# • 胸部影像学 •

# 联合双能量 CT 定量参数和形态学特征在鉴别良恶性肺实性结节 的应用价值

林礼波,何长久,刘杰克,李勇,解超莲,周鹏

【摘要】目的:探讨双能量 CT 定量参数和形态学特征在鉴别肺实性结节良恶性中的应用价值。 方法:回顾性连续纳入 144 例经双期双能量 CT(DECT)增强扫描患者的 147 个肺实性结节,包括 76 例 肺癌和 71 例良性病变。纳入结节以下特征:基于直径或体积的 Lung-RADS 分级、形态学特征以及 DECT 定量参数[包括动脉期和静脉期的有效原子序数(Zeff\_A、Zeff\_V)、碘含量(IC\_A、IC\_V)和标准 化碘含量(NIC\_A、NIC\_V)]。使用多因素 Logistic 回归筛选鉴别良恶性肺结节的独立预测因子,并构 建组合模型。使用受试者操作特征曲线下面积(AUC)、敏感度、特异度评估 Lung-RADS、形态学特征、 DECT 定量参数及组合模型的诊断效能。使用 Delong 对比 AUC 之间的差异。结果:基于分叶(OR: 25.465,95% CI:6.988~92.797)、NIC\_V(OR:1.100,95% CI:1.062~1.139)构建的组合模型,AUC、敏 感性、特异性分别为 0.942(0.890~0.974)、90.8%及 81.7%,且组合模型的 AUC 均优于基于直径的 Lung-RADS 分级、单一形态学特征及 DECT 定量参数(均 P < 0.05)。结论:基于 NIC\_V 和分叶构建 的组合模型,鉴别良恶性肺实性结节的诊断效能较高,在临床上有良好的应用价值。

【关键词】 双能量 CT; 碘含量; 肺肿瘤; 恶性病灶; 良性病灶

【中图分类号】R814.42;R734.2 【文献标识码】A 【文章编号】1000-0313(2023)11-1392-07

DOI:10.13609/j.cnki.1000-0313.2023.11.006 开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Application value of combined dual-energy computed tomography quantitative parameters and morphological features in differentiating malignant from benign lesions in solid pulmonary nodules LIN Li-bo, HE Chang-Jiu, LIU Jie-ke, et al. Department of Radiology, Sichuan Clinical Research Center for Cancer, Sichuan Cancer Hospital & Institute, Sichuan Cancer Center, Affiliated Cancer Hospital of University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610041, China

**[Abstract] Objective:** This study aimed to assess the application value of quantitative parameters from dual-energy computed tomography (DECT) and morphological features in differentiating malignant from benign lesions in solid pulmonary nodules. **Methods:** A total of 147 solid pulmonary nodules, confirmed pathologically, were consecutively and retrospectively enrolled from 144 patients who underwent DECT scan. These nodules included 76 cases of lung cancer and 71 cases of benign lesions. The following features were included:Lung CT Screening Reporting and Data System (Lung-RADS) based on diameter or volume, morphology features, and DECT-derived quantitative parameters including effective atomic number (Zeff), iodine concentration (IC), and normalized iodine concentration (NIC) in arterial and venous phases. The multivariable logistic regression analysis was used to evaluate the independent predictors in differentiating malignant from benign lesions and to build the combined model. The diagnostic performances of Lung-RADS, morphology features, DECT-derived quantitative parameters, and the combined model were assessed using the area under curve (AUC) of the receiver operating characteristic curve, as well as sensitivity and specificity. The Delong test was used to compare the differences in AUCs. **Results:** Lobulation (OR: 25.465, 95% CI: 6.988 ~ 92.797) and NIC\_V (OR: 1.100, 95% CI: 1.062~1.139) were used to establish the combined model. The AUC, sensitivity, and

1392



作者单位:610041 成都,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

作者简介:林礼波(1992-),男,重庆市梁平县人,技师,主要从事胸部影像技术工作。

通讯作者:周鹏, E-mail: penghyzhou@126.com

基金项目:四川省科技计划项首(2021YFS0075、2021YFS0225、2022YFSY0006)

specificity were 0.942 ( $0.890 \sim 0.974$ ), 90.8%, and 81.7%, respectively. The Delong test demonstrated that the diagnostic performance of the combined model was significantly higher than that of models based on diameter-based Lung-RADS, single morphology features, and DECT-derived quantitative parameters (all P < 0.05). Conclusion: Based on NIC\_V and lobulation, the combined model showed good application value in differentiating malignant from benign lesions in solid pulmonary nodules during clinical practice.

