

肺内亚实性结节的CT表现与病理相关性研究

周仕怡^{1*}, 彭璇², 李正亮^{1#}

¹大理大学第一附属医院放射科, 云南 大理

²大理白族自治州妇幼保健院影像功能科, 云南 大理

收稿日期: 2025年12月15日; 录用日期: 2026年1月8日; 发布日期: 2026年1月21日

摘要

亚实性结节作为肺癌早期筛查的关键影像学表现, 其诊断与治疗策略高度依赖CT技术, 并与肺腺癌的病理特征密切相关。然而, 由于目前肺结节在诊断中的阳性判断标准不一、成像参数存在差异, 以及病理表现与影像特征之间的不一致, 导致不同地区对同一病例的处理意见往往大相径庭。针对上述问题, 本文系统综述了常规CT技术与新兴技术在亚实性结节良恶性鉴别中的应用现状与发展趋势。常规CT中, 低剂量CT (LDCT)需结合特定人群调整判定阈值(如中国人群建议 ≥ 8 mm), 双能量CT (DECT)有助于提升结节血供显示能力, 而PET-CT主要用于确诊后的分期与治疗评估。新兴技术如人工智能与影像组学则通过将影像特征转化为定量数据, 构建预测模型, 以识别人眼难以察觉的细微特征。此外, 本文还概述了肺结节的自然病程, 并对比分析了不同国际指南在处理建议方面的异同。

关键词

亚实性结节, 磨玻璃结节, 计算机断层扫描, 病理

Correlation Study between CT Manifestations and Pathological Features of Subsolid Pulmonary Nodules

Shiyi Zhou^{1*}, Xuan Peng², Zhengliang Li^{1#}

¹Department of Radiology, The First Affiliated Hospital of Dali University, Dali Yunnan

²Department of Imaging and Functional Medicine, Maternal and Child Health Hospital of Dali, Dali Yunnan

Received: December 15, 2025; accepted: January 8, 2026; published: January 21, 2026

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 周仕怡, 彭璇, 李正亮. 肺内亚实性结节的CT表现与病理相关性研究[J]. 临床医学进展, 2026, 16(1): 1961-1972. DOI: 10.12677/acm.2026.161248

Abstract

Subsolid nodules represent a critical imaging manifestation in early lung cancer screening, with their diagnosis and management being highly dependent on CT equipment and closely correlated with the pathology of lung adenocarcinoma. Current challenges in pulmonary nodule evaluation include inconsistent positive judgment criteria and variability in imaging parameters. To address these issues, this article systematically reviews the application of different CT technologies and emerging techniques in the differentiation of benign and malignant SSNs. In conventional CT, low-dose CT (LDCT) requires population-adjusted thresholds (e.g., optimized to ≥ 8 mm for Chinese populations), while dual-energy CT (DECT) enhances the visualization of nodular blood supply. PET-CT is primarily utilized for staging and treatment planning post-diagnosis. Emerging technologies such as artificial intelligence and radiomics facilitate the quantification of visual data, enabling the development of models that detect details imperceptible to the human eye. Finally, this review outlines the natural course of pulmonary nodules and compares the similarities and differences in management recommendations among international guidelines.

Keywords

Subsolid Nodule, Ground-Glass Opacity, Computed Tomography, Pathology

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

亚实性结节也称为磨玻璃结节(Ground-Glass Opacity, GGO), GGO 在影像学上定义为 CT 值轻微升高的局灶性病变区域, 其特点是透过病灶仍可辨识正常的肺实质结构、气道及血管[1]。肺内磨玻璃结节可分为两类: 1) 纯磨玻璃结节(Pure Ground-Glass Nodule, pGGO), 不含实性成分; 2) 部分实性磨玻璃结节, 包含纯磨玻璃区域和实变区域, 这类部分实性结节也被称为混合密度磨玻璃结节(Mixed Ground-Glass Nodule, mGGO) [2]。近年来, 随着计算机断层扫描(Computed Tomography, CT)筛查的推广应用, 肺结节的检出率显著提高。亚实性结节(Subsolid Nodule, SSN)与实性肺结节在形态学、进展过程、恶性风险和预后等方面存在差异[3]。目前, 对 SSN 的诊断仍然存在挑战, 但其影像学表现与组织病理学之间有良好的相关性。鉴于上述情况, 本文旨在系统探讨不同类型计算机断层扫描设备对肺内 SSN 良恶性的诊断效能, 并与病理学结果进行对照分析, 进而为临床制定治疗策略与选择手术方式提供影像学依据。然而, 考虑到肺腺癌的重要性, 本综述只探讨肺内亚实性结节与肺腺癌的关系。

2. 常规 CT 设备的 SSN 影像学表现和病理相关性

SSN 的精确识别与定性是肺癌早期筛查与管理的核心环节。当前, 基于 X 线衰减原理的常规 CT 检查是评估 SSN 的首选影像学方法。尽管低剂量 CT (Low-Dose Computed Tomography, LDCT)、双能量 CT (Dual-Energy Computed Tomography, DECT) 及正电子发射计算机断层显像(Positron Emission Tomography-Computed Tomography, PET-CT)在数据采集方式上各有不同, 但其成像本质均为显示不同组织对 X 线的衰减差异, 表 1 详细列举了三种设备在成像方式上的不同。在临床实践中, LDCT 因其较低的辐射剂量成为全球各地肺癌大规模筛查的基石。然而, 其对肺内恶性结节的诊断效能有限, 对结节良恶性的报告在很大程度上

