

不同剂量 CT 联合不同模型图像重建算法在肺结节筛查中图像质量对比

马啸天, 贾 祯, 栗鸿宝

(新乡市中心医院 CT 室, 河南 新乡 453000)

[摘要] 目的: 探讨不同剂量 CT 联合不同模型图像重建算法在肺结节筛查中的图像质量。方法: 选取 2022 年 1 月—2024 年 5 月于新乡市中心医院进行治疗的肺结节患者 120 例, 分别对患者开展低剂量 CT 以及极低剂量 CT 扫描, 低剂量扫描条件为管电压 120 kV、电流 30 mA, 极低剂量扫描条件为管电压 120 kV、电流 10 mA。采用 64 排螺旋 CT 扫描, 并对患者的影像学图像进行滤波反投影重建 (FBP)、全模型迭代重建 (IMR) 以及 iDose 重建。比较不同剂量 CT 联合不同模型图像重建算法对肺结节患者扫描的主观质量、客观质量、空间分辨率、密度分辨率、图像均匀性之间的差异。结果: 在对患者的扫描过程中, 在 FBP、IMR 模式下, 低剂量组以及极低剂量组患者的低对比分辨率 (LCD)、图像失真 (ID)、诊断信心 (DC) 之间的差异无统计学意义 ($P>0.05$), 在 iDose 模式下, 极低剂量组患者的 LCD、ID、DC 低于低剂量组 ($P<0.05$), 在 FBP、IMR 以及 iDose 模式下, 极低剂量组患者的 CT 值 ($t=301.143, 340.289, 487.821, P<0.05$)、标准差 (SD) 值 ($t=306.827, 344.055, 278.394, P<0.05$) 低于低剂量组, 信噪比 (SNR) ($t=92.062, 99.698, 135.266, P<0.05$)、对比噪声比 (CNR) ($t=41.755, 45.244, 32.220, P<0.05$) 高于低剂量组, FBP、IMR 以及 iDose 模式下, 在 Routine、Soft 及 SharpPlus 3 种参数下, 极低剂量组的空间分辨率、密度分辨率、图像均匀性优于低剂量组。结论: 极低剂量的 CT 扫描联合 IMR 的图像主观质量与其他模式差异较小, 但其客观质量、空间分辨率、密度分辨率、图像均匀性均得到明显改善。

[关键词] 肺肿瘤; 体层摄影术; X 线计算机

[中图分类号] R734.2; R814.42

[文献标识码] A

[文章编号] 1008-1062(2025)03-0189-05

DOI:10.12117/jccmi.2025.03.008

Comparison of image quality in lung nodule screening using different doses of CT combined with image reconstruction algorithms for various models

MA Xiao-tian, JIA Zhen, LI Hong-bao

(Department of CT, Xinxiang Central Hospital, Xinxiang Henan 453000, China)

Abstract: Objective: To explore the image quality of lung nodule screening using different doses of CT combined with image reconstruction algorithms for various models. **Methods:** This prospective study selected 120 patients with pulmonary nodular diagnosed and treated at Xinxiang Central Hospital from January 2022 to May 2024 as the study objects. Low-dose CT and ultra low-dose CT scans were performed on the patients respectively. The scanning conditions of the low-dose were 120 kV and the current was 30 mA, while the scanning conditions of the ultra low-dose were 120 kV and the current was set to 10 mA. In the process of scanning the above images of the patient by 64-slice spiral CT scan, the imaging of the patient was reconstructed by FBP, IMR and iDose respectively. To compare the differences between the subjective quality, objective quality, spatial resolution, density resolution and uniformity of imaging images of patients with pulmonary nodules with different doses of CT combined with image reconstruction algorithms for different models. **Results:** In the scanning process of patients, under the FBP and IMR modes, there was no statistically significant difference between the LCD, ID and DC of patients in the low-dose group and the ultra low-dose group ($P>0.05$). Under the iDose mode, the scores of LCD, ID and DC of patients in the ultra low-dose group were lower than those in the low-dose group ($P<0.05$). Under the FBP, IMR and iDose modes, CT values ($t=301.143, 340.289, 487.821, P<0.05$) and SD values ($t=306.827, 344.055, 278.394, P<0.05$) in the ultra low dose group were lower than those in the low dose group. SNR ($t=92.062, 99.698, 135.266, P<0.05$), CNR ($t=41.755, 45.244, 32.220, P<0.05$) were higher than those in low-dose group, FBP, IMR and iDose mode, under Routine, Soft and SharpPlus parameters, the spatial resolution, density resolution and uniformity of imaging images in the ultra low dose group were better than those in the low dose group. **Conclusion:** The subjective quality of images obtained from ultra-low dose CT scans combined with IMR shows minimal differences compared to other modes; however, its objective quality, spatial resolution, density resolution, and uniformity of images are significantly improved.