**(Key words)** Dual-energy computed tomography; Iodine concentration; Lung neoplasms; Malignant lesions; Benign lesions

肺癌是我国及世界范围内发病率和死亡率最高的 恶性肿瘤之一,严重危害人类健康<sup>[1,2]</sup>。随着肺癌筛 查的推广,肺结节的检出率越来越高<sup>[3]</sup>。目前肺部影 像报告和数据系统(lung imaging reporting and data system,Lung-RADS)被广泛用于肺结节的鉴别和管 理<sup>[4]</sup>。然而,Lung-RADS对实性结节的良恶性鉴别有 一定困难,其相对低的特异性可能会导致良性肺结节 的过度治疗<sup>[5]</sup>。此外,放射科医生常通过肺结节的形 态学特征评估肺结节的恶性程度,但是良恶性肺实性 结节的形态学特征有所重叠,例如,非钙化性肉芽肿也 常表现为分叶或其他恶性结节的征象<sup>[6]</sup>。因此,良恶 性肺实性结节的鉴别诊断仍面临挑战。

双能量 CT(dual-energy computed tomography, DECT)不仅可用于分析肺结节的直径和形态学特征, 还可以提供碘含量(iodine concentration, IC)、标准化 碘含量(normalized iodine concentration, NIC)、有效 原子序数(effective atomic number,Zeff)等多种定量 参数。由于不同病灶的衰减系数具有能量依赖性,使 得 DECT 定量参数用于鉴别良恶性肺结节成为可 能[7.8]。Wang 等[9]发现 IC 在恶性肿瘤和非特异性炎 症的组间差异有统计学意义。Hou 等<sup>[10]</sup>的研究指出, NIC 能够鉴别恶性肿瘤和非特异性炎症,其受试者操 作特征(receiver operating characteristic, ROC)曲线 下面积(area under curve, AUC)为 0.960。此外, Zhang 等<sup>[11]</sup>及 Reiter 等<sup>[12]</sup>发现 IC 能够鉴别恶性肿瘤 和良性病变,其AUC分别为0.890和0.790。然而,这 些研究的样本量均较小(最多者仅纳入 77 个)[9-12]、未 区分肺结节类型[9,11]、未限定病灶大小(部分纳入肺肿 块)<sup>[9,11]</sup>、仅纳入单一 DECT 定量特征分析<sup>[12]</sup>或仅比 较良恶性肺实性结节的组间差异[9],存在一定的局限 性。此外,这些研究均未评估 DECT 定量参数,与临 床常用的 Lung-RADS 分级系统或传统形态学特征 (如分叶、毛刺)之间诊断效能的差异。同样,这些研究 均未评估 DECT 定量参数与形态学特征相结合,是否 能进一步提高良恶性肺实性结节的鉴别诊断效能。

因此,本研究拟基于既往研究的不足,进一步探讨 DECT 定量参数在鉴别肺实性结节良恶性中的应用价 值。此外,基于 DECT 定量参数与传统形态学特征, 构建组合模型,并评估其与 Lung-RADS、单一 DECT 定量参数及形态学特征之间诊断效能的差异。

### 材料与方法

## 1.一般资料

回顾性连续收集 2020 年 5 月-2021 年 11 月在 四川省肿瘤医院进行 DECT 扫描的患者。纳入标准 如下:①患者术前 1 个月内进行了 DECT 扫描;②肺 实性结节;③患者行肺叶或肺段切除术切除肺结节;④ 术后病理资料完整。排除标准为:①结节直径>3 cm; ②近 5 年有癌症病史;③术前行放疗、化疗或靶向治疗 等肿瘤相关治疗;④图像有严重的呼吸或运动伪影。

# 2.检查方法

本研究采用 Siemens 双源 CT 扫描仪(Somatom Definition Flash)对患者行肺部双期 DECT 增强扫 描。扫描范围从肺尖到肋膈角(包括全部肺)。扫描时 患者取仰卧位,双手上举,采用单次屏气扫描,呼吸时 相为深吸气末。增强扫描使用高压注射器以 3.0 mL/s 的流率将 90 mL 非离子型碘对比剂 (碘普罗胺, 370 mg I/mL)注入肘前静脉,随后以相同的流率注入 生理盐水 30 mL。采用对比剂追踪技术(bolus tracking),感兴趣区(region of interest, ROI)置于肺动脉干 层面升主动脉处,阈值达到 100 HU 后延迟 5 s 行动脉 期扫描,动脉期完成后延迟 30 s 行静脉期扫描。动静 脉期扫描参数和重建参数一致:管电压 80/Sn 140 kV,参考管电流 205/87 mAs,螺距 0.55,机架旋转 时间0.28 s,准直器宽度 64×0.6 mm,视野 350 mm× 350 mm,矩阵 512×512,层厚 0.5 mm,层间距 0.5 mm。图像重建采用 SAFIRE 迭代重建算法(level 4),卷积核 Q30f。开启自动管电流调制技术(CARE Dose 4D)。