上取决于放射医师所采用的阳性结节大小阈值、CT 扫描参数以及目标研究人群的特征。例如,美国国家肺癌筛查试验(National Lung Screening Trial, NLST)将阳性结节阈值定义为直径 ≥ 4 mm; 类似地, 早期肺癌行动项目(ELCAP)及其延伸项目(如 NY-ELCAP 和 I-ELCAP)则采用了直径 ≥ 5 mm 作为报告标准[4]-[6]。笔者注意到, 上述公认阈值标准均源于西方人群的大规模筛查研究, 未能充分考虑亚洲人群所特有的地域异质性。为弥补此证据缺口, Ye 等人基于 11,708 名参与者的 LDCT 筛查数据, 专门针对中国人群的纯磨玻璃结节(pGGN)进行了分析。其研究[7]提出了一个适用于该人群的特异性直径阈值, 结果表明, 将阳性判定阈值从 5 mm 提高至 8 mm, 能显著增强对中国人群肺结节恶性风险的预测效能。美国胸外科协会也指出直径小于 8 mm 的结节恶性风险较低, 随访收益小, 且结节越小, 任何诊断程序和手术定位的可靠性就越低[1]。需要指出的是, 阈值的进一步提高虽可能提升特异性, 但亦伴随检出敏感性下降的风险。鉴于多数筛查所发现的肺部异常并不会最终进展为癌症, 因此, 是否将此项针对中国人群的优化阈值推广至临床实践, 仍需更多前瞻性研究与循证医学证据予以支持。另一方面, 肺结节良恶性诊断的准确性高度依赖于 CT 扫描的技术参数。目前国际上最具影响力的肺结节管理指南, 包括 Fleischner 学会指南、NCCN 指南及 AATS 专家共识[1][8][9], 虽对结节的随访与管理策略作出了详细规定, 但在关键 CT 成像参数——如扫描层厚、辐射剂量、重建算法及管电压等方面——尚未建立具体且统一的标准。这一缺失导致临床实践与多中心研究中的扫描协议存在显著异质性。此类参数差异会直接影响图像的空间分辨率、噪声特征, 以及部分实性结节中实性成分的准确显示, 进而系统性地影响对结节密度、形态学的评估, 乃至最终的良恶性判别[10]。因此, 在探讨亚实性结节影像学表现与病理学相关性时, 有必要将成像参数作为关键变量纳入考量, 未来亟需在此方面形成权威性的共识与规范。此外, 诊断准确性亦与研究人群的基线特征密切相关。不同临床试验与观察性研究纳入的患者群体在结节形态谱系、流行病学背景及临床分期上存在显著异质性, 这直接影响诊断模型的构建及其外推效力。例如, 多项研究聚焦于不同类型亚实性结节的恶性风险分层, 发现纯磨玻璃结节的浸润性腺癌发生率显著低于异质性磨玻璃结节与部分实性结节[4][5][11]。然而, 现有研究多基于结节的单一影像学特征进行良恶性预测, 较少从患者整体临床背景出发进行综合分析。为此, Zhu 等人基于女性人群开发了改良的肺癌预测模型, 证实性别是肺结节恶性风险的重要影响因素, 并发现绝经前激素治疗可能进一步增加患病风险[12]。上述证据表明, 在评估诊断工具或临床指南的适用性时, 必须审慎考量目标人群的组成特征, 以避免选择偏倚并提升结论的临床适用性。

在传统 CT 成像中, 不同组织成分可能表现为相近的 CT 值, 使得仅凭单能量衰减难以准确区分组织类型与对比剂分布。DECT 通过采用不同管电压并结合能量纯化技术, 实现了基于物质成分的成像能力, 包括单元素分离与对比剂信号提取。然而, 由于早期技术限制及辐射剂量问题, 其应用多集中于 CT 血管造影中的自动骨剔除、斑块分析、去碘成像以及血容量评估等领域, 在肺部亚实性结节方面的研究相对有限[13]。Eun 等首次证实双能 CT 可在不增加额外辐射剂量的情况下实现强化程度测量与钙化检测[14], 推动了该技术在肺部血管、钙化及对比增强等方面的应用研究。此后, 有关 DECT 在肺部血管、钙化和对比增强上的研究日益增多, 例如, Yang 等进一步探讨了双能 CT 在肺腺癌癌前病变与浸润前病变鉴别中的价值, 证实了其在准确区分侵袭性肺腺癌与癌前病变方面的能力[15]。Zhang 等的比较研究显示, 在评估肺纯磨玻璃结节(pGGO)的浸润范围方面, 双能 CT 凭借其优异的血供显示与虚拟去碘技术, 较常规薄层 CT 更具优势, 能精确地提示病变的侵袭特性[16]。

PET-CT 能够同时提供全身组织的代谢活性与解剖结构信息, 图像信号来源于体内放射性示踪剂差异性分布, 在肿瘤影像评估中具有独特价值。目前临床应用最广泛的显像剂为氟脱氧葡萄糖(18F-FDG-PET), 基于恶性肿瘤细胞普遍存在葡萄糖代谢亢进, 导致 FDG 在肿瘤细胞内大量蓄积, 从而在 PET 图像中表现为高摄取区域, 因此, PET-CT 在 SSN 的评估中存在显著局限性。一方面, 该技术成本较高、辐射剂量较大, 不适用于在疾病早期筛查及大规模临床研究中的应用; 另一方面, SSN(尤其是 pGGO)常

表现为低代谢或无代谢活性，导致病变区域 18F-FDG-PET 摄取水平较低，易造成假阴性结果[17]。在 John 等人的研究中发现，对于直径 <1 cm 的肺部病变，PET 的阳性预测值显著下降，且呼吸运动可能进一步降低对小病灶摄取的准确评估；此外，某些低度恶性潜能的病变，如原位腺癌或微浸润腺癌，其 FDG 摄取常与良性病变重叠，进一步削弱了其在 SSN 良恶性鉴别中的特异性[18]。因此，目前 PET-CT 在肺癌领域的应用仍主要集中于已确诊恶性肿瘤的分期、疗效评估与复发监测。在亚实性结节的早期诊断与风险分层中，PET-CT 的价值仍较为有限，更多作为 CT 定性困难或高危患者的辅助评估工具。未来，随着新型特异性示踪剂的研发与低剂量扫描协议的优化，PET-CT 在肺结节精准诊断中的潜力有望进一步拓展。

Table 1. Comparative analysis of imaging modalities in routine clinical CT equipment
表 1. 临床常规 CT 设备成像方式异同

