

双能量 CT 定量参数预测含实性成分肺结节浸润性腺癌的气腔播散

张涛, 何长久, 刘杰克, 青浩渺, 周鹏, 胡仕北, 潘浩

【摘要】 目的:探讨双能 CT(DECT)定量参数对表现为含实性成分肺结节的浸润性腺癌发生气腔播散的预测价值。**方法:**回顾性搜集 2021 年 4 月—2025 年 4 月在本院检出含实性成分肺结节(包括部分实性结节和实性结节)且经病理证实为浸润性腺癌的 378 例患者的术前临床和双期增强 DECT 资料。根据术后病理评估结果,将患者分为气腔播散组($n=237$)和无气腔播散组($n=141$)。比较两组的临床特征、传统 CT 特征和 DECT 定量参数值的差异,DECT 参数主要包括动脉(A)、静脉期(V)能谱曲线斜率(λ HU_A、 λ HU_V)、有效原子序数(Zeff_A、Zeff_V)、电子云密度(Rho_A、Rho_V)、碘含量(IC_A、IC_V)和标准化碘含量(NIC_A、NIC_V)。应用多因素 Logistic 回归方法构建临床-传统 CT 模型、DECT 定量参数模型和联合模型,采用 ROC 曲线分析各模型的诊断效能。**结果:**两组间性别构成及结节类型、毛刺、胸膜凹陷征、空气支气管征和血管束征出现率的差异均有统计学意义($P<0.05$);气腔播散组的实性成分的最大径、占比(CTR)、CT 值、Zeff_A、Zeff_V、Rho_A 和 Rho_V 值均显著高于无播散组,而 λ HU_A、 λ HU_V、IC_A、NIC_A 值均显著低于阴性组,差异均有统计学意义($P<0.05$)。DECT 模型(纳入的特征为 Rho_V 和 NIC_A)、联合模型(纳入的特征为空气支气管征、Rho_V 和 NIC_A)及临床-传统 CT 模型(纳入的特征为性别、CT 值和空气支气管征)预测气腔播散的曲线下面积(AUC)分别为 0.810(95%CI:0.767~0.848)、0.814(95%CI:0.771~0.852)和 0.774(95%CI:0.728~0.815)。DECT 模型和联合模型的 AUC 均显著高于临床-传统 CT 模型($Z=2.190, P=0.029; Z=2.706, P=0.007$)。与 DECT 模型相比,联合模型并不能明显提高 AUC($Z=0.751, P=0.453$)。**结论:**基于 DECT 参数(Rho_V 和 NIC_A)构建的预测模型可能有助于预测表现为含实性成分肺结节的浸润性腺癌是否发生气腔播散。

【关键词】 双能量 CT;定量参数;含实性成分肺结节;浸润性腺癌;气腔播散

【中图分类号】 R814.42;R734.2 **【文献标志码】** A **【文章编号】** 1000-0313(2026)04-0397-07

DOI:10.13609/j.cnki.1000-0313.2026.04.007

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Dual-energy CT quantitative parameters for predicting spread through air spaces in invasive adenocarcinoma in pulmonary nodules with solid components ZHANG Tao, HE Chang-Jiu, LIU Jie-ke, et al. Department of Radiology, Sichuan Clinical Research Center for Cancer, Sichuan Cancer Hospital & Institute, Sichuan Cancer Center, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610041, China

【Abstract】 Objective: To explore the value of dual-energy CT (DECT) quantitative parameters in predicting the occurrence of spread through air spaces (STAS) in invasive adenocarcinoma manifesting as pulmonary nodules with solid components. **Methods:** Preoperative clinical and dual-phase enhanced DECT imaging data of 378 patients with pulmonary nodules with solid components (part-solid and solid nodules) which were pathologically confirmed as invasive adenocarcinoma were retrospectively collected from April 2021 to April 2025. All patients were divided into a negative group ($n=237$) and a positive group ($n=141$) according to the status of STAS assessed by postoperative pathology. The clinical features, traditional CT features, and DECT quantitative parameters [slope of spectral curve (λ HU_A and λ HU_V), effective atomic number (Zeff_A and Zeff_V), electron density (Rho_A and Rho_V), iodine concentration (IC_A and IC_V), and normalized iodine concentration (NIC_A and NIC_V) in arterial and venous phases] were compared between two groups. The clinical-traditional CT model, DECT quantitative parameter model, and combined CT model were constructed with the multi-variable logistic regression. The diagnostic performance of the model was analyzed using the ROC curve. **Results:** Significant differences in gender composition and occurrence rates of nodule type, spiculation, pleural indentation sign, air bronchogram sign, and vascular convergence sign were found between the two groups (all $P<0.05$). The STAS-positive group showed significantly higher maximum diameter of solid component, consolidation-to-tumor ratio (CTR), CT value, Zeff_A, Zeff_V, Rho_A, and Rho_V and significantly lower λ HU_A, λ HU_V, IC_A, and NIC_A than those of the STAS-negative group (all $P<0.05$). For predicting the STAS, the area under the curves (AUCs) of the DECT model (including features: Rho_V and