## 3.图像分析

直径和体积测量:首先在图像后处理工作站(SyngoVia VB20)上使用动脉期的数据获得虚拟平扫图像 (virtual non-enhanced image, VNI)。既往研究显示, 基于人工智能的联影 uAI 平台(united imaging intelligence,uAI)测量的肺结节平均直径和体积与人工测量值有较高的一致性<sup>[13]</sup>。因此,本研究为避免观察者之间和观察者内部的差异。将纳入患者的 VNI 图像以 DICOM 格式导入联影 uAI 平台,由人工智能模型在三维层面上(three-dimensional,3D)进行肺结节的自动识别及分割。采集肺结节的平均直径及体积。其中:

肺结节的平均直径= 横断面图像上最大长经+垂直经 2 (1)

体积=体素的数量×单个体素的体积

随后,基于直径或体积的 Lung-RADS 1.1 分级系统,由两名具有 6 年和 11 年胸部影像诊断经验的初级和中级职称医师对所有肺结节进行分类,并将 147 个结节分为 Lung-RADS 2、3、4A、4B、4X 类。由于 4X 类需要主观评估,两位放射科医生之间若有争议,则协商讨论解决,如仍未达成一致,则由 1 名具有 26 年胸部影像诊断经验的高级职称医师判定。

传统形态学特征评估:本研究纳入的形态学特征 包括形状(圆形/椭圆形或不规则)、边缘(平滑或粗 糙)、分叶、毛刺、胸膜牵拉征、空泡征及血管集束征。 同样,由上述两名医师在标准重建(窗位-500 HU,窗 宽 1500 HU)的轴位及多平面重组(multi-planar reformation,MPR)上完成所有肺结节形态学特征的评 估。若有争议,则协商讨论解决,如仍未达成一致,则 由高级职称医师判定。在评估图像前,所有医师均不 知相应的病理组织学结果。

DECT 定量参数测量:在相同图像后处理工作站 上测量 DECT 定量参数。在横轴面肺实性结节最大 层面测量结节的 Zeff 值、IC 值和主动脉的 IC 值。测 量时 ROI 尽可能大,并注意避开坏死和邻近正常组 织,并计算肺实性结节的 NIC。其中:

$$NIC = \frac{45760 \text{ IC}}{2300 \text{ IC}} \times 100\%^{[14]}$$
(3)

本研究共记录了 6 个 DECT 定量参数,包括动脉 期 Zeff(Zeff\_A)、动脉期 IC(IC\_A)、动脉期 NIC(NIC \_A)、静脉期 Zeff(Zeff\_V)、静脉期 IC(IC\_V)和静脉 期 NIC(NIC\_V)。

4.模型构建

形态学特征评价:形态学特征均为计数资料,故使 用 2 检验或 Fisher 精确检验比较组间差异。随后,将 组间差异有统计学意义的特征放入单因素 Logistic 回 归分析中,以评估各特征对良恶性肺实性结节的鉴别 能力。最后,将 P < 0.05 的形态学特征放入多因素 Logistic 回归分析,采用反向逐步回归法进行特征选 择,以确定形态学特征中鉴别良恶性肺实性结节的独 立预测因子,并计算其比值比(odds ratio,OR)及 95% 置信区间(95% confidence interval,95% CI)。 DECT 定量参数评价:DECT 定量参数为计量资料,故首先使用 Kolmogorov-Smirnov 检验计量资料 是否符合正态分布:服从正态分布的计量资料组间比 较采用独立样本 t 检验;不服从正态分布的计量资料 组间比较采用 Mann-Whitney U 检验。随后同上分别 使用单因素和多因素 Logistic 回归分析,评估各特征 对良恶性肺实性结节的鉴别能力,并计算其 OR 值及 95% CI。

组合模型:本研究基于上述多因素 Logistic 回归 分析结果,使用差异有统计学意义(P<0.05)的形态 学特征及 DECT 定量参数构建组合模型。

5.统计学分析

(2)

采用 SPSS(版本 25.0)、Medcalc(版本 18.2.1)和 R(版本 4.0.3)统计软件分析数据。计数资料以例 (%)表示;计量资料以均值±标准差表示。使用 ROC 曲线的 AUC、敏感度、特异度评估形态学特征、DECT 定量参数及组合模型的诊断效能。此外,为进一步评 估各模型在临床中的应用价值,将组合模型与基于直 径或体积的 Lung-RADS 1.1 分级系统进行对比,并使 用 DeLong 检验比较各 AUC 间的差异。以双侧 P< 0.05 为差异有统计学意义。