特性	常规低剂量 CT	双能量 CT	正电子发射断层扫描-CT
核心原理	利用单一能量 X 射线，基于不同组织对 X 线的线性衰减系数差异进行成像。	利用两种不同能量(高/低千伏)的 X 射线，基于物质在不同能量下衰减特性的差异进行成分分离和识别。	通过探测正电子核素衰变产生的成对伽马光子，获取示踪剂在体内的生物分布，反映组织代谢活性；同机 CT 用于解剖定位与衰减校正。
数据采集方式	通常采用轴位或螺旋扫描。螺旋 CT 通过球管连续旋转和检查床同步移动，采用内插算法重建图像。	1) 双源系统：两套呈 90°角分布的球管-探测器系统，可分别设置不同千伏值。 2) 单源快速切换：单个球管在曝光过程中极速切换管电压。	1) 符合探测：环形探测器阵列同时探测成对且方向相反的伽马光子。 2) 时间飞行技术：测量两个光子到达探测器的微小时间差，精确定位湮灭位置。
主要临床应用	肺癌筛查、结节检出与随访、形态学评估(大小、密度、边缘特征)。	组织成分定性(如碘图、虚拟平扫)、尿酸/钙化鉴别、虚拟单能谱成像。在亚实性结节中用于血供评估、去碘分析以提示浸润性。	肿瘤分期、疗效评估、复发监测、寻找原发灶。基于代谢活性区分良恶性病变。对低代谢亚实性结节(如原位腺癌、微浸润腺癌)敏感性低。
优势	辐射剂量相对较低，扫描速度快，广泛可用，是筛查和随访的基石。	提供超越形态学的物质成分信息，有助于组织定性和鉴别诊断。	提供独特的代谢功能信息，灵敏度高，全身成像能力卓越，对高代谢病变诊断性能高。
局限性	主要依赖形态学，对组织成分特异性识别能力有限。	辐射剂量可能高于常规 CT，数据分析更复杂，在亚实性结节中的应用证据仍在积累。	成本高，辐射剂量大，空间分辨率低于 CT，对低代谢或小尺寸亚实性结节不敏感，存在假阴性。

3. 人工智能与影像组学在肺部 SSN 诊断准确性方面的研究现状

随着人工智能技术的迅速发展，影像组学与深度学习在肺部亚实性结节(SSN)的识别、分类及风险分层方面展现出广阔前景。影像组学通过高通量提取图像中的定量特征，将视觉信息转化为可挖掘数据，并结合临床与病理信息构建预测模型，以实现 SSN 的精准诊断与管理[19]。作为人工智能的一个分支，深度学习能够基于大规模图像数据库自主学习，无需显式编程，目前在肺癌及肺结节诊断任务中的性能已达到甚至超过放射科医师水平[20]。

目前，多项研究致力于开发基于 CT 图像的影像组学预测模型，用以区分 SSN 的良恶性。例如，MT 等人基于四项国际肺癌筛查研究，对近 1.7 万个结节进行影像组学分析，提取 642 个高质量特征并结合 9 项流行病学变量训练机器学习模型，结果显示，LASSO 模型实性结节与亚实性结节的恶性风险预测 AUC

分别达到 0.93 和 0.91, 显著优于传统的临床评估模型(AUC0.87) [20]。此外, 在 Y.J 等人针对 274 例磨玻璃结节患者的研究进一步证实, 结合临床特征与影像组学参数的联合模型在鉴别结节良恶性方面具有更高的预测效能(AUC0.695–0.711), 且校准性能良好[21]。

在 SSN 的病理亚型区分方面, 影像组学亦表现出良好的鉴别能力。Gong 等人基于 116 例经病理证实的 GGN (包括非典型腺瘤样增生、微浸润腺癌等), 构建了 7 个影像组学特征的模型, 其在训练集与验证集中区分癌前病变与微浸润腺癌的 AUC 分别达到 0.85 和 0.83, 优于单纯依靠形态学特征的临床模型 [22]。此外, Wang 等人的研究发现经由拓扑数据分析等新型影像组学方法可进一步提升模型对恶性 GGN 的识别能力, 整合拓扑特征的模型在独立验证集中的 AUC 可达 0.862–0.879 [22]。值得注意的是, 影像组学特征的稳定性和可重复性仍是目前研究的难点。一项针对 69 个 SSN 的研究发现, 尽管部分特征(如熵、均匀性、球度等)在不同观察者间具有较高一致性(CV < 5%), 但如表面积、能量等特征的一致性较差(CV > 10%), 提示结节形态、实性成分比例等因素可能影响特征提取的稳定性[23]。因此, 未来研究需进一步优化图像分割算法与特征标准化流程, 以提高模型的泛化能力。

深度学习, 尤其是卷积神经网络(CNN)在 SSN 检测与分类中也显示出强大潜力。Mei 等人研究利用 3D-CNN 结合影像组学特征构建神经网络模型, 对 GGN 的浸润状态进行术前评估, 其 AUC 达 0.85, 显著降低了手术决策的错配率(下降 35.57%) [24]。此外, Yang 等人开发了基于时间序列的影像组学分析模型, 结合结节在多次 CT 扫描中的特征变化率, 进一步提升对 SSN 生长趋势的预测准确性(AUC0.955–0.977) [25]。

尽管影像组学与深度学习在 SSN 诊断中展现出良好的应用前景, 其临床推广仍面临诸多挑战, 包括图像采集与重建参数的标准化、模型的可解释性、多中心数据的异质性以及前瞻性验证的缺乏等[19]。未来, 随着更多高质量、大样本、多中心研究的开展, 影像组学有望成为肺亚实性结节精准诊疗中不可或缺的辅助工具。

4. 亚实性结节的自然临床病程

磨玻璃影(GGO)作为一种非特异性 CT 表现, 其病理基础多样, 可反映肺泡腔的部分充填、肺泡壁增厚或间质增厚等微观改变, 常见于肺泡上皮增生、炎症细胞浸润或局灶性纤维化等过程[26]。在众多表现为 GGO 的病变中, 早期肺腺癌的影像病理过程最为重要。

