# ・双能量 CT 影像学专题・ 能谱 CT 诊断孤立性肺结节/肿块的初步研究

吴维,张进华,万维佳,夏黎明

【摘要】目的:探讨能谱 CT 诊断肺结节、肿块的价值。方法:选取 33 例 X 线发现肺结节、肿块的患者,进行室石能 谱成像(GSI)模式三期增强扫描,利用 GSI 后处理功能,分别测量动脉期(30 s)、静脉期(60 s)及延迟期(90 s)病灶的能谱 曲线斜率以及标准化碘浓度(NIC),测定各病灶区混合能量 CT 值,比较各参数间的差异并进行统计学分析。结果:33 例 患者经手术病理证实,其中恶性病变 17 例(恶性组),炎性病变 8 例(炎性组),除炎性病变外的良性病变 8 例(良性组)。动 脉期、静脉期及延迟期三组病变混合能量 CT 值、能谱曲线斜率(40~80 keV)以及 NIC 值均为炎性病变最高,良性病变最 低。良性组与其他两组进行比较,病灶在动脉早期及延迟期扫描中混合能量下的 CT 值、能谱曲线斜率及 NIC 值差异均 有统计学意义(P<0.05);炎性组与恶性组比较,仅能谱曲线斜率及 NIC 值在动脉早期及延迟期差异有统计学意义(P<0.05);炎性组与恶性组比较,大其是动脉早期及延迟期的能谱曲线斜率及 NIC 值诊断价值较高。

【关键词】 肺结节;能谱成像;体层摄影术,X线计算机;诊断,鉴别

【中图分类号】R563; R814.42 【文献标识码】A 【文章编号】1000-0313(2014)09-0998-05

DOI:10.13609/j. cnki. 1000-0313. 2014. 09. 005

The diagnostic value of spectral CT imaging in lung solitary nodule/mass WU Wei, ZHANG Jin-hua, WAN Wei-jia, et al. Department of Radiology, Tongji Hospital, Tongji Medical College, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430030, P. R. China

**(Abstract) Objective**: To study the value of spectral CT imaging in differentiation of pulmonary nodules/masses. **Methods**: 33 cases with pulmonary nodule or mass received triphasic pulmonary enhanced CT scan in GSI (gemstone spectral imaging) mode on a MDCT (Discovery CT 750 HD, GE healthcare). All raw data were sent to AW4. 6 workstation and processed by the software of GSI work station. CT value under mixture energy, slope rate of spectral curve, normalized iodine concentration (NIC) were measured and calculated in three phases, respectively. Variances among parameters were analyzed and T-Test was used to compare the results. **Results**: 33 cases proved by pathology were divided into three groups. Group A: inflammatory lesions (8 cases), group B; benign lesions except inflammatory cases (8 cases) and group C; malignant lesions (17 cases). These three parameters, CT value under mixture energy, slope rate of spectral curve, and normalized iodine concentration, were found highest in group A, and lowest in group B. There were significant differences in the three parameters either between group B and C or between group B and A in arterial phase and delayed phase. In arterial phase and delayed phase, there were significant differences in the slope rate and NIC between group A and C. **Conclusion**: Spectral CT imaging is helpful in the diagnosis of pulmonary nodules/masses, especially the slope rate of spectral curve and NIC value in both arterial and delayed phases.

[Key words] Pulmonary nodule; Spectral imaging; Tomography, X-ray computed; Diagnosis, differential