#### 结果

### 1.基线特征

本研究一共纳入 144 名患者的 147 例肺实性结 节。其中肺癌 76 例,包括 67 例腺癌(其中 1 名患者同 时存在 2 个腺癌结节),6 例鳞癌和 3 例小细胞肺癌; 良性病变 71 例,包括 31 例非特异性炎症(其中 1 名患 者同时存在 2 个病灶),24 例由结核分枝杆菌、新生隐 球菌和其他不明原因引起的肉芽肿(其中 1 名患者同 时存在 2 个病灶),10 例良性肿瘤(硬化性肺细胞瘤、错 构瘤和支气管腺瘤)和 6 例肺内淋巴结和纤维增生。良 性肺结节和恶性肺结节的临床及形态学特征详见表 1。

性别和年龄在良恶性肺结节之间差异均无统计学 意义(P>0.05)。对于传统形态学特征,形状和毛刺 在两组之间的差异均无统计学意义(P>0.05);而边 缘、分叶、胸膜反应、空气支气管征及血管集束征在两 组之间差异均有统计学意义(P<0.05)。此外,结节 的直径在两组之间差异有统计学意义(P=0.022),而 两组之间的体积差异无统计学意义(P=0.050)。基 于直径的 Lung-RADS 分类在两组之间差异有统计学 意义(P=0.014),而基于体积的 Lung-RADS 分类在 两组之间差异无统计学意义(P=0.095)。

恶性肺结节的 Zeff\_A、IC\_A、NIC\_A、Zeff\_V、IC\_ V、NIC\_V 均显著高于良性肺结节,差异均有统计学 意义(P<0.05,表 2),见图 1、2。

表1 良恶性肺实性结节的临床及形态学特征

特征	肺癌 (76例)	良性病变 (71例)	统计量	P
性别/例			1.976ª	0.160
女性	42	31		
男性	34	40		
年龄/岁	$58.20 \pm 11.00$	$55.50 \pm 11.40$	$-1.404^{b}$	0.163
形状/例			0.225ª	0.635
圆形/椭圆形	26	45		
不规则	25	51		
边缘/例			13.677ª	<0.001*
平滑	45	26		
粗糙	25	51		
分叶/例			55.123ª	<0.001*
无	67	4		
有	27	49		
毛刺/例			0.697ª	0.405
无	70	1		
有	72	4		
胸膜反应/例			$11.468^{a}$	0.001*
无	46	25		
有	28	48		
空气支气管征/例			9.007ª	0.003*
无	65	6		
有	55	21		
血管集束征/例			18.318 <sup>a</sup>	<0.001*
无	68	3		
有	52	24		
直径/mm	$16.60 \pm 6.10$	$14.30 \pm 6.40$	$-2.460^{\circ}$	0.014 *
体积/cm <sup>3</sup>	$4.18 \pm 4.12$	$2.92 \pm 3.43$	$-1.976^{b}$	0.050
Lung-RADS(直径)			$10.693^{a}$	0.014 *
2	2	4		
3	3	9		
4 A	24	32		
4B or 4X	47	26		
Lung-RADS(体积)/例			6.359ª	0.095
2	0	3		
3	5	6		
4A	22	28		
4B or 4X	49	34		

注:<sup>a</sup>卡方检验;<sup>b</sup>独立样本 t 检验;<sup>c</sup> Mann-Whitney U 检验;<sup>\*</sup> P < 0.05;Lung-RADS,肺部影像报告及数据系统。

表 2 良恶性肺实性结节的 DECT 定量参数

特征	肺癌 (76例)	良性病变 (71例)	统计量	Р
Zeff_A	$8.07 \pm 0.69$	$7.74 \pm 0.50$	$-3.303^{a}$	0.001*
IC_A/mg/mL	$1.43 \pm 0.87$	$0.61 \pm 1.45$	$-4.219^{a}$	<0.001*
NIC_A/%	$13.47 \pm 8.35$	$5.62 \pm 13.44$	$-4.283^{a}$	<0.001*
Zeff_V	$8.42 \pm 0.57$	$7.83 \pm 1.02$	$-5.466^{b}$	<0.001*
$IC_V/mg/mL$	$2.02 \pm 0.77$	$0.67 \pm 0.98$	$-9.406^{a}$	<0.001*
NIC_V/%	$36.32 \pm 13.21$	$11.59 \pm 17.92$	$-9.567^{a}$	<0.001*