Key words: Lung Neoplasms; Tomography, X-Ray Computed

肺癌是最常见的恶性肿瘤之一,对人类健康和生命构成重大威胁^[1-3]。由于肺癌早期症状比较隐匿,很多患者在就诊时已发展到中晚期,使得治疗变得更加困难,预后也相应较差。据统计,肺癌患者的 5

[收稿日期] 2024-12-18

[作者简介] 马啸天(1987-),男,河南新乡人,主治医师。E-mail: mmmxxx@163.com

[通信作者] 马啸天,新乡市中心医院 CT 室,453000。E-mail: mmmxxx@163.com

[基金项目] 二〇二三年度河南省医学科技攻关计划项目(LHGJ20230879)。

年生存率仅为 16%~18%^[4]。因此,及时发现并进行干预对于提升肺癌治愈率尤为重要。肺癌的临床表现往往不易察觉,如早期可能出现的咳嗽、胸痛和气促等症状,很容易被忽视或误认为其他健康问题^[5]。这种情况导致患者在疾病早期未能得到有效诊断和治疗,肿瘤在此阶段可能已经发生局部扩散或远处转移,使得治疗方案复杂化,治疗效果不佳。因此,及早发现肺部结节并实施有效的临床干预,是提高治愈率的重要环节^[6]。近年来,肺癌筛查技术的发展为早期诊断提供了新的可能,其中低剂量 CT 扫描已经成为一种广泛应用于筛查的工具。由于其辐射剂量相对较低,对于较小结节的检测较为灵敏^[7],在疾病早期对于潜在的恶性病变具有显著的优势。研究表明,与采用常规剂量 CT 筛查相比,低剂量 CT 筛查发现的早期肺癌患者,更有机会接受手术或其他治疗,从而显著改善患者的预后^[8]。极低剂量 CT 作为一种新的肺结节筛查工具,在降低辐射风险、提高早期发现率方面具有重要意义。随着技术进步和临床经验积累,其应用将更加普及,为提高肺癌早期诊断率提供强有力支持^[9]。本研究主要通过对比不同剂量 CT 联合不同模型图像重建算法在肺结节筛查中图像质量,以期临床诊断提供科学依据。

1 资料与方法

1.1 一般资料

本研究为前瞻性研究,选取 2022 年 1 月—2024 年 5 月于新乡市中心医院进行治疗的肺结节患者 120 例,其中男 54 例,女 66 例,年龄 41~66 岁,平均 (48.34 ± 4.55) 岁,体质指数平均为 (24.57 ± 2.00) kg/m²,合并高血压患者 35 例、高脂血症患者 35 例、糖尿病患者 20 例。肺部良性病变患者 59 例,恶性病变患者 61 例。纳入标准:①所有患者均符合肺结节的诊断标准^[10];②所有患者均了解本研究的目的以及方法。排除标准:①合并其他部位肿瘤患者;②合并威胁患者生命安全的疾病;③存在影响图像质量的其他因素。本研究通过我院医学伦理委员会批准,所有研究对象均签署知情同意书。

1.2 研究方法

采用 64 排螺旋 CT 进行扫描,患者取仰卧位,两臂上举,并在吸气末进行屏气扫描。扫描范围从肺尖到肺底。扫描参数:管电压为 120 kV,管电流采用智能模式,层厚和层间距均为 5.0 mm,螺距为 1.375。在常规剂量 CT 扫描中,预设噪声值为 10,而在复查时则使用低剂量 CT 及极低剂量 CT 检查,低剂量扫描条件:管电压 120 kV,管电流 30 mA;极低剂量扫描条件:管电压 120 kV,管电流 10 mA。扫描后,由两