作者单位: 610041 四川成都, 四川省肿瘤医院研究所/四川省肿瘤临床医学研究中心/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: 张涛(1995—), 男, 四川冕宁人, 本科, 主管技师, 主要从事胸部肿瘤影像诊断工作。

通讯作者: 潘浩, E-mail: 519778825@qq.com

NIC_A), the combined CT model (including features: air bronchogram sign, Rho_V, and NIC_A), and the clinical-traditional CT model (including features: gender, CT value, and air bronchogram sign) were 0.810 (95% CI: 0.767~0.848), 0.814 (95% CI: 0.771~0.852), and 0.774 (95% CI: 0.728~0.815), respectively. The AUC of the DECT model ($Z=2.190, P=0.029$) and the combined CT model ($Z=2.706, P=0.007$) were significantly higher than those of the clinical-traditional CT model. The combined CT model did not significantly improve the AUC compared with the DECT model ($Z=0.751, P=0.453$). **Conclusion:** The DECT model constructed by Rho_V and NIC_A may be helpful in predicting the occurrence of STAS in invasive adenocarcinoma in pulmonary nodules with solid components.

【Key words】 Dual-energy CT; Quantitative parameters; Pulmonary nodules with solid components; Invasive adenocarcinoma; Spread through air spaces

腺癌是常见的肺癌病理类型^[1-2]。气腔播散指肺癌肿瘤细胞以单个细胞、微乳头状细胞簇或实性癌巢等方式扩散至肿瘤周围的肺泡腔,是肺癌侵袭的一种方式^[3]。在 CT 图像上表现为含实性成分肺结节(包括部分实性结节和实性结节)的浸润性腺癌可发生气腔播散,而表现为纯磨玻璃结节的浸润性肺腺癌则很少发生气腔播散^[4]。既往有研究显示,发生气腔播散的肺癌患者的无复发生存率和总体生存率明显低于未发生气腔播散的肺癌患者^[5-7]。因此,对表现为含实性成分肺结节的浸润性腺癌是否发生气腔播散进行术前预测具有重要临床价值。

双能量 CT(dual-energy CT, DECT)定量参数中,碘含量(iodine concentration, IC)、标准化碘含量(normalized IC, NIC)和有效原子序数(effective atomic number, Zeff)能够较好地鉴别良性与恶性肺实性结节^[8],能谱曲线斜率(slope of spectral curve, λ HU)能够较好地预测低分化浸润性肺腺癌^[9],电子云密度(electron density, Rho)能够预测高危亚实性肺结节^[10]。但较少有研究者应用 DECT 定量参数对表现为含实性成分肺结节的浸润性腺癌是否发生气腔播散进行预测。因此,本研究旨在探讨 DECT 定量参数对表现为含实性成分肺结节的浸润性腺癌发生气腔播散的预测价值。

材料与方法

1. 研究对象

本研究为回顾性研究。将 2021 年 4 月—2025 年 4 月在本院行术前 DECT 扫描且经病理证实为浸润性肺腺癌的 378 例患者纳入本研究。纳入标准:①CT 图像显示肺结节病灶内部分/全部为实性;②于术前两周内行双期 DECT 扫描;③术后病理证实为浸润性肺腺癌。排除标准:①结节直径大于 30 mm;②DECT 检查前有抗肿瘤治疗史;③反映气腔播散情况的相关病理资料不完整;④CT 图像伪影严重。

2. 图像采集

使用 Siemens Somatom Definition Flash CT 扫描仪进行胸部 DECT 扫描。首先经肘正中静脉以 2.5~3.0 mL/s

的流率注入 90 mL 对比剂碘普罗胺(370 mg I/mL),随后以相同流率注入 30 mL 生理盐水。采用对比剂追踪技术,在肺动脉主干层面的升主动脉处放置监测 ROI,当阈值达 100 HU 后延迟 5 s 采集动脉期图像,动脉期扫描完成后延迟 30 s 采集静脉期图像。DECT 扫描参数:80/Sn140kV,参考管电流 205/87 mAs,0.28 s/r,螺距 0.55,准直器宽度 64×0.6 mm,开启 CARE Dose 4D 自动管电流调制技术。

3. 图像后处理

在 Siemens SyngoVia 后处理工作站重建双期虚拟单能量图像(40、100 keV)和动脉期虚拟平扫(virtual non-contrast, VNC)图像。重建参数:层厚 0.5 mm,层间距 0.5 mm,视野 350 mm×350 mm,正弦图确定迭代重建(sinogram affirmed iterative reconstruction, SAFIRE)算法(level 4),卷积核 Q30f,矩阵 512×512。

