

临床研究

DOI:10.13406/j.cnki.cxyb.003436

双能量CT非线性融合和噪声优化的虚拟单能量图像技术在喉鳞状细胞癌中的应用

何长久¹, 刘杰克¹, 青浩渺¹, 郭玲¹, 胡仕北¹, 周鹏¹, 何乐民²

(1. 四川省肿瘤临床医学研究中心, 四川省肿瘤医院·研究所, 四川省癌症防治中心, 电子科技大学附属肿瘤医院影像科, 成都 610041; 2. 山东第一医科大学放射学院, 泰安 271000)

【摘要】目的: 探讨双能量CT线性融合图像(linear blending imaging, LBI)、非线性融合图像(nonlinear blending image, NBI)和噪声优化的虚拟单能量图像(noise-optimized virtual monoenergetic image, VMI+)技术在喉鳞状细胞癌中的应用价值。方法: 回顾性分析2019年6月至2022年3月61例经病理证实为喉鳞状细胞癌患者的双能量CT资料。双能量图像采用LBI[融合系数为1(80 kV)和0.6(M0.6)]、NBI和VMI+(40 keV、55 keV)技术重建。比较5组图像的客观图像质量[对比噪声比(contrast-to-noise ratio, CNR)、肿瘤CT值、噪声]和主观图像质量(肿瘤边界评分和整体图像质量评分)。结果: 40 keV的CNR、肿瘤CT值和肿瘤边界评分均明显高于80 kV、M0.6、NBI和55 keV, 差异均有统计学意义(均P<0.05)。NBI的整体图像质量评分明显高于80 kV、M0.6、40 keV和55 keV, 差异均有统计学意义(均P<0.05)。NBI的噪声明显低于80 kV、40 keV和55 keV, 差异均有统计学意义(均P<0.05)。结论: 在喉鳞状细胞癌的双能量CT中, 采用VMI+技术(40 keV)能提供更好的CNR、肿瘤CT值和肿瘤边界, 采用NBI技术能提供更低的噪声和更好的整体图像质量。

【关键词】双能量CT; 喉鳞状细胞癌; 非线性融合图像; 噪声优化的虚拟单能量图像

【中图分类号】R814

【文献标志码】A

【收稿日期】2023-03-25

Application of dual-energy CT nonlinear blending and noise-optimized virtual monoenergetic imaging in laryngeal squamous cell carcinoma

He Changjiu¹, Liu Jieke¹, Qing Haomiao¹, Guo Ling¹, Hu Shibe¹, Zhou Peng¹, He Lemin²

(1. Department of Radiology, Sichuan Clinical Research Center for Cancer, Sichuan Cancer Hospital & Institute, Sichuan Cancer Center, Cancer Hospital Affiliated to University of Electronic Science and Technology of China; 2. Department of Radiology, Shandong First Medical University)

【Abstract】**Objective:** To investigate the application value of dual-energy CT(DECT) linear blending imaging(LBI), nonlinear blending imaging(NBI), and noise-optimized virtual monoenergetic imaging(VMI+) techniques in laryngeal squamous cell carcinoma(SCC). **Methods:** A retrospective analysis was performed for the DECT data of 61 patients with pathologically confirmed laryngeal SCC from June 2019 to March 2022. DECT images were reconstructed using LBI with weighting factors 1(80 kV) and 0.6(M0.6), NBI, and VMI+(40 keV and 55 keV) techniques. The five groups of images were compared in terms of objective image quality [contrast-to-noise ratio (CNR), tumor CT value, and noise] and subjective image quality (tumor delineation score and overall image quality score). **Results:** The 40 keV images had significantly higher CNR, tumor CT value, and tumor delineation score than 80 kV, M0.6, NBI, and 55 keV images (all P<0.05). The NBI images had a significantly higher overall image quality score than the 80 kV, M0.6, 40 keV, and 55 keV images (all P<0.05). The NBI images had a significantly lower noise than the 80 kV, 40 keV, and 55 keV images (all P<0.05). **Conclusion:** In DECT for laryngeal SCC, the VMI+(40 keV) technique can provide images with better CNR, tumor CT value, and tumor delineation, while the NBI technique can provide images with lower noise and better overall image quality.