肺内孤立性结节、肿块是胸部影像学检查的常见 表现,其病理类型多样,不同病理类型所采取的治疗手 段及预后有显著差异。早期肺癌的5年生存率可高达 90%以上,中晚期肺癌的5年生存率低于5%<sup>[1]</sup>。传 统影像学从肿块大小、形态及CT值等多个角度分析 其良恶性,但在临床工作中,由于良恶性结节、肿块的 这些特征表现相互重叠,以及疾病的个体差异和读片 者的主观经验,长期以来,肺结节、肿块的诊断与鉴别 诊断是胸部CT诊断中的一个难点。双能量CT利用 两次能量采集确定一条特征吸收曲线,通过数据空间 进行吸收投影数据到物质密度投影数据的转换,克服 硬化伪影和运动干扰,避免 CT 值漂移,得到准确的 CT 能谱图像,进行物质分离和物质组成分析,从而反 映物质的本质<sup>[2]</sup>。随着双能量 CT 技术的发展,国内 外学者开始将其运用到肺部病变,为肺结节、肿块的鉴 别诊断提供了更多信息<sup>[3-5]</sup>。GE 公司的宝石能谱 CT 采用单个 X 线球管,在瞬间实现高低能量切换,达到 双能量成像的目的。本研究通过 33 例病例的能谱 CT 动态增强扫描和病理对照,探讨肺部不同性质结 节、肿块的能谱 CT 表现特征,旨在初步探讨能谱 CT 对肺结节、肿块的诊断价值。

**作者单位:**430030 武汉,华中科技大学同济医学院附属同济医院 放射科 **作者简介:**吴维(1987-),女,湖北黄梅人,硕士,主要从事胸部影 像诊断工作。 通讯作者:夏黎明,E-mail:cjr.xialiming@vip.163.com

#### 999

## 材料与方法

# 1. 病例资料

对本院 2013 年 11 月-2014 年 5 月经 X 线发现 肺结节、肿块的 33 例患者行宝石能谱成像(gemstone spectral imaging,GSI)三期扫描,其中男 22 例,女 11 例,年龄 36~76 岁,平均 53 岁,肺结节/肿块直径为 1~5 cm。

## 2. 检查与测量方法

能谱 CT 扫描:采用宝石能谱 CT (GE Discovery 750,HDCT)进行扫描。检查前患者及家属签署知情 同意书,并指导和训练患者深吸气后屏气。患者取常 规仰卧位,分别行自肺尖至肺底膈面的动脉期增强扫 描及静脉期、延迟期针对病灶的局部增强扫描。采用 GSI 模式,管电压 80 kVp、140 kVp 瞬时切换,自动管 电流最大限值为 260 mA,球管转速 0.7 s/r。采用高 压注射器,经外周静脉注射非离子型对比剂优维显 (370 mg I/mL),剂量 1.1 mL/kg,注射流率 2.5~ 3.0 mL/s,对比剂注射后第 30 s 行动脉期全肺扫描, 第 60 s 及 90 s 对病灶行静脉期、延迟期局部扫描。图 像重建层厚 0.625 mm,重建层间距 0.625 mm。

数据测量:将原始图像传至 ADW4.5 工作站(GE HealthCare,USA),采用能谱分析软件在能谱 CT 浏 览器上对图像进行后处理。在单能量图像(70 KeV, 1.25 mm)上,采用最大层面全肿瘤区域法选择避开血 管、钙化及坏死的实性区域中病灶横断面最大层面,将 圆形或椭圆形感兴趣区(region of interest,ROI)放置 在病灶中央强化程度较均一的实性区域,尽可能多的 包括整个病灶<sup>[6]</sup>,并尽量确保同一病灶在三期单能量 图像中的位置相当。所有病灶分别在动脉期、静脉期 以及延迟期进行相关数据测定。胸主动脉 ROI 置于 病灶同层胸主动脉中心区(图 1~3)。测量及分析数 据包括:①各期病灶 ROI 平均能谱曲线,测定病灶 40~140 KeV 对应的各能量水平 CT 值(HU),将病灶 分为炎性组(A 组),除炎性病变外的良性组(B 组)和

恶性组(C组),计算各组相应能量水平的平均 CT 值, 画出 3 组平均能谱曲线;②计算各期病灶能谱曲线斜 率,选取 40 KeV 与 80 KeV 作为参考点,用 40 KeV 与 80 KeV 对应的 CT 值之差除以 40 而得;③测量各期 病灶 ROI 及胸主动脉 ROI 碘浓度(100 μg/mL),并计 算病灶 ROI 的标准化碘浓度(normalized iodineconcent rations, NIC),即病灶碘含量/主动脉碘含量;④ 测定各期病灶在混合能量下各 ROI 对应的 CT 值。