位资深影像学医师共同对图像进行分析诊断,同时评估图像质量。

CT 扫描后,将获取的图像分别进行滤波反投影(Filtered back projection,FBP)重建、全模型迭代重建(Knowledge based iterative model reconstruction,IMR)及 iDose 重建。

分别对两组患者的低对比分辨率(Low contrast detectability,LCD)、图像失真(Image distortion,ID)、诊断信心(Diagnosis confidence,DC)进行比较。LCD 评分标准:若患者的 LCD 表现较差,则记 1 分;若情况可接受,则记 2 分;若表现良好,则记 3 分;若显示非常好,则记 4 分。ID 评分:失真严重,无法诊断病灶则为 1 分;失真影响主要器官的临床诊断但仍能进行部分诊断则为 2 分;轻微失真的情况记 3 分;无失真的情况则记 4 分。DC 评分标准:完全无法进行诊断则为 1 分;仅能提示病变部位则为 2 分;能够进行基本诊断则为 3 分;完全可以进行准确诊断则为 4 分^[11]。

在对患者的图像质量进行分析时,重点关注肺结节区域,尺寸为 10 mm×10 mm。分析包括结节 CT 值及其标准差(SD),同时对胸廓入口层面、气管隆突层面和左下肺静脉层面进行分析。这些层面包括主动脉、脂肪层和竖脊肌的 CT 值及其 SD。此外,还分析患者的信噪比(SNR)和对比噪声比(CNR)。其中,SNR 定义为各组织的 CT 值与 SD 的比值,CNR 定义为各组织 CT 值与同水平肌肉 CT 值的差值与各组织 CT 值 SD 的比值^[12]。

对图像在 Routine、Soft 及 SharpPlus 3 种迭代模式中的空间分辨率进行分析,采取自动检测软件计算调制传递函数的 10%作为参考值^[13]。空间分辨率主要通过对比度学像的像素尺寸、图像矩阵大小、切片厚度、空间频率响应进行评价,像素尺寸越小,空间分辨率越高。图像矩阵大小指图像中像素的总数量。矩阵的行数和列数决定了图像的总像素数。较大的矩阵可以提供更高的空间分辨率,但同时也需要较大的存储空间和处理能力。较薄的切片厚度可以提供更高的空间分辨率,使得细节表现更加清晰。成像系统的解剖分辨率:不同的成像技术有不同的空间分辨率标准。CT 的空间分辨率通常以线对每毫米(lp/mm)来表示。空间频率响应是评价成像系统空间分辨率的一个重要指标,描述了系统在不同空间频率下的图像质量。空间频率响应曲线的陡峭程度决定了系统对细节的还原能力。

分析在不同迭代模式(Routine、Soft 及 SharpPlus)中密度分辨率之间的差异,分别对灰度级数、空间分辨率、噪声水平以及动态范围进行分析。灰度级数:图像的密度分辨率与其能够表示的灰度级数直接相

表 3 不同模式下空间分辨率比较

重建参数	Routine					Soft					SharpPlus				
	组别	FBP	IMR	iDose	F	P	FBP	IMR	iDose	F	P	FBP	IMR	iDose	F
低剂量组 (n=120)	7.59±1.99	7.99±1.18	7.23±1.82	12.569	0.000	7.51±1.58	8.48±1.53	8.56±1.67	13.596	0.000	7.90±0.71	7.91±1.11	8.67±1.81	12.365	0.000
极低剂量组 (n=120)	6.51±1.58	6.48±1.53	6.85±1.57	13.569	0.000	6.75±1.58	6.29±1.89	6.68±1.82	14.598	0.000	6.95±0.60	6.72±0.82	6.06±0.96	15.696	0.000
t	4.656	8.561	1.732			3.726	9.866	8.338			11.195	9.446	13.955		
P	0.000	0.000	0.085			0.000	0.000	0.000			0.000	0.000	0.000		