作者介绍: 何长久, Email: 634825053@qq.com,

研究方向: 医学影像技术。

通信作者: 何乐民, Email: lmhe@sdfmu.edu.cn。

基金项目: 四川省科技计划资助项目(编号: 2021YFS0225、2021YFS0075); 成都市科技计划资助项目(编号: 2021-YF05-01507-SN); 北京医学奖励基金资助项目(编号: YXJL-2022-0105-0143); 山东省研究生教育教学改革研究资助项目(编号: SDYJG21161); 山东省自然科学基金面上资助项目(编号: ZR2022MH226)。

优先出版: <https://link.cnki.net/urlid/50.1046.R.20240206.1107.036>
(2024-02-09)

作者介绍: 何长久, Email: 634825053@qq.com,
研究方向: 医学影像技术。
通信作者: 何乐民, Email: lmhe@sdfmu.edu.cn。
基金项目: 四川省科技计划资助项目(编号: 2021YFS0225、2021YFS0075); 成都市科技计划资助项目(编号: 2021-YF05-01507-SN); 北京医学奖励基金资助项目(编号: YXJL-2022-0105-0143); 山东省研究生教育教学改革研究资助项目(编号: SDYJG21161); 山东省自然科学基金面上资助项目(编号: ZR2022MH226)。

【Key words】dual-energy CT; laryngeal squamous cell carcinoma; nonlinear blending imaging; noise-optimized virtual monoenergetic imaging

喉鳞状细胞癌是头颈部比较常见的恶性肿瘤。近年来,喉鳞状细胞癌的发病率有明显上升趋势^[1]。双能量 CT 在头颈部鳞状细胞癌的成像中可以获得与单能量 CT 相当的图像质量,同时明显降低受检者的辐射剂量^[2]。双能量 CT 包含多种后处理技术,如线性融合图像(linear blending image, LBI)、非线性融合图像(nonlinear blending image, NBI)和噪声优化的虚拟单能量图像(noise-optimized virtual monoenergetic image, VMI+)技术^[3-4]。既往研究发现,LBI 中融合系数 1(80 kV)和 0.6(M0.6)较融合系数 0.3 均能提高头颈部鳞状细胞癌的图像质量^[5-6]。此外,NBI 较 LBI 技术也能明显提高头颈部鳞状细胞癌的图像质量^[4]。还有研究显示,VMI+ 技术较 LBI 能明显提高头颈部鳞状细胞癌的图像质量^[3]。但鲜有研究同时比较 LBI、NBI 和 VMI+ 技术在喉鳞状细胞癌中的图像质量。因此,本研究主要探讨双能量 CT 的 NBI 和 VMI+ 技术在喉鳞状细胞癌中的应用价值。

1 资料与方法

1.1 研究对象

回顾性收集 2019 年 6 月至 2022 年 3 月于四川省肿瘤医院经病理证实为喉鳞状细胞癌的 61 例受检者。其中,男 58 例,女 3 例,年龄 43~80 岁,平均(60.97 ± 7.61)岁,体质指数(body mass index, BMI)15.63~31.80 kg/m²,平均(22.76 ± 3.47)kg/m²。纳入标准:患者经活检或手术病理证实为喉鳞状细胞癌;患者进行颈部双能量 CT 增强检查。排除标准:受检者患有严重肝肾功能不全或心功能不全;受检者对碘对比剂过敏;图像有明显的运动或金属伪影。所有患者均在双能量 CT 检查后 3 周内完成活检或手术。所有参加研究的受检者均签署知情同意书。