3. 统计学处理

采用 SPSS 18.0 软件进行统计学分析,计量资料 用 x±s 表示,首先进行正态分布检验,非正态分布采 用非参数检验,正态分布采用方差齐性检验。方差齐 时组间差异的比较采用单因素方差分析 LSD-t 法;方 差不齐时采用两样本的校正 t 检验,以 P<0.05 为差 异有统计学意义。

#### 结 果

经手术或穿刺病理证实后,将所有病例分为3组, A组:炎性结节/肿块(8例);B组:炎性病变以外的良 性结节/肿块,共计8例,其中结核瘤3例,肺隔离症1 例,支气管囊肿1例,肺梗死1例,肺微囊性纤维黏液 瘤1例,硬化性血管瘤1例;C组:恶性结节/肿块组, 共计17例,其中腺癌8例,鳞癌7例,小细胞肺癌1 例,大细胞肺癌1例。

# 1. 三组病灶能谱曲线

增强扫描动脉期、静脉期及延迟期三组病变的平均能谱曲线均呈递减型(图 4~6),在能量为 40~80 keV 时,差异较明显,能量越低,差异越大;炎性病变的能谱曲线位置较高,40~80 keV 能量段的曲线最陡,其次是恶性病变,良性病变位于最下方,40~80 keV 能量段的曲线最平坦。

2. 三组病变各测量参数分析

增强扫描动脉期、静脉期及延迟期三组病变混合能量CT值、能谱曲线斜率(40~80keV)以及碘值比



图 1 患者,女,76岁,左肺下叶机化性肺炎(动脉期)ROI放置位置。ROI1:病灶(箭);ROI2:同层降主动脉(箭头)。 图 2 患者,女,68岁,右上肺微囊性纤维黏液瘤(动脉期)ROI放置位置。ROI1:病灶(箭);ROI2:同层降主动脉(箭头)。 图 3 患者,男,43岁,左上肺高分化腺癌(动脉期)ROI放置位置。ROI1:病灶(箭);ROI2:同层降主动脉(箭头)。



值 NIC 均呈现出炎性病变最高,良性病变最低,恶性 病变居中的趋势,并且在动脉期第 30 s 和延迟期第 90 s时的差异较大,静脉期第 60 s 时各组病变差异较 小(表 1~3)。

表1 动脉期 30s 各组病灶参数

		F =	
组别	传统 CT 值(HU)	斜率	NIC
A 组	50.49 $\pm$ 25.64	$3.09 \pm 1.22$	$0.18 \pm 0.05$
B 组	$20.33 \pm 14.91$	$0.73 \pm 0.19$	$0.05 \pm 0.02$
C 组	58.03±17.53	$1.73 \pm 0.45$	$0.10 \pm 0.03$
	表2 静脉期6	50s各组病灶参数	
组别	传统 CT 值(HU)	斜率	NIC
A 组	49.23±26.18	3.14±1.12	0.46±0.18
B 组	$60.00 \pm 27.13$	$0.72 \pm 0.37$	$0.56 \pm 0.46$
C 组	$42.62 \pm 23.41$	$1.74 \pm 0.40$	0.31±0.07
_	表 3 延迟期 9	00s 各组病灶参数	
组别	传统 CT 值(HU)	斜率	NIC
A 组	52.37±28.49	$3.62 \pm 1.12$	$0.65 \pm 0.06$
B组	$26.93 \pm 18.71$	0.81±0.43	$0.17 \pm 0.11$
C 组	54.22±19.00	$1.72 \pm 0.37$	$0.36 \pm 0.08$