表 4 不同模式下密度分辨率比较

重建参数	Routine					Soft					SharpPlus				
	组别	FBP	IMR	iDose	F	P	FBP	IMR	iDose	F	P	FBP	IMR	iDose	F
低剂量组 (n=120)	0.16±0.07	0.13±0.03	0.11±0.02	36.774	0.000	0.58±0.15	0.52±0.15	0.55±0.18	4.186	0.016	0.15±0.02	0.81±0.08	0.25±0.09	835.817	0.000
极低剂量组 (n=120)	0.76±0.04	0.89±0.05	0.97±0.04	709.474	0.000	0.88±0.08	0.87±0.07	0.81±0.03	42.295	0.000	0.88±0.01	1.23±0.07	0.75±0.05	2 958.400	0.000
t	81.524	142.779	210.656			19.331	23.162	15.608			352.625	43.281	81.524		
P	0.000	0.000	0.085			0.000	0.000	0.000			0.000	0.000	0.000		

表 5 不同模式下图像均匀性比较

重建参数	Routine					Soft					SharpPlus				
	组别	FBP	IMR	iDose	F	P	FBP	IMR	iDose	F	P	FBP	IMR	iDose	F
低剂量组 (n=120)	2.17±0.17	2.22±0.17	2.19±0.08	3.551	0.030	2.31±0.14	2.23±0.19	2.22±0.15	11.202	0.000	2.56±0.45	2.34±0.95	2.58±0.66	4.144	0.017
极低剂量组 (n=120)	1.85±0.13	1.87±0.13	1.76±0.06	33.048	0.000	1.98±0.17	1.81±0.17	1.89±0.14	33.643	0.000	1.89±0.12	1.82±0.12	1.87±0.14	9.669	0.000
t	16.380	17.915	47.104			16.415	18.046	17.618			15.759	5.949	11.528		
P	0.000	0.000	0.085			0.000	0.000	0.000			0.000	0.000	0.000		

分辨率、对比度以及病灶的可视化效果上。主要的图像重建算法包括 FBP 重建、迭代重建、深度学习重建等。每种算法通过不同的机制处理图像数据,影响最终的图像质量^[16]。FBP 重建是传统的重建方法,它通过将投影数据反投影到图像平面,并进行滤波处理来重建图像。FBP 重建的优点在于计算速度快,但其缺点是对噪声非常敏感,特别是在低剂量 CT 扫描中,噪声会显著影响图像质量,使得小结节的识别变得困难。迭代重建技术通过多次迭代计算逐步优化图像质量,能够有效减少噪声并提高图像的对比度^[17]。迭代模型重建技术通过建立更为复杂的数学模型,对投影数据进行逐步优化,以减少噪声并提高图像对比度。IMR 采用了迭代算法,这些算法能够有效结合先验信息与观测数据,通过多次迭代逐渐改善图像质量^[18]。IMR 不仅能显著降低低剂量 CT 扫描带来的噪声,还能在保持或提升图像分辨率的同时,提高小结节的可视化效果,使得 IMR 成为一种非常有效的肺结节筛查方法,其优势在于能够通过调节参数以适应不同患者及扫描条件,从而在较低辐射剂量下实现高质量成像。iDose 重建是一种结合了迭代重建与模型学习的新技术,通过对 CT 扫描数据进行稀疏编码和优化处理,实现更高效的噪声控制和细节保留^[19]。与传统 IMR 相比,iDose 重建进一步提高了处理效率,同时保留了更多细微结构的信息,使得小结节的识别更加清晰。此外,iDose 重建还允许医生根据具体情况调整算法参数,以达到最佳成像效果。这一灵活性使得 iDose 重建在肺结节筛查中