1.2 方法

1.2.1 CT 检查 采用西门子二代双源 CT(Somatom Definition Flash)行颈部双能量 CT 增强扫描。扫描参数:管电压 80/Sn140 kV,参考管电流 228/114 mA,螺距 0.9,转速 0.28 s/转,准直器宽度 64 mm × 0.6 mm,开启自动管电流(CARE Dose 4D)。经肘正中静脉以 2.5 mL/s 的流率注射非离子型对比剂碘普罗胺 60 mL(拜耳公司,370 mgI/mL),在开始注射对比剂 55 s 后开始扫描。

1.2.2 图像后处理 扫描结束后重建 LBI 图像,其中,线性融合系数为 0.6(M0.6,由 60% 的 80 kV 和 40% 的 140 kV 数据融合而成)和 1(80 kV)。并在西门子后处理工作站(Syngo Via VB10)重建 NBI 图像和 VMI+ 图像。其中,NBI 图像采用设备默认参数(blending center = 150 HU, blending width=200 HU)重建;VMI+ 图像采用 40 keV、55 keV 重建。其余重建参数:SAFIRE 迭代重建算法(strength level 3),卷积核 I30f,矩阵

512 × 512,FOV 250 mm × 250 mm,重建层厚 3 mm,重建间隔 3 mm。共获得 5 组双能量图像纳入分析(80 kV、M0.6、NBI、40 keV 和 55 keV)。

1.2.3 图像质量主观评分 由 2 名影像主治医师在软组织窗(窗宽 350 HU,窗位 50 HU)图像上采用 5 分法(双盲法)评价肿瘤边界和颈部整体图像质量^[7],如评分不一致,则请 1 名副主任医师综合分析确定最终得分。肿瘤边界评分标准为:1 分,肿瘤边界不可见;2 分,肿瘤边界显示差;3 分,肿瘤边界显示一般,可满足临床诊断要求;4 分,肿瘤边界显示好;5 分,肿瘤边界显示非常好。颈部整体图像质量评分标准为:1 分,整体图像质量不能满足诊断要求;2 分,整体图像质量不佳;3 分,整体图像质量一般,能满足诊断要求;4 分,整体图像质量好;5 分,整体图像质量非常好。

1.2.4 图像质量客观评价 分别测量肿瘤的 CT 值($CT_{\text{肿瘤}}$)、同侧胸锁乳突肌的 CT 值($CT_{\text{胸锁乳突肌}}$)和胸锁乳突肌 CT 值的标准差($SD_{\text{胸锁乳突肌}}$)。取胸锁乳突肌 CT 值的标准差为背景噪声。测量时感兴趣区(region of interest, ROI)置于病灶中心,大小约为病变的 80%,尽量避开肿瘤坏死、出血区域。计算肿瘤组织的对比噪声比(contrast-to-noise ratio, CNR), $CNR = (CT_{\text{肿瘤}} - CT_{\text{胸锁乳突肌}}) / SD_{\text{胸锁乳突肌}}$ ^[8]。

1.2.5 病灶范围诊断符合率 选择主观图像质量中肿瘤边界评分最高的双能量 CT 后处理技术,并用该后处理技术评估喉鳞状细胞癌病灶范围。以术中所见和术后的病理结果(对病灶范围的描述)作为金标准,计算该后处理技术对喉鳞状细胞癌病灶范围的诊断符合率。

1.2.6 辐射剂量 记录每位受检者的容积 CT 剂量指数(volume CT dose index, CTDI_{vol})和剂量长度乘积(dose length product, DLP),计算有效剂量(effective dose, ED)。 $ED = k \times DLP$,式中, $k = 0.0051 \text{ mSv} \cdot \text{mGy}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ ^[9]。

1.3 统计学方法

采用 SPSS 26.0 软件完成统计分析。采用 Kolmogorov-Smirnov 法检验计量资料是否符合正态分布,符合正态分布的计量资料以均数 ± 标准差($\bar{x} \pm s$)表示;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。采用单因素方差分析比较 5 组客观图像质量间的差异,如差异有统计学意义,则结合 Least Significant Difference 法进行组内两两比较。采用非参数 Friedman 检验比较 5 组主观评分间的差异,如差异有统计学意义,则结合 Wilcoxon 法进行组内两两比较。检验水准 $\alpha=0.05$ 。