4. 评估常规 CT 特征

由一位具有 12 年胸部诊断经验的医师在动脉期 VNC 图像(窗宽 1500 HU,窗位-500 HU)中选取结节的最大层面测量结节的 CT 值、最大长径及其垂直径和实性成分最大径。测量时 ROI 应尽可能大,但需避开周围血管、支气管和坏死区域。然后采用以下公式计算结节的实性成分占比(consolidation-to-tumor ratio, CTR)和直径:

$$\text{CTR} = \text{实性成分最大径} / \text{最大长径} \quad (1)$$

$$\text{直径} = (\text{最大长径} + \text{垂直径}) / 2 \quad (2)$$

由 2 位分别具有 7 和 12 年胸部诊断经验的医师评估结节的形态学特征,主要包括结节类型、分叶、毛刺、胸膜凹陷征、空气支气管征、空泡征和血管集束征。当评估结果不一致时,由另外一位具有 27 年胸部诊断经验的高级医师进行分析和确认。

5. DECT 定量参数

由上述 2 位医师在 Syngo Via 后处理工作站上,分别在各序列重建图像上独立测量和计算结节的各项 DECT 定量参数:动、静脉期图像上的 λ HU(λ HU_A、 λ HU_V)、Zeff(Zeff_A、Zeff_V)、Rho(Rho_A、Rho_V)、IC(IC_A、IC_V)和 NIC(NIC_A、NIC_V)。其中,

$\lambda\text{HU} = (\text{CT 值}_{40\text{keV}} - \text{CT 值}_{100\text{keV}}) / 60$, $\text{NIC} = \text{IC}_{\text{肺结节}} / \text{IC}_{\text{主动脉}} \times 100\% [11]$ 。测量时选择横轴面图像中结节最大层面, ROI 应尽可能大, 但需避开周围血管、支气管和坏死区域。同时, 测量时采用复制和粘贴功能, 使不同序列重建图像上测量 ROI 的位置及大小尽量一致, 以保证数据的可比性和准确性。

6. 一致性检验

随机选择 40 例患者, 由两位医师分别测量肺结节的各项 DECT 定量参数。然后评估观察者之间测量结果的一致性。

7. 统计学分析

使用 R4.4.1 语言和 Medcalc 18.2.1 软件进行统计学分析。采用 χ^2 检验、Mann-Whitney U 检验或独立样本 t 检验比较两组间计数资料和计量资料的差异。采用组内相关系数 (intraclass correlation coefficient, ICC) 评估观察者之间 DECT 定量参数测量结果的一致性。采用单因素及多因素 Logistic 回归分析 (向后逐步选择法) 筛选浸润性肺腺癌发生气腔播散的独立预测因素, 并构建临床-传统 CT 模型、DECT 模型和联合模型。采用 Spearman 相关性分析评估特征间的相关性。采用 ROC 曲线下面积 (AUC) 评估模型的诊断效能。采用 DeLong 检验比较模型间 AUC 值的差异。以双侧 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

结果

1. 结节的临床及传统 CT 特征

本研究最终纳入 378 例患者, 其中无气腔播散组 237 例, 气腔播散组 141 例。两组患者临床资料和传统 CT 特征的比较结果见表 1。临床特征中, 性别

构成在两组间的差异有统计学意义 ($P < 0.001$), 而年龄的组间差异无统计学意义 ($P = 0.122$)。传统 CT 特征中, 气腔播散组的实性成分最大径、CTR 和 CT 值明显高于无气腔播散组, 差异均有统计学意义 ($P < 0.05$); 两组间结节类型、毛刺、胸膜凹陷征、空气支气管征和血管束束征出现率的差异均有统计学意义 ($P < 0.05$); 而结节直径及分叶征和空泡征出现率的差异无统计学意义 ($P > 0.05$)。

2. 结节的 DECT 定量参数

两组之间结节 DECT 定量参数的比较结果见表 2。气腔播散组的 λHU_A 、 λHU_V 、 IC_A 和 NIC_A 值明显低于无气腔播散组, 而 Zeff_A 、 Zeff_V 、 Rho_A 和 Rho_V 值明显高于无气腔播散组, 差异均有统计学意义 ($P < 0.05$); 两组间 IC_V 和 NIC_V 值的差异无统计学意义 ($P > 0.05$)。示例图见图 1~2。

两位观察者测量的 λHU_A 、 λHU_V 、 Zeff_A 、 Zeff_V 、 Rho_A 、 Rho_V 、 IC_A 、 IC_V 、 NIC_A 和 NIC_V 值的 ICC 分别为 0.846、0.778、0.920、0.882、0.925、0.930、0.917、0.826、0.886 和 0.904, ICC 均大于 0.750, 均显示出较高的一致性。

3. 模型的构建

临床-传统 CT 模型: 单因素 Logistic 回归分析显示, 性别、实性成分最大径、CTR、CT 值、结节类型、毛刺、胸膜凹陷征、空气支气管征和血管束束征为浸润性肺腺癌气腔播散的独立预测因素 (P 均 < 0.05)。将上述特征行 Spearman 相关性分析, 剔除相关系数 > 0.90 的特征 (结节类型) 以降低特征间的共线性。将剩余的 8 个特征纳入多因素 Logistic 回归分析, 结果显示, 性别、CT 值和空气支气管征是浸润性肺腺癌气腔