4.1. 肺腺癌的病理学特征

肺腺癌的发展是一个持续的过程, 目前主要认为其源于不典型腺瘤样增生, 不典型腺瘤样增生常较局限, 以肺泡 II 型细胞和/或 Clara 细胞增生为特点, 衬覆于肺泡壁大体上, 细胞间存有空隙且不延续, 结节直径常 $\leq 5\text{ mm}$ (见图 1); 之后发展为原位腺癌, 肿瘤细胞继续沿肺泡壁生长, 肺泡腔无聚集, 无间质、血管及邻近胸膜浸润(见图 2); 若此时不予干预, 放任肿瘤继续生长则有可能微浸润腺癌, 直径多 $< 3\text{ cm}$, 表现为贴壁生长的孤立结节, 伴有 1 处或多处 $< 5\text{ mm}$ 浸润灶, 大多数微浸润腺癌为非黏液性(见图 3); 微浸润腺癌再往下发展即是浸润性腺癌[27]。大体标本上, 浸润性腺癌多表现为界限不清的灰黄色外周型病变, 可为单发或多发。部分肿瘤分泌大量黏蛋白, 呈胶冻状或蛋白样外观, 空洞形成较为少见。约 65% 的腺癌位于肺周边, 常邻近脏层胸膜, 可引起胸膜纤维化或皱缩。少数周围型腺癌可播散至胸膜间隙, 广泛覆盖脏层与壁层胸膜, 形态类似弥漫性间皮瘤极少数腺癌表现为支气管内息肉样肿块[28]。需要注意, 贴壁型生长模式并非肺原发性腺癌特有, 亦可见于转移性肿瘤(如来自乳腺或甲状腺), 这些肿瘤 TTF-1 也可能呈阳性。利用肺腺癌这些组织生长的特点, 人为进行病理分级, 为临床提供肿瘤分期, 把握治疗时机, 并对治疗方案效果做正确的评估具有重要作用。

4.2. 肺腺癌的组织学特征

肺腺癌表现的组织学表现出高度异质性,分化程度不一,涵盖高分化原位腺癌(旧称细支气管肺泡癌)至低分化实体型腺癌(曾归为大细胞癌)。常见腺泡型、乳头型和(或)黏液分泌型结构混合存在。部分肺腺癌可见胞质内嗜酸性小球,与黏蛋白小球相区别[29]。在缺乏典型腺样结构或黏液分泌的低分化癌诊断把握时,可结合免疫组织化学标志物 TTF-1 和(或) napsin A 的表达帮助确立腺癌诊断[30],该方法应用的前提是排除其他类型肺癌(如鳞状细胞癌)的可能。

4.3. 肺腺癌的治疗分类与预后

肺腺癌在组织学上常表现为多种生长模式混合。确定主要生长模式对评估患者预后,尤其是淋巴结阴性早期患者的无病生存,具有重要意义:

良好预后组:包括体积小(<3.0 cm)且淋巴结阴性的肿瘤、非浸润性腺癌(原位腺癌)、微浸润性腺癌(浸润灶 <0.5 cm)以及贴壁型为主的腺癌。大多数早期病变无浸润迹象,由非黏液性柱状细胞构成。该类患者的病理切片中无或仅有少量贴壁型成分,多中心随访研究显示预后较好[27]。

不良预后组:包括微乳头型腺癌和实体型腺癌,此生长方式多与晚期病变相关,预后较差。研究表明,在肺腺癌标本中,即使仅见少量微乳头型成分,也提示肿瘤更具侵袭性,治疗后复发和远处转移风险更高[31]。

中等预后组:包括常见的腺泡型、乳头型及浸润性黏液腺癌。少见变异型包括印戒细胞型腺癌、浸润性黏液癌(与胶样癌和囊腺癌形态重叠)、肠型(杯状细胞)分化腺癌、肝样分化腺癌、具横纹肌样特征的腺癌、微囊性腺癌及伴大量淋巴细胞浸润的腺癌[32]。

4.4. 亚实性结节的临床病程与随访管理

在美国一项针对 20 多万人的胸部 CT 筛查实验中,所有发现的肺结节中至少 95%为良性,最常见的是肉芽肿或肺内淋巴结[33]。多数持续性 SSN,尤其是 pGGN,具有生长惰性。即大多数局限性持续性磨玻璃结节在 10 年内不会发生恶化。长期随访数据显示, pGGN 在 5 年随访中保持稳定的比例较高,仅少数出现体积增大或实性成分增加[34],提示此类结节整体预后良好。Zhou 等人随访了 115 例 GGN 病例,探究随访期间 GGN 的生长情况和临床干预措施,结果显示 23.5%的结节中位体积倍增时间为 822 天,中位质量倍增时间为 1007 天,进一步证实了 SSN 的惰性生长特性[35]。在 Zhang 等人对 306 位患者进行了回顾性分析,结果表明,年龄、基线结节直径与平均 CT 值是预测结节生长的独立危险因素, pGGN、hGGN 和 mGGN 各自具有显著不同的自然病程[36]。值得注意的是,多项研究表明 mGGN 的恶性风险显著高于 pGGN,这些研究均认为 mGGN 生长速率越快,实性成分的出现和增加均提示浸润性可能。此外,患者是否存在恶性肿瘤史也被认为是结节进展的重要危险因素之一[14] [36] [37]。