2 结 果

2.1 辐射剂量

患者 CTDI_{vol} 为 6.44~8.58 mGy,平均(7.48 ± 0.33)mGy,DLP 为 156.50~250.90 mGy·cm,平均(206.46 ± 20.77)mGy·cm,ED 为 0.80~1.28 mSv,平均(1.05 ± 0.11) mSv。

2.2 客观图像质量

LBI、NBI 和 VMI+ 的 CNR、肿瘤 CT 值、噪声值差异均有统计学意义(均 $P < 0.001$)。其中,40 keV 的 CNR 最高,且明

显高于 80 kV、M0.6、NBI 和 55 keV, 差异均有统计学意义(均 $P<0.05$)。40 keV 的肿瘤 CT 值最高, 且明显高于 80 kV、M0.6、NBI 和 55 keV, 差异均有统计学意义(均 $P<0.05$)。NBI 的噪声值最低, 且明显低于 80 kV、40 keV 和 55 keV, 差异均有统计学意义(均 $P<0.05$), NBI 的噪声值与 M0.6 相比, 差异无统计学意义($P=0.964$)。见表 1 和图 1。

2.3 主观图像质量

LBI、NBI 和 VMI+ 的肿瘤边界评分和整体图像质量评分差异均有统计学意义(均 $P<0.001$)。其中, 40 keV 的肿瘤边界评分最高, 且明显高于 80 kV、M0.6、NBI 和 55 keV, 差异均

有统计学意义(均 $P<0.05$)。NBI 的整体图像质量评分最高, 且明显高于 80 kV、M0.6、40 keV 和 55 keV, 差异均有统计学意义(均 $P<0.05$)。见表 1、图 2 和图 3。

2.4 40 keV 评估病灶范围的诊断符合率

本研究中共 50 例受检者接受手术治疗。因为在主观图像质量的评估中, 40 keV 的肿瘤边界评分最高, 因此, 本文采用 40 keV 评估喉鳞状细胞癌的病灶范围。以术中所见和手术后的病理结果(对病灶范围的描述)作为金标准, 40 keV 评估喉鳞状细胞癌病灶范围的诊断符合率为 78%(39/50)。

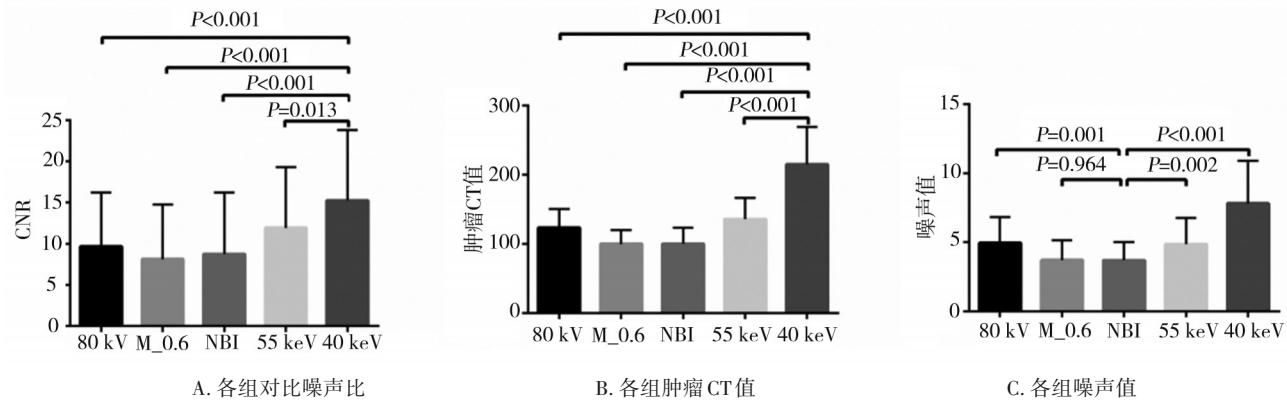


图 1 各组客观图像质量的比较

表 1 各组间客观图像质量和主观图像质量的比较($\bar{x} \pm s; M_d(P_{25}, P_{75})$)