表 1 气腔播散阴性组和阳性组的临床和传统影像特征的比较

特征	无气腔播散组 (n=237)	气腔播散组 (n=141)	统计量	P 值
性别/例			13.647 ^a	<0.001
男	68	67		
女	169	74		
年龄/岁	58.0(53.0, 68.0)	60.0(54.0, 68.0)	-1.548 ^b	0.122
直径/mm	17.2±5.7	18.2±5.8	-1.611 ^c	0.108
实性成分				
最大径/mm	12.5±7.2	17.6±6.9	-6.810 ^c	<0.001
CTR	61.7%(40.1%, 100.0%)	100.0%(92.6%, 100.0%)	-7.993 ^b	<0.001
CT 值/HU	-192.0(-391.1, 6.9)	29.7(-21.2, 42.3)	-8.245 ^b	<0.001
结节类型/例			57.419 ^a	<0.001
部分实性	156	36		
实性	81	105		
分叶/例	202	125	0.886 ^a	0.347
毛刺/例	53	60	17.196 ^a	<0.001
胸膜凹陷征/例	167	121	11.485 ^a	0.001
空气支气管征/例	97	40	6.035 ^a	0.014
空泡征/例	35	21	0.001 ^a	0.973
血管束束征/例	105	83	7.498 ^a	0.006

注:^a 为 χ^2 值, ^b 为 Z 值, ^c 为 t 值。

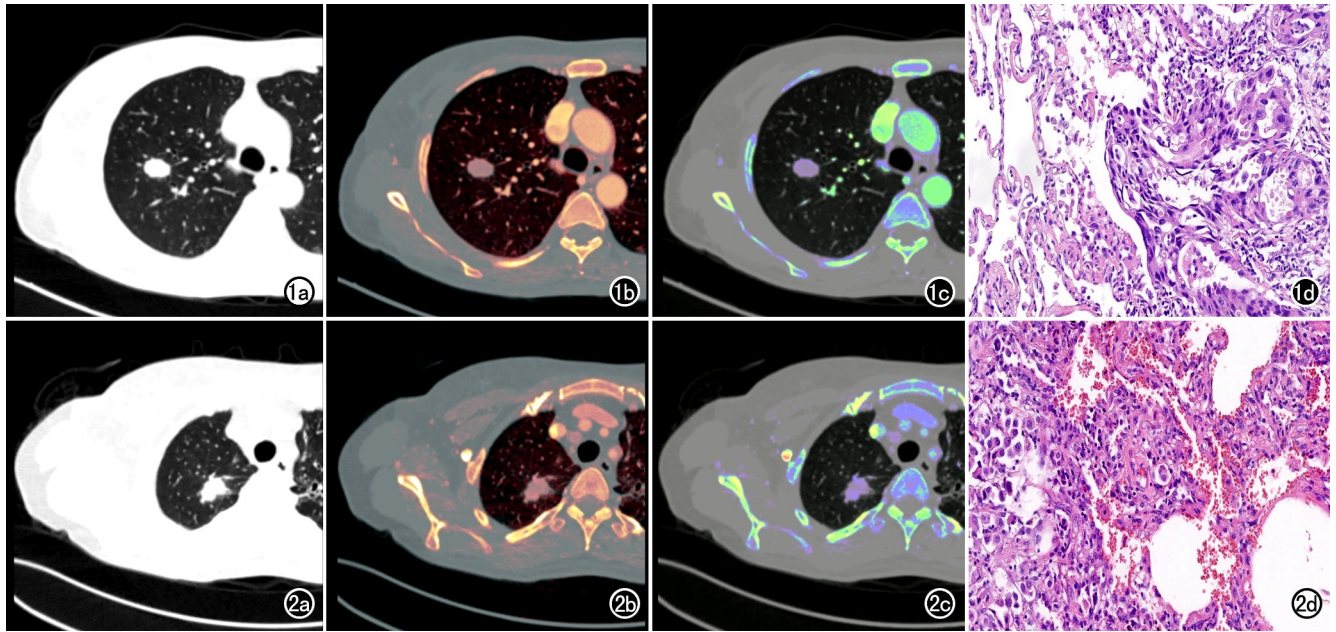


图 1 含实性成分的浸润性腺癌无气腔播散患者,女,51 岁。a) 静脉期虚拟平扫图像;b) 静脉期碘图;c) 静脉期有效原子序数图;d) 病理图镜下示气腔内无明显播散。图 2 含实性成分浸润性腺癌伴有气腔播散患者,女,67 岁。a) 静脉期虚拟平扫图像;b) 静脉期碘图;c) 静脉期有效原子序数图;d) 病理图镜下示气腔内可见肿瘤细胞。