## 3. 三组病灶各参数两两比较

经正态分布检验,各组数据均符合正态分布。经 方差齐性检验,动脉增强第 30 s、60 s 的病灶混合能量 下的 CT 值(传统 CT 值)及延迟期第 90 s 时病灶混合 能量下的 CT 值、能谱曲线斜率及 NIC 这几组数据方 差齐,采用单因素方差分析 LSD-t 法进行两两比较。 动脉增强第 30 s、60 s 时的能谱曲线斜率及 NIC 这几 组数据方差不齐,采用两样本的校正 t 检验,  $\alpha$  阈值为 0.017。经统计学分析表明,良性组与其他两组进行比 较,病灶混合能量下的 CT 值、能谱曲线斜率及 NIC 在动脉期及延迟期差异均有统计学意义(P < 0.05); 炎性组与恶性组之间比较,病灶混合能量下的 CT 值 差异无统计学意义(P > 0.05);而能谱曲线斜率及 NIC 在动脉早期及延迟期差异均有统计学意义(P < 0.05,表 4~6)。



图 4 30s 三组病变动脉期能谱曲线图。 图 5 60 s 三组病变静脉期能谱曲线图。 图 6 90 s 三组病变 延迟期能谱曲线图。

表 4 动脉期 30 s 各参数间两两比较

组别	传统 CT 值		余	斜率		NIC	
	标准误	P 值	<i>t</i> 值	P 值	<i>t</i> 值	P 值	
A与B	9.80	<0.01	5.42	<0.01*	7.27	<0.01*	
B与C	8.12	<0.01	7.83	$< 0.01^{*}$	6.02	<0.01*	
A与C	8.51	>0.05	3.07	0.016*	3.09	<0.01*	

注:\*α阈值=0.017, Р值<α阈值为差异有统计学意义。

表5 静脉期 60 s 各参数间两两比较

组别	传统 CT 值		余	斜率		NIC	
	标准误	P 值	<i>t</i> 值	P 值	<i>t</i> 值	P 值	
A与B	13.43	>0.05	5.04	<0.01*	-0.50	>0.05*	
B与C	10.31	>0.05	5.69	<0.01*	-1.30	>0.05*	
A与C	12.16	>0.05	2.99	0.027*	1.98	>0.05*	

注:\* α 阈值=0.017, P 值<α 阈值为差异有统计学意义。

表6 延迟期 90 s 各参数间两两比较

组别	传统 CT 值		斜率		NIC	
	标准误	P值	标准误	P 值	标准误	<i>P</i> 值
A与B	12.18	<0.05	0.39	<0.01	0.05	< 0.01
B与C	10.03	< 0.05	0.37	< 0.01	0.04	< 0.01
A与C	10.03	>0.05	0.29	< 0.01	0.04	< 0.01

### 讨 论

# 1. 传统 CT 扫描诊断肺结节、肿块的缺陷

对于肺内单发的结节或肿块,不伴有明显肺不张、 炎症或局部淋巴结肿大时,影像学的精确诊断是一直 以来的难点<sup>[7]</sup>。目前,传统 CT 平扫及增强检查是肺 结节、肿块诊断与鉴别诊断的首选方法<sup>[8]</sup>。CT 的定 性诊断主要在于区分病变的良恶性。传统的 CT 平扫 及增强检查可以很好地显示病变的部位、形态学征象、 强化特点,很多学者利用良恶性病变强化达峰时间的 不同,选择测量动脉期达峰强化 CT 值鉴别良恶性病 变,认为强化≪20 HU 或≥60 HU 提示良性结节,20 ~60 HU 提示恶性结节,而≥60 HU 以活动性炎性结 节可能性大,但这些特征对肺结节、肿块的定性诊断符 合率仍然不理想<sup>[9]</sup>,特别是对于恶性病变与炎性病变 的鉴别,传统影像学检查很难进行准确区分。有学者 发现 CT 灌注检查鉴别良恶性孤立性肺结节(solitary pulmonary nodule, SPN)的敏感度和特异度分别为 91%和86%,但炎性病变与恶性病变的灌注指标差异 不明显<sup>[10]</sup>;并且有文献报道恶性结节与炎性结节的 CT强化值、结节-主动脉强化值比值和灌注值之间的 差异无统计学意义<sup>[3]</sup>。本研究将肺部结节、肿块分为 炎性病变、非炎性病变的良性病变以及恶性病变三组, 并把能谱CT对于这些结节、肿块的鉴别与混合能量 下的CT扫描图像,即传统CT检查方法进行比较,试 图探索较为可靠地鉴别良恶性肺部结节、肿块的方法。