组别	客观图像质量			主观图像质量	
	CNR	肿瘤 CT 值/HU	噪声值/HU	肿瘤边界评分	整体图像质量评分
80 kV 组	9.67 ± 6.56^a	123.39 ± 27.01^a	4.95 ± 1.88^b	4(3,4) ^a	4(3,4) ^b
M0.6 组	8.13 ± 6.65^a	100.15 ± 20.32^a	3.72 ± 1.44	2(2,3) ^a	5(4,5) ^b
NBI 组	8.77 ± 7.43^a	100.48 ± 22.83^a	3.70 ± 1.30	3(2,3) ^a	5(4,5)
55 keV 组	11.92 ± 7.36^a	135.85 ± 30.95^a	4.87 ± 1.91^b	4(3,4) ^a	4(3,4) ^b
40 keV 组	15.25 ± 8.55	215.25 ± 54.19	7.82 ± 3.09^b	5(4,5)	3(2,3) ^b
F/χ^2 值	9.494	123.228	41.970	236.975	229.935
P 值	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001

注: a, 与 40 keV 组比较, $P<0.05$; b, 与 NBI 组比较, $P<0.05$

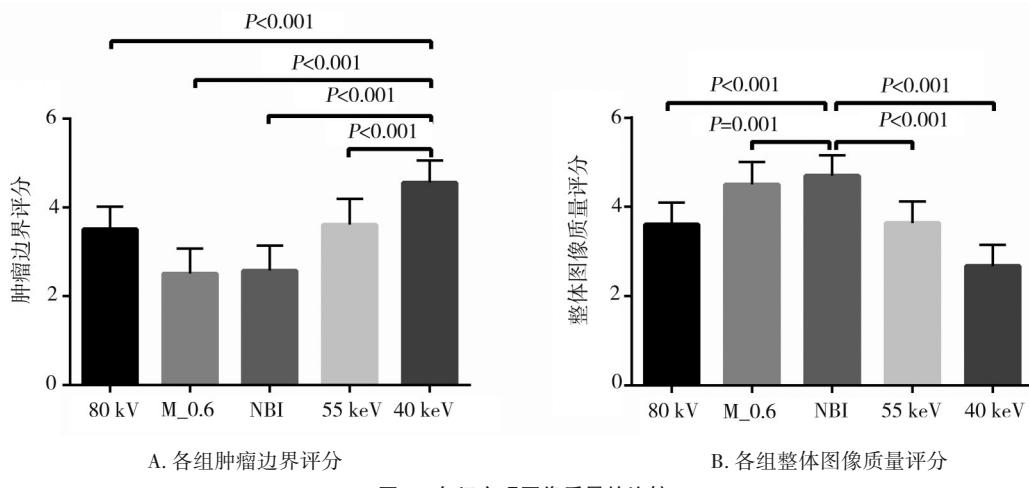
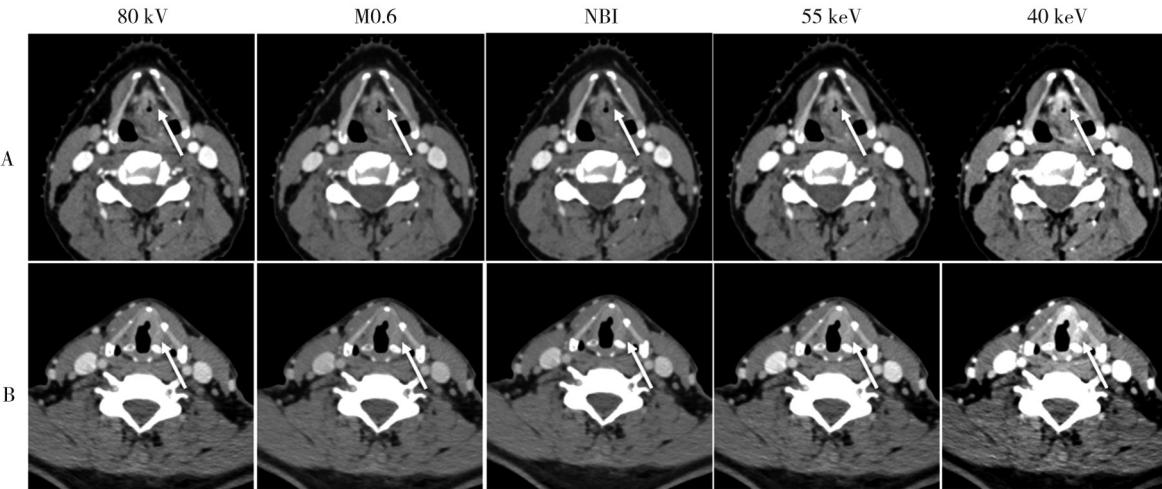


