.4 ± 11.8) 岁; 脊柱急性压缩性骨折患者

50 例共 60 个椎体, 男性 16 例, 女性 44 例, 年龄 33~95 岁, 平均年龄 (62.8 ± 12.7) 岁。

2.1 主观图像质量评估

两名观察者在双能量 CT 虚拟单能量成像对病灶评估一致性很好 ($Kappa = 0.805$), 且在虚拟单能量 80 keV 能级时对病灶主观评分最高, 分别为 4.99 ± 0.96 和 4.98 ± 0.52 (表 1 和表 2)。

2.2 客观 CT 值定量评估

双能量 CT 虚拟单能量不同能级下脊柱急性压缩性骨折的 CT 值明显高于慢性压缩性骨折, 在 60~120 keV 时存在显著统计学差异 ($P < 0.001$) (表 3)。

表 3 虚拟单能量不同能级下脊柱急性慢性压缩性骨折 CT 值差异性分析

Table 3 Differences in CT values of acute and chronic compression fractures of spine at different levels of virtual monoenergetic imaging

能级/keV	压缩性骨折类型		P
	急性 $n = 60$ (95% CI)	慢性 $n = 48$ (95% CI)	
40	238.95 (149.15, 400.40)	164.05 (92.63, 245.73)	0.003
50	179.85 (119.55, 300.75)	116.00 (77.15, 186.35)	0.001
60	148.00 (97.35, 233.55)	91.95 (61.58, 143.85)	< 0.001
70	126.05 (85.83, 196.50)	76.80 (51.03, 119.25)	< 0.001
80	110.95 (77.67, 175.80)	68.25 (37.53, 100.50)	< 0.001
90	99.75 (70.93, 159.63)	61.95 (28.58, 95.25)	< 0.001
100	92.45 (66.68, 144.68)	56.95 (23.45, 87.95)	< 0.001
110	89.50 (63.68, 136.00)	53.35 (19.60, 83.13)	< 0.001
120	87.40 (61.83, 129.83)	50.45 (16.50, 77.48)	< 0.001

ROC 曲线分析显示 120 keV 能级时 AUC 值最高为 0.72, 阈值为 51.45 HU 时, 相应敏感性为 86.7%、特异性为 52.1%, 95% CI 为 0.615~0.817 (表 4 和图 4)。

表 4 虚拟单能量不同能级对脊柱急性慢性压缩性骨折的鉴别诊断效能

Table 4 The diagnostic performance of virtual monoenergetic imaging for acute and chronic spinal compression fractures

能级/keV	鉴别诊断效能				95% CI
	AUC	阈值	敏感性/%	特异性/%	
40	0.668	186.95	68.3	64.6	0.564~0.772
50	0.680	153.90	63.3	72.9	0.576~0.783
60	0.697	114.40	70.4	70.8	0.594~0.800
70	0.701	101.05	70.5	70.8	0.598~0.804
80	0.709	96.65	65.3	72.9	0.607~0.811
90	0.713	52.95	90.5	45.8	0.614~0.814
100	0.715	63.65	80.6	58.3	0.612~0.816
110	0.713	59.50	81.7	56.3	0.614~0.814
120	0.716	51.45	86.7	52.1	0.615~0.817

3 讨论

常规 CT 能很好地描述脊柱压缩性骨折的形态学特征, 在椎体骨皮质中断或发生压缩性改变时对于脊柱压缩性骨折的诊断具有较高敏感性。当患者病史不详或椎体尚未出现明显形态学改变时, 常规 CT 往往不能对两者进行鉴别评估^[6]。

双能量 CT 在骨骼肌肉系统中起着越来越重要的作用^[7-8], 虚拟单能量成像作为新的成像技术, 能通过双能量物质分离算法进行不同物质成分的鉴别^[9]。目前, 虚拟单能量成像已应用于身体各个部位, 比如脑部、肺部、腹部以及脊柱等临床应用^[10-13]。

既往大量研究显示, 双能量虚拟单能量成像在优化图像质量、降低图像噪声、减少辐射剂量及去金属伪影方面具有很高的临床应用价值^[14-16]。虚拟单能量成像通过不同组织在高低能量 X 线下的衰减系数不同, 重建出多组不同单能级图像。低能量的 X 线穿透能力弱, 图像上组织的对比增强使得噪声增高; 高能量的 X 线穿透力强, 图像上组织的硬化伪影减少使得对比减弱, 因此选择最佳单能量水平可以提高单能量图像上病变椎体组织的对比度。