注:<sup>a</sup> 独立样本 t 检验;<sup>b</sup> Mann-Whitney U 检验;<sup>\*</sup> P < 0.05; Zeff\_A,动脉期有效原子序数;IC\_A,动脉期碘含量;NIC\_A,动脉期标准化 碘含量;Zeff\_V,静脉期有效原子序数;IC\_V,静脉期碘含量;NIC\_V,静脉期标准化碘含量。

2.模型建立

形态学特征评价:单因素 Logistic 回归分析显示, 边缘、分叶、胸膜反应、空气支气管征、血管集束征均为 鉴别良恶性肺结节的预测因子(P<0.05,表 3)。将上 述形态学特征进行多因素 Logistic 回归分析,结果显 示,仅分叶是鉴别良恶性肺实性结节的独立预测因子 (OR:25.465,95% CI:6.988~92.797)。

DECT 定量参数评价:单因素 Logistic 回归分析 显示,Zeff\_A、IC\_A、NIC\_A、Zeff\_V、IC\_V、NIC\_V 均 为鉴别良恶性肺结节的预测因子(P < 0.05,表 3)。将 上述形态学特征进行多因素 Logistic 回归分析,结果 显示,仅 NIC\_V 是鉴别良恶性肺实性结节的独立预测 因子(OR:1.100,95% CI:1.062~1.139)。

组合模型:基于上述结果,使用分叶及 NIC\_V 构 建组合模型。组合模型的计算公式为:

 $\ln(P/1-P) = -3.186 + 3.237 \times \hat{\sigma} r_{(\pi)} + 0.095 \times \text{NIC}_V (\%)$ (%) (4)

其中 P 是预测恶性肺实性结节的概率(截断值> 0.355)。



**图**1 男,49岁,肺部肉芽肿非特异性炎症。a)VNI;b)Zeff\_A=7.3;c)IC\_A=0.1 mg/mL;d)Zeff\_V=7.4; e)IC\_V=0.3 mg/mL。VNI,虚拟平扫图像;Zeff\_A,动脉期有效原子序数;IC\_A,动脉期碘含量;Zeff\_V,静 脉期有效原子序数;IC\_V,静脉期碘含量。 图 2 男,66岁,肺腺癌。a)VNI;b)Zeff\_A=8.2;c)IC\_A= 1.3 mg/mL;d)Zeff\_V=8.7;e)IC\_V=2.4 mg/mL。VNI,虚拟平扫图像;Zeff\_A,动脉期有效原子序数;IC\_ A,动脉期碘含量;Zeff\_V,静脉期有效原子序数;IC\_V,静脉期碘含量。

表 3 单因素及多因素 Logistic 回归分析结果

	单因素 Logistic 回り	单因素 Logistic 回归		多因素 Logistic 回归		
	OR	Р	OR	P		
形态学特征						
边缘	3.531(1.789~3.531)	<0.001	/	/		
分叶	30.398(9.990~92.500)	<0.001	25.465(6.988~92.797)	<0.001		
胸膜反应	3.154(1.607~6.189)	0.001	/	/		
空气支气管征	4.136(1.559~10.975)	0.004	/	/		
血管集束征	10.462(2.987~36.637)	<0.001	/	/		
DECT 定量参数						
Zeff_A	3.345(1.574~7.109)	0.002	/	/		
IC_A	2.582(1.648~4.043)	<0.001	/	/		
NIC_A	1.103(1.052~1.157)	<0.001	/	/		
Zeff_V	4.727(2.316~9.645)	<0.001	/	/		
$IC_V$	6.651(3.606~12.268)	<0.001	/	/		
NIC_V	1.114(1.076~1.153)	<0.001	1.100(1.062~1.139)	<0.001		

注:OR,比值比;Zeff\_A,动脉期有效原子序数;IC\_A,动脉期碘含量;NIC\_A,动脉期标准化碘含量;Zeff\_V,静脉期有效原子序数;IC\_V,静脉期 碘含量;NIC\_V,静脉期标准化碘含量。