表现出色,有助于提高诊断准确性和早期发现率^[20]。

本研究中,通过对患者不同模式的图像质量进行分析,仅在 iDose 模式下,患者图像的主观质量评价下降,而在客观质量评价中,在 FBP、IMR 以及 iDose 模式下,极低剂量组图像的 CT 值、SD 值降低,SNR、CNR 则相对提升。分析认为,iDose 重建作为一种新型技术,虽然在很多方面提高了图像质量,但在主观质量评价中却出现了下降,这可能与 iDose 重建在噪声控制和细节保留方面的策略有关。在极低剂量的条件下,iDose 重建可能过度平滑了图像,从而导致图像的主观清晰度下降。这种现象通常是由于 iDose 算法在降低噪声的同时,可能牺牲了一部分图像的锐利度和细节表现。主观质量评价往往侧重于图像的视觉效果,因此即使 iDose 重建在客观质量评价中表现优异,但在主观质量评价中可能因细节模糊而降低图像质量评分^[21]。从客观质量评价的角度来看,FBP、IMR 与 iDose 模式联合使用在极低剂量下的 CT 值、SD 值、SNR 和 CNR 等指标优于低剂量组。CT 值是影像学中用于表征组织密度的重要指标。在极低剂量下,通过 FBP、IMR 和 iDose 模式的联合应用,图像 CT 值的稳定性和准确性得到提升。这是因为 FBP 重建虽然在低剂量下噪声较大,但其对 CT 值的稳定性影响较小;IMR 通过复杂的数学模型和迭代优化,提高了 CT 值的准确性;iDose 重建通过稀疏编码进一步改善了图像中的 CT 值表现^[22]。SD 值反映了图像的噪声水平。在极低剂量下,IMR 和 iDose 重建的噪声抑制能力相较于 FBP 重建

显著提高。IMR 通过迭代算法对噪声进行优化, iDose 重建则利用模型学习对噪声进行进一步处理。三者联合使用能够有效降低 SD 值, 减少噪声的影响, 从而使 CT 在极低剂量下依然保持较低的噪声水平。SNR 是评价图像质量的重要参数, 表示信号强度与噪声水平的比值。在 FBP 重建中, 由于噪声较高, SNR 通常较低。而 IMR 和 iDose 重建能够通过各自的算法优势提升 SNR。IMR 通过去噪算法增强信号的表现, iDose 则通过改进的图像处理技术进一步提升信号的清晰度。CNR 用于评估图像中不同组织间的对比度。在极低剂量下, FBP、IMR 与 iDose 模式的联合使用能够提升 CNR。这是因为 FBP 能提供基础的对比度信息, 而 IMR 和 iDose 重建通过各自的去噪和细节保留技术进一步增强了组织间的对比度^[23]。IMR 的迭代优化和 iDose 重建的模型学习能够更好地分辨不同组织的细微差异, 从而提高 CNR 值。而在空间分辨率以及图像均匀性分析中, 分别在 FBP、IMR 以及 iDose 模式下, 极低剂量 CT 检查的空间分辨率以及图像均匀性均显著优于低剂量组。分析认为, 空间分辨率是指影像系统区分两个相邻点的能力, 在医学成像中直接影响到细微结构的可视化。在极低剂量 CT 检查中, FBP 重建、IMR 与 iDose 重建各自依赖于不同的算法特性来提高空间分辨率^[24]。FBP 重建作为传统的 CT 图像重建方法, 其主要优点在于能够快速生成图像, 但在低剂量情况下容易受到噪声干扰, 从而影响空间细节表现。而 IMR 通过其迭代优化过程, 有效减少了由低剂量引起的噪声, 同时增强了细节信息, 使得空间分辨率得到显著提升。iDose 重建则结合了模型基础和稀疏编码技术, 通过精细调整重建参数, 提高了高频信息的保留度, 从而进一步改善了空间分辨率。因此, 在极低剂量下, 这三种模式联合使用, 相较于单一采用低剂量, 其空间分辨率明显提升, 能够更好地识别小病灶或微小结构。图像均匀性是指整个影像区域内信号强度的一致性^[25]。在临床应用中, 高均匀性的图像有助于医生更准确地判断组织特征及病变情况。在 FBP、IMR 与 iDose 模式下, 由于其各自采用了不同的方法来处理噪声和伪影, 因此在极低剂量下表现出更好的图像均匀性。FBP 重建虽然存在一定程度上的不均匀性, 但快速生成的特点使其在初步筛查中仍具备实用价值。IMR 通过多次迭代计算, 可以有效减小因噪声引起的不均匀性, 从而实现更为平滑且一致的图像效果。此外, iDose 重建利用先进算法对原始数据进行优化处理, 使得最终生成的图像不仅保持高对比度, 还能确保整体的一致性。因此, 当 FBP、IMR 及 iDose 模式联合使用时, 可以显著提高极低