在本研究中主要应用虚拟单能量技术提高图像的对比度、减少线束硬化伪影。相较于常规 CT, 能在描述病变椎体形态学特征的同时对于病灶的 CT 值进行定量评估, 从而更好地帮助放射科医师对脊柱急性慢性压缩性骨折进行鉴别诊断。

本研究主观评估病灶显示在 80 keV 时主观评分最高, 图像质量最好, 能清楚地显示骨折椎体的形态学改变和组织密度变化。既往多项研究报道, 传统 CT 球管产生的是一组混合能量 X 射线, 在穿过人体组织时, 高能量射线比较容易穿透, 而衰减较高的骨质结构等会

吸收较多低能量的 X 射线, 导致射线的平均能量变高、射线束变硬, 产生线束硬化伪影、降低图像质量。而双源 CT 虚拟单能量重建技术在不同单能量下重建的图像能提高图像信噪比, 减少线束硬化伪影。杨帆等^[17]、程国涛等^[18]研究均显示选择 80 keV 时的虚拟单能量图像作为最优的重建图像能降低图像伪影, 同时能提高图像质量, 这与本研究结果一致。

本研究还通过客观 CT 定量值评估发现, 虚拟单能量不同能级下脊柱急性压缩性骨折 CT 值明显高于慢性压缩性骨折, 且在 60~120 keV 区间内差异显著。此外, 虚拟单能量对脊柱急性慢性压缩性骨折的鉴别诊断效能结果显示 120 keV 时拥有更好的鉴别诊断效能, 敏感性可达 86.7%。

我们认为, 这可能是由于急性压缩性骨折内成分混杂, 椎体内出血导致 CT 值增加, 而慢性压缩性骨折多由于骨质疏松引起骨小梁稀疏、骨组织丢失, 导致椎体 CT 值减低。常规 CT 虽然能很好地评估椎体形态学改变情况, 但对于椎体密度值的改变并不敏感。特别是放射科医师在临床实际工作中更多地使用骨窗对病灶椎体进行评估, 而骨窗本身具有较宽的窗宽及窗位, 对于压缩性骨折椎体内 CT 密度值的细微变化更加难以评估^[19]。双能量 CT 虚

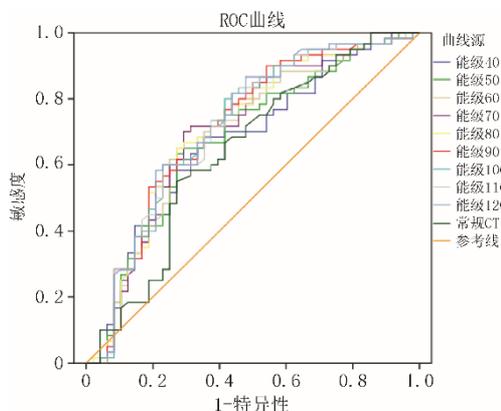


图4 虚拟单能量不同能级鉴别脊柱急性慢性压缩性骨折的 ROC 曲线

Fig. 4 The ROC curves for acute and chronic compression fractures of spine with different levels of virtual monoenergetic imaging

拟单能量成像则能通过高低能扫描进行多组单能级图像重建, 优化图像质量的同时更好的反应两者 CT 值之间差异性。

本研究尚存在局限性。① 研究纳入的样本量较少, 未来有待进一步大样本、多中心研究; ② 病灶椎体不同压缩比和硬化程度对于 CT 定量值的影响并未具体分析; ③ 脊柱单发椎体骨折与多发椎体骨折之间未进行分类处理, 数据存在一定偏倚。

综上所述, 相比于常规 CT, 双能量虚拟单能量成像能通过形态学特征及组织密度值综合分析, 更好地帮助鉴别脊柱急慢性压缩性骨折。当 MRI 检查存在一定临床限制时, 双能量 CT 可以作为可靠的辅助手段, 从而帮助临床医生及时有效地评估患者情况并指导治疗方案。