表 4 Lung-RADS、各预测因子及组合模型的诊断效能

预测因子	AUC(95% CI)	敏感度	特异度	Cutoff	统计量8.	$P^{\&.}$
Lung-RADS(直径)	0.640(0.556~0.717)	61.8%	63.4%	$> 4 \mathrm{A}$	6.627	<0.001
边缘	0.652(0.570~0.729)	67.1%	63.4%	/	7.594	<0.001
分叶	0.794(0.720~0.856)	64.5%	94.4%	/	5.458	<0.001
胸膜反应	0.640(0.632~0.648)	63.2%	64.8%	/	7.495	<0.001
空气支气管征	0.596(0.512~0.676)	27.6%	91.6%	/	10.549	<0.001
血管集束征	0.637(0.553~0.714)	31.6%	95.8%	/	9.762	<0.001
Zeff_A	0.716(0.635~0.787)	63.2%	74.7%	>8.00	5.730	<0.001
IC_A	0.817(0.744~0.876)	69.7%	81.7%	>0.95	3.695	<0.001
NIC_A	0.825(0.754~0.883)	68.4%	84.5%	>10.19	3.648	<0.001
Zeff_V	0.761(0.684~0.828)	89.5%	63.4%	>8.05	4.875	<0.001
IC_V	0.889(0.827~0.935)	98.7%	76.1%	>0.95	2.556	0.011
NIC_V	0.888(0.826~0.934)	97.4%	78.9%	>19.06	2.508	0.012
组合模型	0.942(0.890~0.974)	90.8%	81.7%	>0.355	/	/

注:<sup>&</sup>和组合模型的 AUC 对比(Delong 检验)。

3.统计学分析

基于直径的 Lung-RADS 鉴别良恶性肺实性结节的 AUC 仅为 0.640(0.556~0.717)。在形态学特征中,分叶的 AUC 最高,为 0.794(0.720~0.856),但其敏感度较低,仅为 64.5%。在 DECT 定量参数中,IC\_V和 NIC\_V的 AUC 较高,分别为 0.889(0.827~0.935)及 0.888(0.826~0.934),但二者的特异度均较低,仅为 76.1%及 78.9%。组合模型在各方面均显示出较高的诊断效能,其 AUC、敏感度、特异度分别为 0.942(0.890~0.974)、90.8%及 81.7%。

Delong 检验显示,组合模型的诊断效能均优于基 于直径的 Lung-RADS 分级、单一形态学特征及 DECT 定量参数(P<0.05),见表4和图3。

## 讨 论

本研究探讨了 DECT 定量参数及形态学特征在 鉴别良恶性肺实性结节中的应用价值。结果显示, NIC\_V 和分叶是鉴别良恶性肺实性结节的独立预测 因子。基于二者构建的组合模型,其 AUC 为 0.942, 显著高于 Lung-RADS、单一形态学和 DECT 定量参

# 数(均 P<0.05)。

随着目前肺结节的检出率的升高,良恶性肺结节



**图**3 组合模型和单一形态学特征、DECT 定性参数的 ROC 曲线。

的判定对患者诊疗决策至关重要。对于怀疑良性肺结 节,应定期随诊,避免早期手术并发症对患者的影响。 而对于怀疑恶性肺结节,应早期手术干预并制定相应 的治疗方案,从而提高患者的预后。在临床工作中,放 射医师常根据 Lung-RADS 分级鉴别肺实性结节的良 恶性。Lung-RADS(版本 1.1)引入了体积对肺结节的 恶性风险进行分类<sup>[15]</sup>。因此本研究同时使用基于直 径和体积的 Lung-RADS 对肺实性结节进行分类。结 果显示,仅基于直径的 Lung-RADS 分类在良恶性肺 实性结节的组间差异有统计学意义(*P*=0.014),其 AUC 仅为 0.640、61.8%、63.4%,显著低于分叶、NIC\_ V 及组合模型。这表面基于直径的 Lung-RADS 分类 在鉴别良恶性肺实性结节的应用价值有限。

本研究纳入传统形态学特征鉴别良恶性肺实性结 节。单因素 Logistic 回归结果显示,结节的边缘、分 叶、胸膜反应、空气支气管征、血管集束征是鉴别良恶 性肺实性结节的预测因子,这与既往研究一致[16-20],但 这些特征的敏感度均较低(27.6%~67.1%),说明单 独形态学特征在良恶性肺结节之间有较大重叠。经过 多因素 Logistic 回归特征选择,仅分叶是鉴别良恶性 肺实性结节的独立预测因子,其AUC为0.796。肺部 恶性肿瘤分叶形成机制主要包括:一是肿瘤边缘细胞 分化程度不一、牛长速度不一:二是或受周围结构(如 血管或结缔组织)阻挡产生凹陷。然而,肺部良性病变 也可出现类似分叶的改变,主要因为肺部增值病变融 合形成。这也可能是分叶的特异度较高(94.4%)、敏 感性较低(64.5%)的原因。因此,单独的形态学在鉴 别良恶性肺实性结节的价值有限,需要联合其他定量 参数,以提高鉴别良恶性肺实性结节的诊断效能。