表 2 气腔播散阴性组和阳性组 DECT 定量参数的比较

指标	无气腔播散组 (n=237)	气腔播散组 (n=141)	统计量	P 值
λ HU_A	2.1(1.5,2.9)	1.6(1.1,2.2)	-5.323 ^a	<0.001
λ HU_V	2.6±0.9	2.4±0.8	2.193 ^b	0.029
Zeff_A	7.9(6.9,8.2)	8.0(7.7,8.3)	-2.359 ^a	0.018
Zeff_V	8.1(7.1,8.6)	8.4(8.1,8.7)	-3.897 ^a	<0.001
Rho_A /HU	-189.0(-377.4,7.3)	31.0(-21.5,42.0)	-8.301 ^a	<0.001
Rho_V /HU	-179.7(-366.5,9.9)	34.4(-33.6,45.3)	-9.001 ^a	<0.001
IC_A /mg/mL	1.4(1.0,2.0)	1.1(0.6,1.5)	-5.244 ^a	<0.001
IC_V /mg/mL	1.9(1.4,2.5)	1.9(1.4,2.3)	-0.267 ^a	0.789
NIC_A	14.6%(9.3%,19.4%)	10.0%(6.0%,14.1%)	-5.937 ^a	<0.001
NIC_V	33.3%(23.5%,43.7%)	32.7%(26.3%,42.3%)	-0.176 ^a	0.861

注:^a 为 Z 值,^b 为 t 值。

播散的独立危险因素(表 3),基于这 3 个变量构建的临床-传统 CT 模型的计算公式: $\ln[P/(1-P)] = 0.622 - 0.575 \times \text{性别(女)} + 0.005 \times \text{CT 值} - 0.597 \times \text{空气支气管征(有)}$ 。其中 P 是预测浸润性肺腺癌气腔播散的概率,截断值为 0.444。

DECT 模型:单因素 Logistic 回归分析显示,性别、 λ HU_A、 λ HU_V、Zeff_A、Zeff_V、Rho_A、Rho_V、IC_A 和 NIC_A 为浸润性肺腺癌气腔播散的独立预测因素(P 均 < 0.05)。将上述特征行 Spearman 相关性分析,剔除相关系数 > 0.90 的特征(Rho_A 和 IC_A)。然后将剩余的特征纳入多因素 Logistic 回归分析,结果显示:Rho_V 和 NIC_A 是浸润性肺腺癌气腔播散的独立预测因素(表 3);构建的 DECT 模型的计算公式为 $\ln P/(1-P) = 1.450 + 0.006 \times \text{Rho}_V - 0.106 \times \text{NIC}_A$ 。其中 P 的截断值为 0.281。

联合模型:将临床-传统 CT 模型和 DECT 模型中的独立预测因素(性别、CT 值、空气支气管征、Rho_V 和 NIC_A)行 Spearman 相关性分析,剔除相关系数 > 0.90 的特征(CT 值)以降低特征间的共线性。然后将剩余的特征纳入多因素 Logistic 回归分析,结果显示:空气支气管征、Rho_V 和 NIC_A 是浸润性肺腺癌气腔播散的独立预测因素(表 3);所构建的联合模型的表达式为 $\ln P/(1-P) = 1.614 - 0.520 \times \text{空气支气管征} + 0.006 \times \text{Rho}_V - 0.104 \times \text{NIC}_A$ 。P 的截断值为 0.485。

4. 模型诊断效能的评估

对各模型诊断效能的评估及比较结果见表 4 和图 3。DECT 模型、联合模型和临床-传统 CT 模型的 AUC 分别为 0.810(95% CI: 0.767~0.848)、0.814(95% CI: 0.771~0.852)和 0.774(95% CI: 0.728~

表 3 筛选气腔播散预测因素的 Logistic 回归分析结果

指标/征象	单因素 Logistic 回归		多因素 Logistic 回归	
	OR(95%CI)	P 值	OR(95%CI)	P 值
临床-传统 CT 模型				
性别 ^a	0.444 (0.288~0.686)	<0.001	0.563(0.348~0.910)	0.019
最大径实性成分	1.102(1.068~1.136)	<0.001		
CTR	1.037(1.027~1.047)	<0.001		
CT 值	1.006(1.004~1.007)	<0.001	1.005(1.004~1.007)	<0.001
结节类型 ^b	5.617(3.532~8.934)	<0.001		
毛刺 ^c	2.572(1.636~4.043)	<0.001		
胸膜凹陷征 ^d	2.536(1.464~4.392)	0.001		
空气支气管征 ^e	0.572(0.365~0.895)	0.015	0.551(0.337~0.899)	0.017
血管束束征 ^f	1.799(1.180~2.744)	0.006		
DECT 定量模型				
性别 ^a	0.444(0.288~0.686)	<0.001		
λHU_A	0.527(0.409~0.679)	<0.001		
λHU_V	0.768(0.597~0.968)	0.039		
Zeff_A	1.470(1.163~1.858)	0.001		
Zeff_V	1.762(1.368~2.269)	<0.001		
Rho_A	1.006(1.004~1.007)	<0.001		
Rho_V	1.006(1.004~1.008)	<0.001	1.006(1.004~1.007)	<0.001
IC_A	0.433(0.311~0.604)	<0.001		
NIC_A	0.901(0.869~0.934)	<0.001	0.899(0.865~0.935)	<0.001
联合模型				
性别 ^a	0.444(0.288~0.686)	<0.001		
CT 值	1.006(1.004~1.007)	<0.001		
空气支气管征 ^e	0.572(0.365~0.895)	0.015	0.595 (0.354~0.998)	0.049
Rho_V	1.006(1.004~1.008)	<0.001	1.006 (1.004~1.007)	<0.001
NIC_A	0.901(0.869~0.934)	<0.001	0.901 (0.867~0.937)	<0.001