参考文献

- [1] D'ANGELO T, CICERO G, MAZZIOTTI S, et al. Dual-energy computed tomography virtual monoenergetic imaging: Technique and clinical applications[J]. *British Journal of Radiology*, 2019, 92(1098): 20180546. DOI:10.1259/bjr.20180546.
- [2] OMOUMI P, BECCE F, RACINE D, et al. Dual-energy CT: Basic principles, technical approaches, and applications in musculoskeletal imaging[J]. *Seminars in Musculoskeletal Radiology*, 2015, 19(5): 431-437.
- [3] MATSUMOTO K, JINZAKI M, TANAMI Y, et al. Virtual monochromatic mpectral imaging with fast kilovoltage switching: Improved image quality as compared with that obtained with conventional 120-kVp CT[J]. *Radiology*, 2011, 259(1): 257-262.
- [4] YUE D, RU XIN W, JING C, et al. Virtual monochromatic spectral imaging for the evaluation of vertebral inconspicuous osteoblastic metastases from lung[J]. *Acta Radiologica*, 2017, 58(12): 1485-1492.
- [5] WOO G H, MO G J. Dual-energy CT: New horizon in medical imaging[J]. *Korean Journal of Radiology*, 2017, 18(4): 555-569.
- [6] MCCONNELL C T, WIPPOLD F J, RAY C E, et al. ACR appropriateness criteria management of vertebral compression fractures[J]. *Journal of the American College of Radiology*, 2014, 11(8): 757-763.
- [7] 安鹏, 张晨颖, 张银霞, 等. 双能量 CT 在骨骼肌肉系统病变中的应用[J]. *临床放射学杂志*, 2019, 38(7): 1339-1342.
AN P, ZHANG C Y, ZHANG Y X, et al. Application of dual-energy CT in pathological changes of skeletal muscle system[J]. *Journal of Clinical Radiology*, 2019, 38(7): 1339-1342. (in Chinese).
- [8] MALLINSON P I, COUPAL T M, MCLAUGHLIN P D, et al. Dual-energy CT for the musculoskeletal system[J]. *Radiology*, 2016, 281(3): 690-707.
- [9] Albrecht M H, Vogl T J, Martin S S, et al. Review of clinical applications for virtual monoenergetic dual-energy CT[J]. *Radiology*, 2019, 293(2): 260-271.
- [10] 徐驰杰, 邓小毅, 崔磊. 双能量 CT 成像在脊柱转移瘤中的研究进展[J]. *国际医学放射学杂志*, 2020, 43(1): 83-86.
XU C J, DENG X Y, CUI L. Research advances of dual-energy CT imaging in evaluating spinal metastases[J]. *International Journal of Medical Radiology*, 2020, 43(1): 83-86. (in Chinese).
- [11] CAROTTI M, SALAFFI F, BECI G, et al. The application of dual-energy computed tomography in the diagnosis of musculoskeletal disorders: A review of current concepts and applications[J]. *La Radiologia Medica*, 2019, 124(11): 1175-1183.
- [12] ALBRECHT M H, SCHOLTZ J E, KRISTINA, et al. Advanced image-based virtual monoenergetic dual-energy CT angiography of the abdomen: Optimization of kiloelectron volt settings to improve image contrast[J]. *European Radiology*, 2016, 26(6): 1863-1870.
- [13] KOSMALA A, WENG A M, HEIDEMEIER A, et al. Multiple myeloma and dual-energy CT: Diagnostic accuracy of virtual noncalcium technique for detection of bone marrow infiltration of the spine and pelvis[J]. *Radiology*, 2018, 286: 205-213.