2. 能谱 CT 三期增强扫描较传统 CT 增强扫描的 优势

双能量 CT 利用两次能量采集确定一条特征吸收 曲线,通过数据空间进行吸收投影数据到物质密度投 影数据的转换,克服硬化伪影和运动干扰,避免 CT 值 漂移,得到准确的 CT 能谱图像,进行物质分离和物质 组成分析,从而反映物质的本质。GE 公司的高分辨 力宝石能谱 CT 作为双能量 CT 的代表,采用单个 X 线球管,瞬间切换高、低能量,实现双能量成像<sup>[2]</sup>。根 据这两种能量的图像可得到去除硬化伪影的 101 个单 能量图像,每个能量值所对应的 CT 值也相对更纯净, 并从而产生反映不同病变和人体组织对于 X 线吸收 的特征性的能谱曲线<sup>[11,12]</sup>。方亚军等<sup>[13]</sup>的研究表明 CT 能谱曲线由组成物质的分子结构决定,物质的 CT 值衰减差异可以在一定程度上区分不同的化学成分, 而反映 CT 值衰减的能谱曲线的差异可以用曲线斜率 来定量评估,并且影响能谱曲线 CT 值衰减率的主要 因素之一就是结节或肿块的密度。因此,本研究选取 了能谱曲线差异较大的一段(40~80 keV)曲线斜率作 为病灶定性分析的指标。研究表明,可以利用 GSI 扫 描获得碘基图,并且准确测量图像上病灶的碘含量,从 而反映病灶的血供情况。由于病灶碘含量还受到对比 剂总量、注射流率、个体循环差异的影响,为排除这些 差异,笔者以病灶同层的胸主动脉为参照,采用标准化 碘含量进行分析,从而更真实地反映病灶的血供。肺 癌微血管密度增加、血管基底膜不完整等因素使得其 血流模式与良性病变不同。有文献报道动态增强 30 s 时,血供丰富的恶性及活动性炎性结节、肿块 CT 值上 升非常明显,90 s 时达峰值并开始下降,所以笔者选择 动脉期 30 s、延迟期 90 s,再加上中间状态的静脉期 60 s 三个时相的 CT 增强扫描,以更好地鉴别不同性质的 肺结节、肿块。能谱 CT 升级后,将自动电流最大限由 原来的 600 mA 降低到 260 mA,可以明显减少患者接 受的辐射剂量。GSI模式、自动电流最大限 260 mA 条件下(CT 容积剂量指数为 8.91 Gy),肺部结节、肿 块三期增强扫描(静脉期及延迟期只针对病灶局部进 行扫描),在不影响图像质量的情况下,患者接受的辐