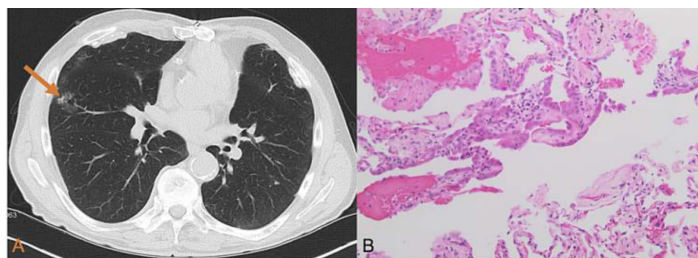


Figure 1. Atypical tumor-like hyperplasia of the lung
图 1. 肺不典型瘤样增生

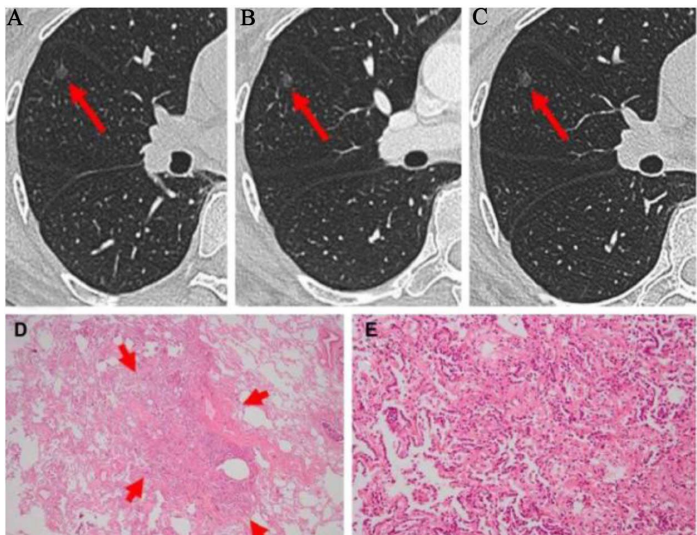


Figure 2. Lung adenocarcinoma *in situ*
图 2. 肺原位腺癌

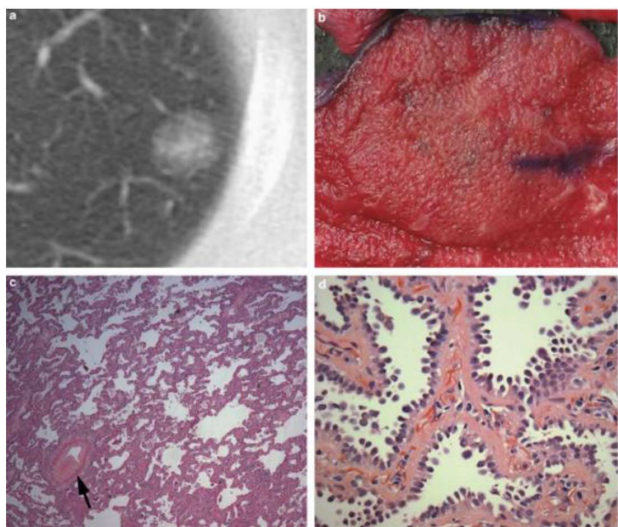


Figure 3. Pulmonary minimally invasive adenocarcinoma and pulmonary adenocarcinoma *in situ*
图 3. 肺微浸润腺癌

图 1(A)显示右中叶有一个 2.8 cm 的磨玻璃样结节(橙色箭头所示)。未发现纵隔淋巴结肿大迹象。图 1(B)显示可见肺实质一个边界清晰的肺泡腔区域，其内衬有细胞体积增大、核明显增大的区域以及轻度核多形性。图 2(A)~(C)显示一种持续存在的云雾状阴影，病理切片如图 2(D)所示，镜下可见立方形、相对均匀的肿瘤细胞群体覆盖增厚及保存完好的肺泡壁。图 3 影像显示右肺上叶发现了一个孤立的磨玻璃样阴影结节。病理切片显示病变主要由鳞状肿瘤生长组成，伴有几个厚度小于 5 毫米的侵袭性腺泡成分(箭头所示)。注：以上图片来源于参考文献[38]-[40]。

5. 目前国际上不同协会对于肺结节的管理和处理指南的差异

随着肺结节尤其是亚实性结节检出率的不断攀升，国际上多个专业组织相继发布了肺结节的管理指南，以期规范其评估与随访流程。然而，不同指南在结节的分类、风险评估、随访间隔及干预阈值等方

面存在一定差异，反映出各地区在人群特征、医疗资源与临床实践中的不同考量。以下通过对比分析四大指南的核心推荐内容，深入探讨其差异背后的证据等级、适用人群和医疗环境因素(表 2)。

Table 2. Comparative analysis of key recommendations for pulmonary nodule management in four major guidelines
表 2. 四大指南在肺结节管理中的核心推荐对比

指南	筛查起始年龄	高危人群定义	结节分类标准	随访间隔	干预阈值	证据等级	适用人群特点	证据来源
中华医学 会指南 (2024)	45 岁	吸烟(≥ 20 包年)、二手烟/环境油烟、职业暴露、个人肿瘤史、一级亲属肺癌家族史、慢性肺部疾病史	非实性结节 ≥ 8 mm 或实性成分 ≥ 5 mm 需随访	1 年	实性成分 ≥ 5 mm 或非实性结节 ≥ 8 mm	2A 类推荐	中国人群特征(女性非吸烟肺癌比例高)	中国临床实践证据
Fleischner Society 2017	≥ 35 岁	无恶性肿瘤史或免疫抑制状态	纯磨玻璃结节 < 6 mm 无需随访; ≥ 6 mm 在 6~12 个月随访; 部分实性结节 < 6 mm 无需随访; ≥ 6 mm 在 3~6 个月随访	3~12 个月	纯磨玻璃结节 ≥ 6 mm; 部分实性结节 ≥ 6 mm	1A-2A 类推荐	适用于一般人群, 不适用于筛查计划参与者	高质量随机对照研究
NCCN 指南	≥ 50 岁	≥ 20 包/年吸烟史	使用 Lung-RADS 分类系统	3~12 个月	高度可疑结节(实性成分增多或结节增大)	1A 类推荐	高危人群(吸烟史明确)	临床试验与荟萃分析多学科共识与临床证据
AATS 指南	未明确	未明确	磨玻璃成分多对应前驱病变, 实性成分提示浸润	3~12 个月	≥ 6 mm 持续性结节	I 类推荐	多学科协作, 个体化治疗	

Fleischner [9]学会于 2017 年发布的指南是目前国际上最具影响力的肺结节管理共识之一，其明确了 SSN 的定义并针对 35 岁以上人群提出了明确的随访策略。该指南指出，对于临床风险较高的所有患者，结节平均直径 < 6 mm 的 pGGN 均无需随访，而影像风险较高者(形态可疑、位于上叶)推荐 12 个月进行随访。而对 ≥ 6 mm 的 pGGN 则推荐在 6~12 个月内进行首次随访，确认稳定性后每 2 年随访一次，持续最长 5 年。对于 mGGN，尤其实性成分 ≥ 6 mm 者，建议更密切的随访(如 3~6 个月)，若持续存在或实性成分增多，应考虑手术干预。值得注意的是，Fleischner 指南主要适用于年龄 ≥ 35 岁、无恶性肿瘤史或免疫抑制状态的个体，且不适用于已参加肺癌筛查计划的人群。相比之下，中华医学会肺癌临床诊疗指南[41] (2024 版，以下简称中华指南)在筛查人群的选择上更注重中国人群的流行病学特征，推荐起始筛查年龄为 45 岁，并将二手烟、环境油烟、职业暴露等非吸烟因素纳入高危人群评估，体现了对本土风险因素的充分考虑。