注：^a以男性为参考，^b以部分实性结节为参考，^c以无毛刺为参考，^d以无胸膜凹陷征为参考，^e以无空气支气管征为参考，^f以无血管束束征为参考。

表 4 模型诊断效能的比较

模型类型	AUC(95%CI)	敏感度	特异度	截断值	P 值*	P 值 [#]
DECT 模型	0.810 (0.767~0.848)	0.844	0.637	0.281	—	0.453
联合模型	0.814 (0.771~0.852)	0.681	0.823	0.485	0.453	—
临床-传统 CT 模型	0.774 (0.728~0.815)	0.688	0.760	0.444	0.029	0.007

注：* 与 DECT 模型的 AUC 比较，[#] 与联合模型的 AUC 比较。

0.815)。DECT 模型和联合模型的 AUC 明显高于临床-传统 CT 模型($Z = 2.190, P = 0.029; Z = 2.706, P = 0.007$)；与 DECT 模型相比，联合模型并不能显著提高 AUC($Z = 0.751, P = 0.453$)。此外，DECT 模型的 AUC 明显高于性别(AUC = 0.594, 95% CI: 0.543~0.644, $P < 0.001$)、CT 值(AUC = 0.753, 95% CI: 0.707~0.796, $P < 0.001$)、空气支气管征(AUC = 0.563, 95% CI: 0.511~0.613, $P < 0.001$)、Rho_V (AUC = 0.777, 95% CI: 0.731~0.818, $P < 0.001$)和 NIC_A (AUC = 0.683, 95% CI: 0.633~0.729, $P = 0.027$)。当截断值为 0.281 时，DECT 模型的敏感度和特异度分别为 84.4% 和 63.7%。

讨论

本研究主要探讨了 DECT 定量参数对表现为含实性成分肺结节的浸润性腺癌发生气腔播散的预测价值，并基于传统 CT 特征和 DECT 定量参数构建了 3 个模型，包括 DECT 模型(特征：Rho_V 和 NIC_A)、

临床-传统 CT 模型(特征：性别、CT 值和空气支气管征)和联合模型(特征：空气支气管征、Rho_V 和 NIC_A)。其中，DECT 模型和联合模型的诊断效能明显高于临床-传统 CT 模型(P 均 < 0.05)。与 DECT 模型相比，联合模型不能提高诊断效能($P = 0.453$)。

气腔播散与肺腺癌患者的不良预后密切相关。发生气腔播散的肺癌患者的 5 年无复发生存率为 66.1%，显著低于无气腔播散肺癌患者的 91.8%^[6]；此外，发生气腔播散的肺癌患者需要行肺叶切除术和辅助化疗以改善预后^[12-13]。因此，术前预测含实性成分肺结节浸润性腺癌的气腔播散可能有助于指导诊疗决策和预测患者的预后。既往研究显示，CT 影像组学特征和 18 氟-脱氧葡萄糖(¹⁸F-FDG)PET-CT 有助于预测肺腺癌的气腔播散^[14-15]，但影像组学特征提取过程相对复杂，需要额外的分析软件，且可解释性欠佳。而¹⁸F-FDG PET-CT 的费用和辐射剂量相对较高，在一定程度上限制了 CT 影像组学和¹⁸F-FDG PET/CT 的临床应用。DECT 定量参数提取过程相对便捷，在