- [14] 王彦懿, 初金刚, 于扬, 等. 双能 CT 单能谱应用对冠脉小内径支架显示的影响[J]. 中国临床医学影像杂志, 2015, 26(6): 400-404, 420.
WANG Y Y, CHU J G, YU Y, et al. Visual improvement for 3 mm or less coronary artery stent imaging by using monoenergetic imaging of dual-energy CT[J]. Chinese Journal of China Clinic Medical Imaging, 2015, 26(6): 400-404, 420. (in Chinese).
- [15] WEINMAN J P, MIRSKY D M, JENSEN A M, et al. Dual energy head CT to maintain image quality while reducing dose in pediatric patients[J]. Clinical Imaging, 2019, 55: 83-88.
- [16] ZHENG S, DONG Y, MIAO Y, et al. Differentiation of osteolytic metastases and Schmorls nodes in cancer patients using dual-energy CT: Advantage of spectral CT imaging[J]. European Journal of Radiology, 2014, 83(7): 1216-1221.
- [17] 杨帆, 曾懿. 双能量 CT 虚拟单能谱成像技术在 TIPS 术后支架评估中的应用[J]. 中国中西医结合影像学杂志, 2019, 17(3): 266-268.
YANG F, ZENG Y. Application of monochromatic imaging in postoperative evaluation of the patients with TIPS using dual energy CT[J]. Chinese Imaging Journal of Integrated Traditional and Western Medicine, 2019, 17(3): 266-268. (in Chinese).
- [18] 程国涛, 杨涛, 孔曙兵, 等. 双源 CT 虚拟新单能量重建技术在肝癌经导管动脉化疗栓塞术后的应用价值[J]. 中国全科医学, 2019, 22(30): 3736-3741.
CHENG G T, YANG T, KONG S B, et al. Value of advanced virtual monoenergetic reconstruction technique in dualenergy CT for evaluating TACE efficacy in hepatocellular carcinoma[J]. Chinese General Practice, 2019, 22(30): 3736-3741. (in Chinese).
- [19] PUMBERGER M, FUCHS M, ENGELHARD N, et al. Disk injury in patients with vertebral fractures: A prospective diagnostic accuracy study using dual-energy computed tomography[J]. European Radiology, 2019, 29(8): 4495-4502.

The Application Value of Dual-Energy CT Virtual Monoenergetic Imaging in the Differential Diagnosis of acute and Chronic Spinal Compression Fractures

KONG Lingling, XU Chijie, ZHAO Minyue, DENG Xiaoyi✉

(Department of Radiology, Jiangsu University Affiliated Aoyang Hospital, Suzhou 215600, China)

Abstract: Objective: To explore the value of dual-energy CT virtual monoenergetic imaging in the differential diagnosis of acute and chronic spinal compression fractures. Methods: A total of 85 patients with spinal compression fractures were underwent DECT examination and retrospective analyzed, including 50 acute spinal compression fractures (60 vertebral bodies) and 35 chronic spinal compression fractures (48 vertebral bodies). All lesions were diagnosed by surgical pathology or clinical follow-up. The dual-energy CT virtual monoenergetic images were reconstructed into 9 groups (40~120 keV). Two radiologists scored the image quality of the dual energy CT virtual monoenergetic imaging at different energy levels. Kappa test was used to evaluate the consistency between observers. A senior radiologist measured the CT values of spinal vertebral bodies with acute and chronic compression fractures under different energy levels of dual-energy CT virtual monoenergetic imaging. The Mann-Whitney U test was used to compare the differences between CT values. The ROC curve was used to analyze the differential diagnostic performance of virtual monoenergetic imaging for acute and chronic spinal compression fractures. Results: The subjective assessment of image quality between the two observers was consistent (Kappa = 0.805), and the image quality score was highest at 80 keV virtual monoenergetic level. There were statistically significant differences in CT values between spinal acute and chronic vertebral bodies at different levels of virtual monoenergetic imaging, with P values < 0.05. ROC curve analysis showed that the highest AUC value at 120 keV was 0.72, and the

corresponding sensitivity was 86.7%. Conclusion: Compared with conventional CT, dual-energy virtual single-energy imaging can perform qualitative and quantitative comprehensive evaluation through morphological features and CT values. It can better identify acute and chronic compression fractures of the spine, which can help guide clinical treatment decisions and improve patient prognosis.

Keywords: virtual monoenergetic; dual-energy CT; energetic curve



作者简介: 孔玲玲 (1983—), 女, 江苏大学附属澳洋医院影像科主管技师, 主要从事医学影像技术工作, TEL: 13915687573, E-mail: 77548203@qq.com; 邓小毅[✉] (1976—), 男, 江苏大学附属澳洋医院主任医师, 主要从事医学影像诊断工作, TEL: 13921956545, E-mail: 13921956545@163.com。