射剂量比混合能量下单独动脉期扫描还要小。

3. 能谱 CT 诊断肺结节、肿块的价值

本研究结果显示能谱曲线可直观反映三组病变在 动脉期、静脉期及延迟期的差异。在三期扫描中,炎性 病变的能谱曲线位置都最高,40~80 keV 能量段的曲 线斜率最大,其次是恶性病变,良性病变位于最下方, 40~80 keV 能量段的曲线斜率最小。相关研究发现 能谱曲线及斜率可以区分甲状腺的良恶性结节,方亚 军等<sup>[13]</sup>研究表明影响能谱曲线 CT 值衰减率的主要 因素是结节或肿块的密度。本研究中能谱曲线的位置 和形态能一定程度上将三组病变区分开,主要是基于 三组病变的密度、血供及强化差异,这也说明了能谱曲 线反映物质本质及物质结构的能力。本研究对各参数 数据进行统计分析,发现混合能量下病灶的 CT 值在 炎性病变与良性病变、良性病变与恶性病变之间的鉴 别是有意义的,但混合能量下的 CT 值,即传统 CT 扫 描下的 CT 值,在恶性病变与炎性病变之间有太多重 叠,因此传统的 CT 值强化峰值不能鉴别炎性病变与 恶性病变,这与许多学者的研究结果相符[10]。能谱扫 描与传统 CT 扫描相比,除了能将良性病变与炎性病 变及恶性病变鉴别开来以外,在扫描动脉期第 30 s 和 延迟期第90s时,炎性病变组的能谱曲线斜率及NIC 值明显高于恶性组,差异具有统计学意义(P<0.05), 但第 60 s 的差异不具有统计学意义(P>0.05)。分析 其原因,肺部结节、肿块的血供情况一直以来都是诊断 及鉴别诊断病变性质的一个重要参考指标,多数学者 认为肺癌的肺动脉血供减少,而支气管动脉血供增加, 炎性孤立性肺结节支气管动脉的血供也会增加[14],而 常见的多数良性病变是乏血供的[4]。病变血供情况在 增强 CT 上即表现为对碘的摄取量, 而双能技术能准 确地分离出基质碘,从而得到"纯碘图",较以往检查方 法能更好地反映病灶内碘的分布情况。能谱曲线通过 不同 X 线能量下物质 CT 值衰减差异的趋势反映病灶 血供进而分析、鉴别病灶性质;碘浓度能直接、客观、准 确地反映病灶的血供情况,从而区分炎性病变与恶性 病变。

本研究结果表明病灶的能谱曲线斜率及 NIC 值 在动脉期第 30 s 和延迟期第 90 s 时,在各组病变之间 差异均有统计学意义(P<0.05);尤其是炎性病变与 恶性病变可以利用能谱曲线斜率及 NIC 值(第 30 s 和 90 s)进行鉴别。相关研究表明动态增强早期第 30 s 左右采集的图像主要是反映病变的血管特征<sup>[15]</sup>,癌性 结节或肿块内的微血管网是由增多、扭曲、扩张的支气 管动脉分支构成,其在动脉增强早期强化。炎性结节、 肿块的微血管同样来自支气管动脉密集的毛细血管 网<sup>[16]</sup>,并且很多炎性病变内微血管的数量更多,扩张

也更明显,由于血供更丰富,其强化程度较恶性结节更 明显。所以在本研究中可看到动脉增强早期炎性病变 组的 NIC 值较恶性病变组更高。李慎江等<sup>[15]</sup>的研究 认为增强晚期肺结节的强化受血管外间隙中的细胞、 非血管间质容积以及纤维化程度等因素影响。癌性病 变紊乱扭曲的微血管网使得对比剂在血管内流速减 慢,加上淋巴回流减少、细胞外间隙扩大使得病变内对 比剂流出减慢,滞留时间长,从而使得其强化曲线为缓 升型,强化持续时间较长<sup>[9,14]</sup>。炎性病变毛细血管丰 富,形态较成熟,管径长,走行纡曲,加之病灶区组织水 肿,压迫引流血管和淋巴管,所以病灶呈现持续并快速 的强化,在本研究增强第60s,由于恶性病变和炎性病 变都处于病灶内对比剂滞留的一个上升期,反映的都 是微血管床的紊乱纡曲以及病灶回流减少的病理状 态,故两者 NIC 值与能谱曲线斜率并无显著差异;而 延迟期第90s时,由于肿瘤血管发育不成熟,血管内 皮细胞表面渗透性增高,对比剂经过不完整的基底膜 进入组织间隙<sup>[17]</sup>,使得病灶内对比剂逐渐减少,NIC 值与能谱曲线斜率下降,而本研究中炎性病变多为慢 性机化性炎症,其纤维组织结构丰富,微血管床更加紊 乱扭曲,对比剂滞留于病灶内时间较长,依然呈现持续 强化的状态,因此,其 NIC 值与能谱曲线斜率较恶性 病变显著增高。