美国胸外科科学会[1] (American Association for Thoracic Surgery, AATS)于 2023 年发布肺结节管理指南主要是基于多学科国际专家协作与系统文献回顾，共识明确定义了亚实性结节的影像学分类，并强调其与病理结果的对应关系：磨玻璃成分多对应前驱病变，而实性成分则提示浸润可能。在管理策

略上,推荐对所有结节采用薄层 CT (≤ 1 mm)进行精确评估。对于 ≥ 6 mm 的持续性纯磨玻璃结节,建议阶梯式随访至少 5 年,且即使稳定也应考虑延长监测至 10 年,这一建议较 Fleischner 指南更为积极。在手术干预方面,共识基于最新临床试验证据,支持对 ≤ 2 cm 的周围型亚实性结节行亚肺叶切除。对于多发结节,提出以“主病灶为导向”的个体化治疗策略,并认可手术与非手术局部疗法(如立体定向放疗)的联合应用。中华指南在结节管理方面虽未强制使用风险模型,但明确提出对多发性结节应基于最大/最可疑结节进行评估,并强调多学科协作在复杂病例中的核心作用,与 AATS 倡导的个体化策略相呼应。

美国国家综合癌症网络(National Comprehensive Cancer Network, NCCN)的肺癌筛查指南[42]则更侧重于高危人群的筛查与结节随访。NCCN 将 LDCT 筛查对象界定为年龄 ≥ 50 岁、有 ≥ 20 包/年吸烟史的人群,并强调不设戒烟年限上限,这一点与美国预防服务工作组(United States Preventive Services Task Force, USPSTF) [21] (限定 15 年内戒烟者)有所不同。在结节管理方面, NCCN 推荐使用 Lung-RADS 分类系统对筛查中发现的结节进行标准化评估与随访,并对高度可疑结节(如实性成分增多或结节增大)建议增强 CT、PET-CT 或活检以明确性质。中华指南在筛查技术上同样推荐 LDCT 作为首选手段,并在基线及年度筛查中制定了详细的结节管理流程图,强调对实性成分 ≥ 5 mm 或非实性结节 ≥ 8 mm 者需积极随访或干预,与 NCCN 在干预阈值上具有一定一致性。

总体来看,尽管上述指南在细节上存在差异,但其核心理念一致:即通过对结节大小、形态、实性成分及动态变化的系统评估,实现早期肺癌的识别与干预,同时避免对惰性病变的过度诊疗。中华指南在结合中国人群特征和医疗实际的基础上,既吸收了国际共识的精华,又在筛查人群界定、结节分类与随访策略上展现出本土化特色。未来,随着人工智能与影像组学技术的发展,肺结节管理有望进一步趋于精准化、标准化,并在多中心协作中形成更具普适性的国际共识。

6. 结论与展望

本综述系统探讨了基于计算机断层扫描的影像学技术对肺内亚实性结节的诊断效能及其与病理学的相关性。分析表明,常规低剂量 CT 是肺内亚实性结节筛查与随访的基石,但其诊断准确性仍受各地区结节检出阈值标准差异、扫描参数异质性及人群差异的限制。双能量 CT 与 PET-CT 均可提供组织成分与代谢信息,在特定场景下补充对肺内亚实性结节的诊断价值,但两者在实际应用时存在辐射剂量大、成本高昂和对低代谢结节不敏感等局限。人工智能与影像组学通过提取肺内亚实性结节深层次定量特征,在该类疾病的检测、良恶性鉴别及病理亚型区分方面展现出超越传统方法的潜力,其模型性能已接近甚至部分超越部分放射科医师水平。本综述探讨了当前国际共识对肺内亚实性结节惰性自然病程的理解及管理指南的差异,强调了长期、个体化随访策略的重要性。尽管当前计算机断层扫描在诊断肺内亚实性结节方面的研究取得了显著进展,但想要真正的临床精准诊疗仍面临挑战,尤其是人工智能与影像组学在目前的研究中还面临着各地区图像采集标准化不同、图像质量参差不齐、标准化样本量不足、大语言模型可解释性欠缺以及前瞻性多中心验证缺乏等问题。未来,随着计算机技术的不断发展和国际标准化影像病例数据库的建立和完善,人工智能与影像组学有望在未来的诊断系统突破对 CT 形态学特征的单一依赖,向集成多模态信息的方向演进,实现对结节恶性风险、病理分级乃至分子表型的更全面评估。