图 2 各组主观图像质量的比较



注:A,患者男,52岁,双侧声带鳞状细胞癌;B,患者男,52岁,左侧喉鳞状细胞癌,累及前联合

图3 喉鳞状细胞癌的双能量CT图像

3 讨 论

本研究对比双能量 CT 的 LBI(80 kV、M0.6)、NBI 和 VMI+(40 keV、55 keV) 重建技术在喉鳞状细胞癌中的客观图像质量和主观图像质量。结果显示,在喉鳞状细胞癌的双能量 CT 中, VMI+ 技术的 40 keV 能提供更好的 CNR、肿瘤 CT 值和肿瘤边界评分,且明显高于 LBI(80 kV、M0.6)、NBI 和 55 keV;而 NBI 技术能提供更好的整体图像质量评分,且明显高于 LBI(80 kV、M0.6) 和 VMI+(40 keV、55 keV);NBI 技术能提供更低的噪声,且明显低于 80 kV、40 keV 和 55 keV。这说明双能量 CT 的 VMI+(40 keV) 和 NBI 技术在喉鳞状细胞癌中具有重要的价值,可作为首选的后处理技术。

与常规单能量 CT 相比,双能量 CT 可通过强大的后处理技术明显提高头颈部鳞状细胞癌的图像质量,提高病灶对比度,降低受检者的辐射剂量^[2,10]。在双能量 CT 的线性融合技术中,融合系数 0.3 (M0.3) 的 LBI 图像常被用于模拟常规 120 kV 扫描的图像^[7],而采用 80 kV 或 M0.6 较 M0.3 均能明显提高头颈部肿瘤的客观图像质量和主观图像质量^[5-6]。Scholtz JE 等^[4]比较 NBI 和 LBI 技术在头颈部鳞状细胞癌患者中的图像质量,结果显示 NBI 在肿瘤边界和优化图像质量方面均优于 LBI 技术。此外,May MS 等^[7]应用 VMI+ 技术评价头颈部鳞状细胞癌患者图像质量,结果显示 40 keV 的 CNR、肿瘤边界和整体图像质量明显高于 60 keV 和 M0.3。Albrecht MH 等^[11]研究比较 40 keV、55 keV、70 keV 和 M0.3 在头

颈部鳞状细胞癌中的应用,结果显示 40 keV 提供最高的肿瘤 CT 值、CNR,而 55 keV 提供更高的主观图像质量。然而,之前的研究大多比较 NBI 和 LBI(或者 VMI+ 和 LBI)在头颈部鳞状细胞癌中的应用,很少有研究同时比较双能量 CT 的 LBI(80 kV、M0.6)、NBI 和 VMI+(40 keV、55 keV) 技术在喉鳞状细胞癌中的图像质量。