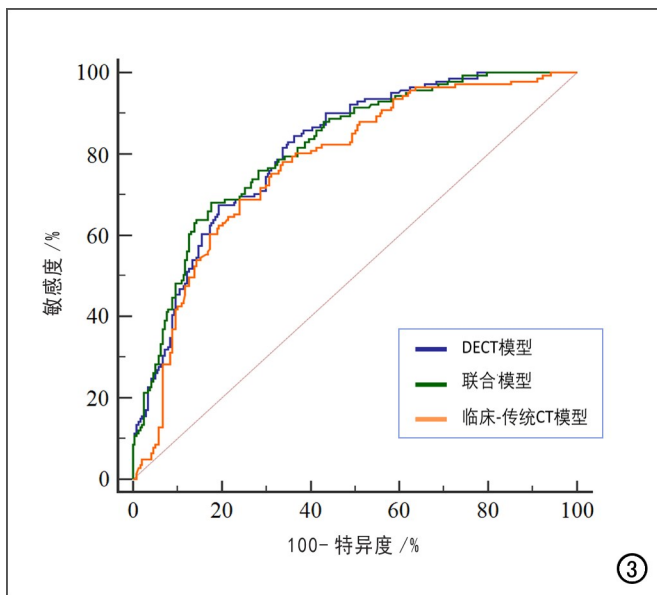


图3 DECT模型、联合模型和临床-传统CT模型预测气腔播散的ROC曲线,显示DECT模型和联合模型的AUC明显高于临床-传统CT模型。

肺结节疾病的诊断中具有一定的价值^[10,16]。但目前较少有研究采用DECT定量参数预测含实性成分肺结节浸润性腺癌气腔播散的价值。

本研究中构建的临床-传统CT模型中,性别(以男性为参考)、CT值(°)和空气支气管征(以无空气支气管征为参考)是浸润性肺腺癌气腔播散的独立预测因素。男性、结节CT值越大和无空气支气管征的患者更易发生气腔播散。既往研究发现,非小细胞肺癌气腔播散阳性组与阴性组的性别构成有显著差异,气腔播散阳性组的CT值 $[31.2(-104.4,55.3)\text{HU}]$ 明显高于阴性组 $[-293.4(-462.9,-82.7)\text{HU}]$ ^[17],CT值(OR=1.022)有助于预测含肺实性结节的浸润性腺癌的分化级别^[9],空气支气管征(OR=0.58)有助于预测肺腺癌的气腔播散^[4]。这均与本文研究结果类似。还有研究发现,CTR(OR=24.208)有助于预测肺腺癌的气腔播散^[18],但在本研究中,CTR不是浸润性肺腺癌气腔播散的独立预测因素。这种差异可能与纳入的肺结节类型不同有关,之前的研究纳入了纯磨玻璃结节、部分实性结节和实性结节^[18],而本研究分析的是部分实性结节和实性结节。

本研究中构建的DECT模型中,Rho_V和NIC_A是浸润性肺腺癌气腔播散的独立预测因素。说明Rho_V值越大、NIC_A值越小的结节更易发生气腔播散。Rho能够反映单位体积的电子密度,与物质的密度线性相关^[19]。高级别肿瘤因其恶性程度和侵袭性相对较高,肿瘤密度较高^[20],导致Rho值增加,因此,本研究中气腔播散阳性组的Rho_A、Rho_V均明

显高于阴性组。IC能够反映肿瘤组织的血供情况^[8]。高级别肿瘤具有更致密的纤维化肿瘤微环境,阻碍了血流灌注,从而导致NIC降低^[21]。因此,本研究中浸润性肺腺癌气腔播散阳性组较阴性组显示了更低的NIC_A。研究表明,Rho(OR=1.031)有助于预测低分化的肺实性结节腺癌^[9],NIC有助于预测肺实性腺癌的气腔播散(AUC=0.83)^[22]。这与本研究结果类似。与既往的研究结果相比^[22],本研究的优势在于样本量相对较大,且纳入了部分实性肺结节进行分析。

本研究中进一步构建了基于传统影像特征和DECT定量参数的联合模型。结果显示,空气支气管征、Rho_V和NIC_A是浸润性肺腺癌气腔播散的独立预测因素。在诊断效能方面,DECT模型(AUC=0.810)和联合模型的诊断效能(AUC=0.814)明显高于临床-传统CT模型(AUC=0.774),差异有统计学意义(P 均 <0.05)。但与DECT模型相比,联合模型并不能进一步提高诊断效能($P=0.453$)。此外,DECT模型的诊断效能明显高于单一的独立预测因素(P 均 <0.05)。提示DECT定量参数或许有助于预测浸润性肺腺癌的气腔播散。

本研究的局限性:①为单中心回顾性研究,不可避免存在一定的选择偏倚,但本研究的样本量相对较大,或许能为后续相关研究提供一定的参考价值;②本研究选择的病理类型均为浸润性腺癌,未来可纳入更多病理类型的肺癌进行分析;③本研究未采用内部验证方法(如交叉验证)对模型效能进行评估。

综上所述,Rho_V和NIC_A是浸润性肺腺癌气腔播散的独立预测因素,基于上述特征构建的DECT模型,可能有助于预测含实性成分肺结节浸润性肺腺癌的气腔播散。

参考文献:

- [1] 张榕,蔡宏杰,梁演婷,等.可视化影像决策模型在评估肺结节浸润程度中的价值[J].放射学实践,2024,39(8):1032-1039.
- [2] 甘雄辉,潘永军,罗艳梅,等.肺结节CT可视影像学特征评分预测病理性质的诊断价值[J].放射学实践,2023,38(6):709-714.
- [3] Wang Y,Liu X,Zhao X,et al.A radiomics-based machine learning model and SHAP for predicting spread through air spaces and its prognostic implications in stage I lung adenocarcinoma: a multi-center cohort study[J].Cancer Imaging,2025,25(1):e115[2025 Sep 29].DOI:10.1186/s40644-025-00935-4.
- [4] Kim SK, Kim TJ, Chung MJ, et al. Lung adenocarcinoma: CT features associated with spread through air spaces[J]. Radiology, 2018,289(3):831-840.
- [5] Zheng Y, Han X, Li H, et al. A validated model to predict spread through air space in lung adenocarcinoma[J]. J Thorac Dis, 2024, 16(4):2296-2313.
- [6] Lee J, Cho S, Chung JH, et al. Prognosis of spread through air spaces in invasive mucinous lung adenocarcinoma after curative