基金项目

本研究由 2023 年大理大学第一附属医院第二批学科建设项目(DFYXK2023019)及 2024 年云南省专业学位研究生教学案例库(59)资助。

参考文献

- [1] Chen, H., Kim, A.W., Hsin, M., Shrager, J.B., Prosper, A.E., Wahidi, M.M., *et al.* (2024) The 2023 American Association for Thoracic Surgery (AATS) Expert Consensus Document: Management of Subsolid Lung Nodules. *The Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery*, **168**, 631-647.e11. <https://doi.org/10.1016/j.jtcvs.2024.02.026>
- [2] Naidich, D.P., Bankier, A.A., MacMahon, H., Schaefer-Prokop, C.M., Pistolesi, M., Goo, J.M., *et al.* (2013) Recommendations for the Management of Subsolid Pulmonary Nodules Detected at CT: A Statement from the Fleischner Society. *Radiology*, **266**, 304-317. <https://doi.org/10.1148/radiol.12120628>
- [3] Im, J. (2024) Editorial Comment: Heterogeneous Ground-Glass Nodules (GGNs) Are between Pure GGNs and Part-Solid Nodules in Prognosis. *American Journal of Roentgenology*, **222**, e2430990. <https://doi.org/10.2214/ajr.24.30990>
- [4] National Lung Screening Trial Research Team (2011) Reduced Lung-Cancer Mortality with Low-Dose Computed Tomographic Screening. *The New England Journal of Medicine*, **365**, 395-409. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/21714641/>
- [5] Pillay, J., Rahman, S., Klarenbach, S., *et al.* (2024) Screening for Lung Cancer with Computed Tomography: Protocol for Systematic Reviews for the Canadian Task Force on Preventive health Care. *Systematic Reviews*, **13**, Article 88. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/38493159/>
- [6] Henschke, C.I., McCauley, D.I., Yankelevitz, D.F., Naidich, D.P., McGuinness, G., Miettinen, O.S., *et al.* (1999) Early Lung Cancer Action Project: Overall Design and Findings from Baseline Screening. *The Lancet*, **354**, 99-105. [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(99\)06093-6](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(99)06093-6)
- [7] Ye, W., Fu, W., Li, C., Li, J., Xiong, S., Cheng, B., *et al.* (2025) Diameter Thresholds for Pure Ground-Glass Pulmonary Nodules at Low-Dose CT Screening: Chinese Experience. *Thorax*, **80**, 76-85. <https://doi.org/10.1136/thorax-2024-221642>
- [8] Liu, B., Ye, X., Fan, W., *et al.* (2024) Expert Consensus on the Multidisciplinary Diagnosis and Treatment of Multiple Ground Glass Nodule-Like Lung Cancer (2024 Edition). *Journal of Cancer Research and Therapeutics*, **20**, 1109-1123.
- [9] MacMahon, H., Naidich, D.P., Goo, J.M., Lee, K.S., Leung, A.N.C., Mayo, J.R., *et al.* (2017) Guidelines for Management of Incidental Pulmonary Nodules Detected on CT Images: From the Fleischner Society 2017. *Radiology*, **284**, 228-243. <https://doi.org/10.1148/radiol.2017161659>
- [10] Prosper, A.E., Kammer, M.N., Maldonado, F., Aberle, D.R. and Hsu, W. (2023) Expanding Role of Advanced Image Analysis in CT-Detected Indeterminate Pulmonary Nodules and Early Lung Cancer Characterization. *Radiology*, **309**, e222904. <https://doi.org/10.1148/radiol.222904>
- [11] Sun, J.D., Sugarbaker, E., Byrne, S.C., *et al.* (2024) Clinical Outcomes of Resected Pure Ground-Glass, Heterogeneous Ground-Glass, and Part-Solid Pulmonary Nodules. *AJR. American Journal of Roentgenology*, **222**, e2330504. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/38323785/>
- [12] Zhu, X., Shen, C. and Dong, J. (2024) A Clinically Applicable Model More Suitable for Predicting Malignancy or Benignity of Pulmonary Ground Glass Nodules in Women Patients. *BMC Cancer*, **24**, Article No. 1225. <https://doi.org/10.1186/s12885-024-13004-z>
- [13] 双能量 CT 在肺部肿瘤中的应用和现状[EB/OL]. 国际放射医学核医学杂志. <https://metaersp-2.wust.edu.cn/s/com/yiigle/rs/Ghttps/cmaid/1155291>, 2025-10-05.
- [14] Chae, E.J., Song, J., Seo, J.B., Krauss, B., Jang, Y.M. and Song, K. (2008) Clinical Utility of Dual-Energy CT in the Evaluation of Solitary Pulmonary Nodules: Initial Experience. *Radiology*, **249**, 671-681. <https://doi.org/10.1148/radiol.2492071956>
- [15] Yang, Y., Li, K., Sun, D., Yu, J., Cai, Z., Cao, Y., *et al.* (2019) Invasive Pulmonary Adenocarcinomas versus Preinvasive Lesions Appearing as Pure Ground-Glass Nodules: Differentiation Using Enhanced Dual-Source Dual-Energy Ct. *American Journal of Roentgenology*, **213**, W114-W122. <https://doi.org/10.2214/ajr.19.21245>
- [16] Zhang, Y., Tang, J., Xu, J., Cheng, J. and Wu, H. (2017) Analysis of Pulmonary Pure Ground-Glass Nodule in Enhanced Dual Energy CT Imaging for Predicting Invasive Adenocarcinoma: Comparing with Conventional Thin-Section CT Imaging. *Journal of Thoracic Disease*, **9**, 4967-4978. <https://doi.org/10.21037/jtd.2017.11.04>
- [17] 18F-FDG PET/CT 不同重建方法对肺内病灶 SUV 及图像质量的影响[EB/OL]. 2025-03-25. <http://gffh0ed7466bfba94363sqkqc9bo6vw66k96.fffh.dali.cwkeji.cn/Periodical/gwyx-fsyxhyxfc202503004>, 2025-10-07.
- [18] Cuaron, J., Dunphy, M. and Rimner, A. (2013) Role of FDG-PET Scans in Staging, Response Assessment, and Follow-Up Care for Non-Small Cell Lung Cancer. *Frontiers in Oncology*, **2**, Article ID: 208. <https://doi.org/10.3389/fonc.2012.00208>
- [19] 蔡承伦, 杨云龙. 影像组学在肺肿瘤领域中的研究进展[J]. 肿瘤研究与临床, 2022, 34(7): 557-560.
- [20] Qiu, Z., Wu, Q., Wang, S., Chen, Z., Lin, F., Zhou, Y., *et al.* (2022) Development of a Deep Learning-Based Method to