本研究基于既往研究的不足,综合分析了 DECT 定量参数在鉴别良恶性肺结节的应用价值。在 DECT 定量参数中,IC 能提供病灶对比剂的定量信息,可在 一定程度上反映病灶的微血管密度和血供情况[21],其 与 CT 灌注参数也存在明显的相关性<sup>[22]</sup>。Zeff 能反 映不同物质的原子构成情况,可用于反映肺结节的组 织密度<sup>[14]</sup>。既往的研究显示,IC能有效鉴别磨玻璃密 度结节腺癌的浸润性<sup>[23]</sup>,而 Zeff 能有效鉴别肺部转移 病变和良性病变、鉴别肺癌和肺转移瘤[14,24]。本文研 究结果显示,恶性肺实性结节动脉期和静脉期的 IC、 NIC 和 Zeff 均高于良性肺实性结节,差异有统计学意 义。这与以往的研究结果相似[9,10,12,25],这可能是由 于恶性肺结节的毛细血管内皮细胞疏松和基底膜不完 整,碘造影剂容易渗入细胞间隙。本研究还对比了 DECT 定量参数在鉴别良恶性肺实性结节中的诊断效 能。研究结果显示, IC\_V和 NIC\_V的 AUC(0.889、 0.888)均明显高于 Zeff\_A(0.716)、IC\_A(0.817)和 Zeff\_V(0.761),而 IC\_V 和 NIC\_V 的敏感性(0.987、 0.974)均明显高于 NIC\_A(0.684),这些结果提示 IC\_ V 和 NIC\_V 或许在鉴别良恶性肺实性结节方面具有 重要的应用价值。这可能是由于恶性肺结节微血管走 行曲折,造影剂流动缓慢,动脉期微血管不能充满造影 剂,静脉期造影剂可充盈微血管并进入细胞间隙<sup>[26]</sup>。 既往研究也显示,NIC\_V 在鉴别肺癌和炎症病灶中的 诊断效能高于 NIC\_A 或 IC\_A<sup>[10,22]</sup>,其研究结果与本 研究类似。多因素 Logistic 回归结果显示,仅 NIC\_V 是鉴别良恶性肺结节的独立预测因子,这可能是由于 IC\_V 和 NIC\_V 之间的相关性较高。

本研究创新性地纳入有意义的 DECT 定量参数 (NIC\_V)及形态学特征(分叶)构建组合模型,并评估 了其在鉴别良恶性肺实性结节的诊断价值。研究显 示,组合模型的 AUC 明显高于单一分叶或 NIC\_V,差 异有统计学意义(均 P<0.05)。这表明联合 DECT 定 量参数及形态学特征,能进一步提高良恶性肺实性结 节的鉴别诊断效能。此外,组合模型的诊断效能明显 优于临床常用的 Lung-RADS 分级(AUC:0.942 vs. 0.640)。表明合理使用组合模型,能够在临床工作中, 为患者提供更准确的肺实性结节的良恶性信息,从而 改善患者的预后。

本研究的局限性。首先,回顾性研究设计存在不 可避免的选择偏移。其次,本研究为单中心研究,需要 进一步的外部验证数据来检验结果的可重复性。最 后,本研究用 VNI 图像而不是真正的平扫图像来评估 结节大小。但一项有关肺肿瘤模型的体模研究表明, 在体积测量中,VNI 可以替代真正的平扫图像<sup>[27]</sup>。

综上所述,基于 NIC\_V 及分叶构建的组合模型, 在鉴别良恶性肺实性结节方面具有较高的诊断效能, 在临床工作中有良好的应用价值。

#### 参考文献:

- [1] 曹毛毛,陈万青.GLOBOCAN 2020 全球癌症统计数据解读[J].中 国医学前沿杂志(电子版),2021,13(3):63-69.
- [2] Siegel RL, Miller KD, Fuchs HE, et al. Cancer statistics, 2022[J].CA Cancer J Clin, 2022, 72(1): 7-33.
- [3] 孟瑞瑞,刘圆圆,青浩渺,等.肺癌高危人群低剂量螺旋 CT 筛查的 临床分析[J].放射学实践,2021,36(1):71-75.
- [4] 柳学国,李坤炜,陈欢,等.肺癌低剂量 CT 筛查中结节的分类与处 理[J].放射学实践,2017,32(1):21-27.
- [5] Chen N,Zhou M,Dong X, et al.Epidemiological and clinical characteristics of 99 cases of 2019 novel coronavirus pneumonia in Wuhan,China: a descriptive study [J].Lancet,2020,395(10223): 507-513.
- [6] Beig N,Khorrami M,Alilou M,et al.Perinodular and intranodular radiomic features on lung CT images distinguish adenocarcinomas from granulomas[J].Radiology,2019,290(3):783-792.
- [7] Chae EJ, Song JW, Krauss B, et al. Dual-energy computed tomo-

graphy characterization of solitary pulmonary nodules[J].J Thorac Imaging,2010,25(4):301-310.