剂量 CT 检查的图像均匀性, 相比之下, 传统低剂量 CT 检查则无法达到同样水平^[26]。通过对 FBP、IMR 与 iDose 模式在极低剂量 CT 检查中的应用分析, 表明这三种重建技术在提高空间分辨率和改善图像均匀性方面均展现出显著优势。这些优势不仅源自各自算法优化策略的不同, 更体现出它们在面对挑战性的临床需求时所做出的努力。随着成像技术的发展, 将这些先进技术结合起来, 有望进一步提升影像学检查质量, 为临床诊断提供更加可靠的数据支持。这一研究领域仍具有广阔的发展前景, 需要更多深入探索, 以不断优化 CT 成像技术, 为患者提供更安全、更高效、更精准的医疗服务。

本研究存在一定局限性, 由于纳入样本的局限, 在临床的推广还有待于多中心、大样本的研究进行验证。

综上所述, 极低剂量 CT 扫描联合 IMR 的图像主观质量评价与其他模式比较差异较小, 但其客观质量评价、空间分辨率、密度分辨率、图像均匀性均得到明显改善。

【参考文献】

- [1]陆焯大, 林东子, 吴汝明, 等. 肺癌自身抗体肿瘤/睾丸抗原 G 抗原 7、黑色素瘤抗原 A1、神经细胞胞浆蛋白 9.5 联合检测对肺癌化疗疗效评估价值研究[J]. 临床军医杂志, 2024, 52(10): 1073-1076.
- [2]李鹏飞, 王伟, 王启, 等. 经食管超声心动图指导液体管理在肺癌手术中应用[J]. 临床军医杂志, 2024, 52(8): 834-836.
- [3]王保明, 代晨, 马冬春. 肺浸润性黏液腺癌 CT 表现及临床特征分析[J]. 中国临床研究, 2024, 37(1): 52-56.
- [4]汤宁, 卫泽良, 张瑞, 等. 基于多尺度多模式图像的肺结节分类对比研究[J]. 计算机工程与应用, 2020, 56(3): 165-175.
- [5]武卫杰, 岳松伟, 王会霞, 等. 能谱 CT 虚拟平扫评估肺纯磨玻璃结节的可行性研究[J]. 放射学实践, 2020, 35(3): 346-351.
- [6]D'hondt L, Franck C, Kellens PJ, et al. Impact of deep learning image reconstruction on volumetric accuracy and image quality of pulmonary nodules with different morphologies in low-dose CT[J]. Cancer Imaging, 2024, 24(1): 60.
- [7]Ma G, Dou Y, Dang S, et al. Improving Image Quality and Nodule Characterization in Ultra-low-dose Lung CT with Deep Learning Image Reconstruction [J]. Acad Radiol, 2024, 31(7): 2944-2952.
- [8]Ma Y, Cao H, Li J, et al. Multi-instance learning based lung nodule system for assessment of CT quality after small-field-of-view reconstruction[J]. Sci Rep, 2024, 14(1): 3109.
- [9]Meng D, Wang Z, Bai C, et al. Assessing the effect of scanning parameter on the size and density of pulmonary nodules: a phantom study[J]. BMC Med Imaging, 2024, 24(1): 12.
- [10]Agnes SA, Solomon AA, Karthick K. Wavelet U-Net++ for accurate lung nodule segmentation in CT scans: Improving early detection and diagnosis of lung cancer[J]. Biomed Signal Process Control, 2024, 87(PA): 12-15.
- [11]刘海法, 杨丽, 王琦, 等. 深度学习重建算法对胸部低剂量 CT 肺结节测量及显示影响的模体研究 [J]. 放射学实践, 2023, 38(8): 977-984.