- surgery[J/OL]. *Eur J Surg Oncol*, 2024, 50(4): e108053 [2024 Apr]. DOI:10.1016/j.ejso.2024.108053.
- [7] Chen Z, Wu X, Fang T, et al. Prognostic impact of tumor spread through air spaces for T2aN0 stage IB non-small cell lung cancer [J]. *Cancer Med*, 2023, 12(14): 15246-15255.
- [8] He C, Liu J, Li Y, et al. Quantitative parameters of enhanced dual-energy computed tomography for differentiating lung cancers from benign lesions in solid pulmonary nodules [J/OL]. *Front Oncol*, 2022, 12: e1027985 [2022 Oct 6]. DOI: 10.3389/fonc.2022.1027985.
- [9] 何长久, 刘杰克, 青浩渺, 等. DECT 定量参数联合形态学特征预测肺实性结节浸润性非黏液腺癌的分化程度 [J]. *临床放射学杂志*, 2025, 44(4): 638-644.
- [10] 何长久, 青浩渺, 李勇, 等. 联合双能量 CT 和传统影像特征鉴别高危和低危肺亚实性结节 [J]. *临床放射学杂志*, 2025, 44(5): 850-855.
- [11] Liu K, Cao Y, Gao Y, et al. Utilizing spectral detector computed tomography quantitative parameters via multimodality tumor tracking to predict occult lymph node metastasis in clinical stage 1 pure solid lung adenocarcinoma [J]. *J Thorac Dis*, 2025, 17(5): 2912-2925.
- [12] Huang L, Petersen RH. Tumour spread through air spaces is a determiner for treatment of clinical stage I non-small cell lung Cancer: Thoracoscopic segmentectomy vs lobectomy [J/OL]. *Lung Cancer*, 2025, 201: e108438 [2025 Mar]. DOI: 10.1016/j.lungcan.2025.108438.
- [13] Du H, Li X, Wang Y, et al. Benefit of adjuvant chemotherapy for resected stage I lung cancer with spread through air spaces: a systematic review and meta-analysis [J/OL]. *Eur J Surg Oncol*, 2025, 51(8): e110104 [2025 Aug]. DOI: 10.1016/j.ejso.2025.110104.
- [14] Dong H, Li Y, Zhao L, et al. Consensus clustering based on CT radiomics has potential for risk stratification of patients with clinical T1 stage lung adenocarcinoma [J/OL]. *BMC Med Imaging*, 2025, 25(1): e231 [2025 Jul 1]. DOI: 10.1186/s12880-025-01795-x.
- [15] Nishimori M, Iwasa H, Miyatake K, et al. ¹⁸F FDG-PET/CT analysis of spread through air spaces (STAS) in clinical stage I lung adenocarcinoma [J]. *Ann Nucl Med*, 2022, 36(10): 897-903.
- [16] 林礼波, 何长久, 刘杰克, 等. 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 [J]. *放射学实践*, 2023, 38(11): 1392-1398.
- [17] 吴艳, 刘艳, 王健, 等. 早期 ≤30mm 非小细胞肺癌气腔播散的多因素分析 [J]. *临床放射学杂志*, 2025, 44(5): 871-877.
- [18] Liu BC, Ma HY, Huang J, et al. Does dual-layer spectral detector CT provide added value in predicting spread through air spaces in lung adenocarcinoma? A preliminary study [J]. *Eur Radiol*, 2024, 34(6): 4176-4186.
- [19] Peng YJ, Dai T, Li D, et al. Value of dual-energy computed tomography quantitative parameters in differentiating neoplastic from bland portal vein thrombosis [J]. *Quant Imaging Med Surg*, 2025, 15(6): 5101-5113.
- [20] Tsuchiya N, Doai M, Usuda K, et al. Non-small cell lung cancer: whole-lesion histogram analysis of the apparent diffusion coefficient for assessment of tumor grade, lymphovascular invasion and pleural invasion [J/OL]. *PLoS One*, 2017, 12(2): e0172433 [2017 Feb 16]. DOI: 10.1371/journal.pone.0172433.
- [21] Chen W, Lin G, Mao W, et al. Nomogram for predicting tumor-stroma ratio in pancreatic ductal adenocarcinoma using dual-energy computed tomography [J/OL]. *BMC Med Imaging*, 2025, 25(1): e373 [2025 Sep 26]. DOI: 10.1186/s12880-025-01915-7.
- [22] Tao J, Xu H, Shen L, et al. Solid-type adenocarcinoma on thin-section CT: quantitative parameters from dual-energy CT associated with spread through air spaces [J]. *Acta Radiol*, 2025, 66(2): 184-191.

(收稿日期: 2025-08-20 修回日期: 2025-11-21)