由于喉的结构复杂、所在空间狭小,这常导致喉鳞状细胞癌肿瘤边界显示不清,影响肿瘤浸润程度的评估和分期。优质的图像质量和清晰的肿瘤边界对于准确评估喉鳞状细胞癌的大小及周围浸润至关重要。本文研究显示,与 LBI(80 kV、M0.6) 和 VMI+(40 keV、55 keV) 技术相比,NBI 技术提供最低的图像噪声和更好的整体图像质量。之前的研究也发现,与 VMI+ 或 LBI 技术相比,NBI 能明显提高胰腺癌或肾脏肿瘤的整体图像质量^[12-13]。这可能是因为 NBI 技术根据每个像素的 CT 值得到不同能量混合比例的图像,CT 值高的像素点融合更多低压信号使图像对比度增加,而 CT 值低的像素点融合更多高压信号使图像噪声降低^[14]。因此,NBI 图像同时获得了低能量图像中的高对比度和高能量图像中的低噪声^[15]。此外,本研究中 VMI+ 的 40 keV 提供了更好的 CNR、肿瘤 CT 值和肿瘤边界,且明显优于 LBI(80 kV、M0.6)、NBI 和 55 keV,差异均有统计学意义。这与之前对肺癌的研究结果类似^[16]。这可能是因为本研究中 VMI+ 的 40 keV 能级水平接近碘的 k 边缘(33.2 keV),提高碘的衰减率,从而增加肿瘤与周围组织的对比度^[17]。因此,在喉鳞状细胞

瘤的双能量 CT 后处理技术中,采用 VMI+(40 keV)结合 NBI 可能有助于提高图像质量,本文中采用 VMI+(40 keV)评估喉鳞状细胞癌病灶范围的诊断符合率为 78%。

本文的局限性在于:样本量偏少,在今后可纳入更多的喉鳞状细胞癌患者进行双能量 CT 研究;男性患者明显多于女性,这可能与喉鳞状细胞癌男性发病率明显高于女性有关,其结果是否受性别的影响尚不明确;仅采用一种双能量扫描方案(80/Sn140 kV),其他双能量扫描方案的重建技术能否进一步提高图像质量尚需研究;LBI 技术仅重建 80 kV 和 M0.6 的图像,NBI 技术仅重建机器默认的参数,而 VMI+ 技术仅重建 40 keV 和 55 keV 的图像,在后续研究中可探讨这些重建技术的其他参数能否进一步提高喉鳞状细胞癌的图像质量。

综上所述,在喉鳞状细胞癌的双能量 CT 成像中,采用 VMI+ 技术(40 keV)能提供更好的 CNR、肿瘤 CT 值和肿瘤边界,采用 NBI 技术能提供更低的图像噪声和更好的整体图像质量。