- Diagnose Pulmonary Ground-Glass Nodules by Sequential Computed Tomography Imaging. *Thoracic Cancer*, **13**, 602-612. <https://doi.org/10.1111/1759-7714.14305>
- [21] Li, Y.J., Wang, Y. and Qiu, Z.X. (2024) Artificial Intelligence Research Advances in Discrimination and Diagnosis of Pulmonary Ground-Glass Nodules. *Chinese Journal of Tuberculosis and Respiratory Diseases*, **47**, 566-570.
 - [22] Gong, J., Liu, J., Hao, W., Nie, S., Zheng, B., Wang, S., *et al.* (2019) A Deep Residual Learning Network for Predicting Lung Adenocarcinoma Manifesting as Ground-Glass Nodule on CT Images. *European Radiology*, **30**, 1847-1855. <https://doi.org/10.1007/s00330-019-06533-w>
 - [23] Sun, Q., Huang, Y., Wang, J., Zhao, S., Zhang, L., Tang, W., *et al.* (2019) Applying CT Texture Analysis to Determine the Prognostic Value of Subsolid Nodules Detected during Low-Dose CT Screening. *Clinical Radiology*, **74**, 59-66. <https://doi.org/10.1016/j.crad.2018.07.103>
 - [24] Mei, K., Feng, Z., Liu, H., Wang, M., Ce, C., Yin, S., *et al.* (2025) Preoperative Prediction of Pulmonary Ground-Glass Nodule Infiltration Status by CT-Based Radiomics Combined with Neural Networks. *BMC Cancer*, **25**, Article No. 659. <https://doi.org/10.1186/s12885-025-14027-w>
 - [25] Yang, X., Wang, J., Wang, P., Li, Y., Wen, Z., Shang, J., *et al.* (2025) Deep Learning Model Using CT Images for Longitudinal Prediction of Benign and Malignant Ground-Glass Nodules. *European Journal of Radiology*, **190**, Article 112252. <https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2025.112252>
 - [26] Seidelman, J.L., Myers, J.L. and Quint, L.E. (2013) Incidental, Subsolid Pulmonary Nodules at CT: Etiology and Management. *Cancer Imaging*, **13**, 365-373. <https://doi.org/10.1102/1470-7330.2013.9025>
 - [27] Yoshizawa, A., Sumiyoshi, S., Sonobe, M., *et al.* (2013) Validation of the IASLC/ATS/ERS Lung Adenocarcinoma Classification for Prognosis and Association with EGFR and KRAS Gene Mutations: Analysis of 440 Japanese Patients. *Journal of Thoracic Oncology*, **8**, 52-61.
 - [28] Koss, M.N., Fleming, M., Przygodzki, R.M., *et al.* (1998) Adenocarcinoma Simulating Mesothelioma: A Clinicopathologic and Immunohistochemical Study of 29 Cases. *Annals of Diagnostic Pathology*, **2**, 93-102.
 - [29] Rossi, G., Murer, B., Cavazza, A., *et al.* (2004) Primary Mucinous (So-Called Colloid) Carcinomas of the Lung: A Clinicopathologic and Immuno-Histochemical Study with Special Reference to CDX-2 Homeobox Gene and MUC2 Expression. *The American Journal of Surgical Pathology*, **28**, 442-452.
 - [30] Giesen, C., Del Águila Mejía, J., Armon, S., *et al.* (2024) Exploratory Evidence Maps for the WHO Classification of Tumours 5th Edition for Lung and Thymus Tumors. *Virchows Archiv*, **485**, 869-878.
 - [31] Lee, G., Lee, H.Y., Jeong, J.Y., *et al.* (2015) Clinical Impact of Minimal Micropapillary Pattern in Invasive Lung Adenocarcinoma: Prognostic Significance and Survival Outcomes. *The American Journal of Surgical Pathology*, **39**, 660-666.
 - [32] Inamura, K., Satoh, Y., Okumura, S., *et al.* (2005) Pulmonary Adenocarcinomas with Enteric Differentiation: Histologic and Immunohistochemical Characteristics Compared with Metastatic Colorectal Cancers and Usual Pulmonary Adenocarcinomas. *The American Journal of Surgical Pathology*, **29**, 660-665. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/15832091>
 - [33] Gould, M.K., Tang, T., Liu, I.A., Lee, J., Zheng, C., Danforth, K.N., *et al.* (2015) Recent Trends in the Identification of Incidental Pulmonary Nodules. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, **192**, 1208-1214. <https://doi.org/10.1164/rccm.201505-0990oc>
 - [34] Mase, V.J. and Detterbeck, F.C. (2020) Approach to the Subsolid Nodule. *Clinics in Chest Medicine*, **41**, 99-113. <https://doi.org/10.1016/j.ccm.2019.11.004>
 - [35] Zhou, Y., Zhang, Y., Zhang, S., *et al.* (2023) Growth Regularity of Pulmonary Ground Glass Nodules Based on 3D Reconstruction Technology. *Chinese Journal of Lung Cancer*, **26**, 265-273.
 - [36] Zhang, Z., Zhou, L., Min, X., Li, H., Qi, Q., Sun, C., *et al.* (2023) Long-Term Follow-Up of Persistent Pulmonary Subsolid Nodules: Natural Course of Pure, Heterogeneous, and Real Part-Solid Ground-Glass Nodules. *Thoracic Cancer*, **14**, 1059-1070. <https://doi.org/10.1111/1759-7714.14845>
 - [37] Kim, H., Cho, J.Y., Lee, Y.J., Park, J.S., Cho, Y., Yoon, H.I., *et al.* (2019) Clinical Significance of Pleural Attachment and Indentation of Subsolid Nodule Lung Cancer. *Cancer Research and Treatment*, **51**, 1540-1548. <https://doi.org/10.4143/crt.2019.057>
 - [38] Borczuk, A.C. (2012) Assessment of Invasion in Lung Adenocarcinoma Classification, Including Adenocarcinoma *in Situ* and Minimally Invasive Adenocarcinoma. *Modern Pathology*, **25**, S1-S10. <https://doi.org/10.1038/modpathol.2011.151>
 - [39] Nguyen, C., Larsen, N.K., Dietz, N., Sirineni, G. and Balters, M. (2019) Pulmonary Atypical Adenomatous Hyperplasia: Diagnostic and Therapeutic Implications. *Cureus*, **11**, e6079. <https://doi.org/10.7759/cureus.6079>
 - [40] Qiu, Z., Cheng, Y., Liu, D., Wang, W., Wu, X., Wu, W., *et al.* (2016) Clinical, Pathological, and Radiological Characteristics

of Solitary Ground-Glass Opacity Lung Nodules on High-Resolution Computed Tomography. *Therapeutics and Clinical Risk Management*, **12**, 1445-1453. <https://doi.org/10.2147/tcrm.s110363>

- [41] 中华医学会肿瘤学分会. 中华医学会肺癌临床诊疗指南(2024 版) [J]. 中华医学杂志, 2024, 104(34): 3175-3213.
- [42] Wood, D.E., Kazerooni, E.A., Baum, S.L., Eapen, G.A., Ettinger, D.S., Hou, L., *et al.* (2018) Lung Cancer Screening, Version 3.2018, NCCN Clinical Practice Guidelines in Oncology. *Journal of the National Comprehensive Cancer Network*, **16**, 412-441. <https://doi.org/10.6004/jnccn.2018.0020>