本研究的不足之处在于良性病变的病例数较少、 未对恶性病变和良性病变作更细致精确的分类分析、 未将孤立性结节病变与肿块进行分别分析,因此,有待 进一步增加样本量深入分析。

综上所述,本研究结果说明能谱 CT 较传统的增强 CT,能提供更多肺结节、肿块的鉴别诊断信息,利用能谱 CT 增强扫描所得到的能谱曲线、曲线斜率以及 NIC 值有助于鉴别良恶性肺结节及肿块,尤其是动脉早期及延迟期的 NIC 值与能谱曲线斜率诊断价值较高。

# 参考文献:

[1] Rami-Porta R, Bolejack V, Goldstraw P. The new tumor, node, and metastasis staging system[J]. Semin Respir Crit Care Med, 2011,32(1):44-51.

- [2] 任庆国, 滑炎卿, 李剑颖. CT 能谱成像的基本原理及临床应用 [J]. 国际医学放射性杂志, 2011, 34(6): 559-563.
- [3] 林吉征,张亮,邹婧,等.CT能谱成像诊断孤立性肺结节[J].中国 医学影像技术,2014,30(2):224-227.
- [4] 关牧娟,吕培杰,高剑波. 能谱 CT 成像鉴别肺结节性质的初步研 究[J]. 中国医学计算机成像杂志,2013,19(1):20-23.
- [5] 王华斌,李苏建,卢光明,等.初步评估双源 CT 双能量技术在孤立 性肺结节研究中的价值[J].放射学实践,2010,25(5):504-508.
- [6] 魏松宇,储成凤,杨明,等.64 层螺旋 CT 肺肿瘤灌注感兴趣区选择对数据可重复性影响的研究[J].东南大学学报(医学版), 2008,27(5):357-360.
- [7] Winer-Muram HT. The solitary pulmonary nodule[J]. Radiology, 2006,239(1):34-39.
- [8] Wang G,Zhang C, Li M, et al. Preliminary application of high-definition computer tomographic gemstone spectral imaging in lung cancer[J]. J Comput Assist Tomogr, 2014, 38(1):77-81.
- [9] 王华斌,李苏建,卢光明. 多层螺旋 CT 评估孤立性肺结节的临床 研究进展[J]. 放射学实践,2010,25(1):105-107.
- [10] Li Y, Yang ZG, Chen TW, et al. First-pass perfusion imaging of solitary pulmonary nodules with 64-detector row CT; comparison of perfusion parameters of malignant and benign lesions[J]. Br J Radiol, 2010, 83(993):785-790.
- [11] Matsumoto K, Jinzaki M, Tanami Y, et al. Virtual monochromatic spectral imaging with fast kilovoltage switching: improved image quality as compared with that obtained with conventional 120kVp CT[J]. Radiology, 2011, 259(12): 257-262.
- Zhang D,Li XH,Liu B. Objective characterization of GE discovery CT750 HD scanner: gemstone spectral imaging mode[J].
  Med Phys,2011,38(3):1178-1188.
- [13] 方亚军.CT 能谱成像在孤立性肺结节诊断中的应用[D].山东:山东大学,2012.
- [14] Ruoslahti E. Specialization of tumor vasculature [J]. Nat Rev Cancer, 2012, 2(2):83-90.
- [15] 李慎江,刘士远,肖湘生,等. CT、MR 动态增强在评价孤立性肺 结节血流模式中的作用[J].中华放射学杂志,2005,39(1):9-10.
- [16] 王秋实,郭启勇,苏惠群,等. 多层 CT 灌注成像在肺内肿块诊断 及鉴别诊断中的应用[J].中国医学影像技术,2004,20(6):876-879.
- [17] 张金娥,梁长虹,赵振军,等. CT 肺灌注在肺结节诊断中的应用 研究[J]. 中华放射学杂志,2005,39(10):1041-1045.

(收稿日期:2014-07-31 修回日期:2014-08-25)