参 考 文 献

- [1] 雷大鹏,潘新良. 中晚期喉癌的治疗选择[J]. 中华耳鼻咽喉头颈外科杂志,2019,54(5):398-400.
- Lei DP, Pan XL. Treatment options for advanced laryngeal carcinoma[J]. Chin J Otorhinolaryngol Head Neck Surg, 2019, 54(5):398-400.
- [2] Suntharalingam S, Stenzel E, Wetter A, et al. Third generation dual-energy CT with 80/150 Sn kV for head and neck tumor imaging[J]. Acta Radiol, 2019, 60(5):586-592.
- [3] Zopfs D, Lennartz S, Große Hokamp N, et al. Head and neck squamous cell carcinoma: evaluation of iodine overlay maps and low-energy virtual mono-energetic images acquired with spectral detector CT[J]. Clin Radiol, 2022, 77(6):e425-e433.
- [4] Scholtz JE, Hüters K, Kaup M, et al. Non-linear image blending improves visualization of head and neck primary squamous cell carcinoma compared to linear blending in dual-energy CT[J]. Clin Radiol, 2015, 70(2):168-175.
- [5] Kraft M, Ibrahim M, Spector M, et al. Comparison of virtual monochromatic series, iodine overlay maps, and single energy CT equivalent images in head and neck cancer conspicuity[J]. Clin Imaging, 2018, 48: 26-31.
- [6] Scholtz JE, Kaup M, Kraft J, et al. Objective and subjective image quality of primary and recurrent squamous cell carcinoma on head and neck low-tube-voltage 80-kVp computed tomography[J]. Neuroradiology, 2015, 57(6):645-651.
- [7] May MS, Wiesmueller M, Heiss R, et al. Comparison of dual- and single-source dual-energy CT in head and neck imaging[J]. Eur Radiol, 2019, 29(8):4207-4214.
- [8] Tawfik AM, Kerl JM, Bauer RW, et al. Dual-energy CT of head and neck cancer: average weighting of low- and high-voltage acquisitions to improve lesion delineation and image quality-initial clinical experience[J]. Invest Radiol, 2012, 47(5):306-311.
- [9] Deak PD, Smal Y, Kalender WA. Multisection CT protocols: sex- and age-specific conversion factors used to determine effective dose from dose-length product[J]. Radiology, 2010, 257(1):158-166.
- [10] Bahig H, Lapointe A, Bedwani S, et al. Dual-energy computed tomography for prediction of loco-regional recurrence after radiotherapy in larynx and hypopharynx squamous cell carcinoma[J]. Eur J Radiol, 2019, 110:1-6.
- [11] Albrecht MH, Scholtz JE, Kraft J, et al. Assessment of an advanced monoenergetic reconstruction technique in dual-energy computed tomography of head and neck cancer[J]. Eur Radiol, 2015, 25(8): 2493-2501.
- [12] Ascenti G, Krauss B, Mazzotti S, et al. Dual-energy computed tomography (DECT) in renal masses: nonlinear versus linear blending[J]. Acad Radiol, 2012, 19(10):1186-1193.
- [13] He YL, Zhang DM, Xue HD, et al. Clinical value of dual-energy CT in detection of pancreatic adenocarcinoma: investigation of the best pancreatic tumor contrast to noise ratio[J]. Chung Kuo I Hsueh K'o Hsueh Tsa Chih, 2013, 27(4):207-212.
- [14] 余甲乐,刘 峰,邢 杰,等. 低管电压联合低剂量对比剂在头颈部 CT 血管成像中的应用[J]. 中国医学影像学杂志,2022,30(4): 327-332.
- Yu JL, Liu F, Xing J, et al. Application of low tube voltage combined with low dose contrast medium in head and neck CT angiography[J]. Chin J Med Imag, 2022, 30(4):327-332.
- [15] 胡洁婷,何 花,李雪霜,等. 评价双能量 CT 非线性融合技术对肾癌诊断的影响[J]. 中国医学计算机成像杂志,2020, 26(2): 135-139.
- Hu JT, He H, Li XS, et al. Evaluating the effect of DECT nonlinear blending technique on the diagnosis of renal cell carcinoma[J]. Chin Comput Med Imag, 2020, 26(2):135-139.
- [16] Sekiguchi T, Ozawa Y, Hara M, et al. Visibility of the hilar lymph nodes using advanced virtual monoenergetic low-keV images for preoperative evaluation of lung cancer[J]. Br J Radiol, 2019, 92 (1103) : 20180734.
- [17] 高钦宗,王志伟,齐亚飞,等. 双层探测器能谱 CT 虚拟单能量成像在兔 VX2 肝癌模型微小病灶检测中的价值[J]. 中国医学科学院学报,2018,40(5):651-655.
- Gao QZ, Wang ZW, Qi YF, et al. Monoenergetic reconstructions using detector-based spectral CT for imaging of small lesions in the rabbit VX2 liver cancer models[J]. Acta Acad Med Sin, 2018, 40(5):651-655.

(责任编辑:周一青)