- [8] 邱琳,徐一铭,仲艳,等.双能 CT 碘摄取对良恶性肺结节的鉴别诊 断价值[J].放射学实践,2021,36(5):596-600.
- [9] Wang G.Zhang C.Li M.et al.Preliminary application of high-definition computed tomographic Gemstone Spectral Imaging in lung cancer[J].J Comput Assist Tomogr,2014,38(1):77-81.
- [10] Hou WS, Wu HW, Yin Y, et al. Differentiation of lung cancers from inflammatory masses with dual-energy spectral CT imaging [J].Academic Radiol,2015,22(3):337-344.
- [11] Zhang Y, Cheng J, Hua X, et al. Can Spectral CT imaging improve the differentiation between malignant and benign solitary pulmonary nodules? [J].PloS One, 2016, 11(2); e0147537.
- [12] Reiter MJ, Winkler WT, Kagy KE, et al. Dual-energy computed tomography for the evaluation of enhancement of pulmonary nodules ≤3cm in size[J].J Thorac Imaging, 2017, 32(3):189-197.
- [13] 杨溪,刘杰克,李勇,等.人工、半自动及自动方法测量肺实性结节 直径和体积的一致性研究[J].中华放射学杂志,2022,56(1):43-49.
- [14] Ha T.Kim W, Cha J, et al. Differentiating pulmonary metastasis from benign lung nodules in thyroid cancer patients using dualenergy CT parameters[J].Eur Radiol,2022,32(3):1902-1911.
- [15] Silva M, Milanese G, Sestini S, et al. Lung cancer screening by nodule volume in Lung-RADS v1.1; negative baseline CT yields potential for increased screening interval[J].Eur Radiol,2021,31 (4):1956-1968.
- [16] 袁文秋,许爱莉,符建明.良恶性肺结节的 CT 薄层影像学特征及临床鉴别价值分析[J].影像研究与医学应用,2022,6(23):72-74.
- [17] 马赵,夏春华,王峻奇,等.孤立性肺结节 CT 征像在鉴别良恶性 结节中的价值[J].医学影像学杂志,2021,31(4):582-585.
- [18] Mcwilliams A, Tammemagi MC, Mayo JR, et al. Probability of cancer in pulmonary nodules detected on first screening CT[J].N

Engl J Med, 2013, 369(10): 910-919.

- [19] Cardinale L, Ardissone F, Novello S, et al. The pulmonary nodule:clinical and radiological characteristics affecting a diagnosis of malignancy[J].La Radiol Med,2009,114(6):871-889.
- [20] Mazzone PJ, Lam L. Evaluating the patient with a pulmonary nodule: a review[J].JAMA,2022,327(3):264-273.
- [21] Zopfs D. Reimer RP. Sonnabend K. et al. Intraindividual consistency of iodine concentration in dual-energy computed tomography of the chest and abdomen[J].Invest Radiol, 2021, 56(3): 181-187.
- [22] Kang HJ,Kim SH,Bae JS,et al.Can quantitative iodine parameters on DECT replace perfusion CT parameters in colorectal cancers? [J].Eur Radiol,2018,28(11):4775-4782.
- [23] Yang Y,Li K,Sun D, et al. Invasive pulmonary adenocarcinomas versus preinvasive lesions appearing as pure ground-glass nodules: differentiation using enhanced dual-source dual-energy CT [J].AJR,2019,213(3):W114-W122.
- [24] Deniffel D, Sauter A, Fingerle A, et al. Improved differentiation between primary lung cancer and pulmonary metastasis by combining dual-energy CT-derived biomarkers with conventional CT attenuation[J].Eur Radiol,2021,31(2):1002-1010.
- [25] Zhu B, Zheng S, Jiang T, et al. Evaluation of dual-energy and perfusion CT parameters for diagnosing solitary pulmonary nodules [J]. Thorac Cancer, 2021, 12(20): 2691-2697.
- [26] Zhang Z, Zou H, Yuan A, et al. A single enhanced dual-energy CT scan may distinguish lung squamous cell carcinoma from adenocarcinoma during the venous phase [J]. Acad Radiol, 2020, 27 (5):624-629.
- [27] Hering DA, Kroger K, Bauer RW, et al. Comparison of virtual non-contrast dual-energy CT and a true non-contrast CT for contouring in radiotherapy of 3D printed lung tumour models in motion:a phantom study[J].Br J Radiol,2020,93(1116):20200152. (收稿日期:2022-10-18 修回日期:2023-04-14)