

# 尘肺病诊断的研究进展

王 维, 杨天文, 杜 航\*

重庆医药高等专科学校附属第一医院, 职业病防治与中毒救治重庆市重点实验室, 重庆

收稿日期: 2025年1月19日; 录用日期: 2025年2月12日; 发布日期: 2025年2月19日

## 摘 要

尘肺病作为一种因劳动者在生产作业过程中吸入生产性粉尘而引发的肺组织弥漫性纤维化病症, 有矽肺、煤工尘肺等12种类型, 在我国属于极为严重的职业病范畴。近年来发达国家尘肺病的发病率与死亡数据呈现下降态势, 但中国尘肺病依旧是职业健康范畴内亟待攻克的关键难题。尘肺病的诊断和早期筛查对于防治至关重要, 有助于及时采取干预措施, 减缓病程进展, 降低致残率。文章对尘肺病影像学发展和早期生物标志物的探索及可能面临的挑战做出一个总结, 为未来尘肺病影像学及辅助诊断技术研究方向提供参考依据。

## 关键词

尘肺病, 影像学, 生物标志物, 诊断

# Research Progress on the Diagnosis of Pneumoconiosis

Wei Wang, Tianwen Yang, Hang Du\*

Chongqing Key Laboratory of Occupational Disease Prevention and Poisoning Treatment, The First Affiliated Hospital of Chongqing Medical and Pharmaceutical College, Chongqing

Received: Jan. 19<sup>th</sup>, 2025; accepted: Feb. 12<sup>th</sup>, 2025; published: Feb. 19<sup>th</sup>, 2025

## Abstract

Pneumoconiosis, characterized by diffuse pulmonary fibrosis resulting from occupational dust inhalation, encompasses 12 subtypes, including silicosis and coal workers' pneumoconiosis. It is categorized as a severe occupational disease in China. Although developed countries have observed a decline in pneumoconiosis incidence and mortality rates, the condition continues to pose a significant challenge in China's occupational health sector. Early diagnosis and screening are essential for

\*通讯作者。

the prevention and management of pneumoconiosis, enabling prompt intervention, disease progression mitigation, and disability rate reduction. This paper reviews advancements in imaging methodologies and the identification of early biomarkers for pneumoconiosis, as well as discusses the challenges encountered to inform future research in the field of pneumoconiosis imaging and diagnostic technologies.

## Keywords

Pneumoconiosis, Imaging, Biomarker, Diagnosis

Copyright © 2025 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

尘肺病是因长期暴露于生产环境中并吸入生产性粉尘，进而导致肺组织呈现弥漫性纤维化特征的职业性疾病[1]。长期吸入无机矿物质粉尘，如二氧化硅等，导致肺部功能逐渐下降，不仅对患者的生理健康造成损害，还对他们的心理健康和社会功能产生负面影响。根据《中华人民共和国国家职业卫生标准：尘肺病诊断标准》(GBZ 70-2015)，尘肺病包括矽肺、煤工尘肺、石棉肺等 12 种类型[2]。全球范围内，尘肺病的发病率和死亡率在发达国家已显著下降，但在中国等发展中国家，尘肺病仍然是一个严重的公共卫生问题。依据国家卫生健康委员会所发布的数据，2019 年中国尘肺病的新增病例数量占据了全部职业病新增病例数量的 82%，此情形凸显了尘肺病防控工作所具有的紧迫程度与重要意义[3]。

尘肺病多发于矿产开采、建筑施工等行业，因长期吸入矿物粉尘所致，其诊断与治疗存在早期发现难、病情隐匿不可逆及缺乏特效疗法等局限[4]-[6]，严重影响患者健康，给其家庭带来心理和经济重负，增加了企业成本和社会保障压力。尘肺病已从医疗问题演变为社会问题，威胁劳动力市场稳定和区域经济发展，尘肺病的防治已经成为政府、企业和社会各界亟待解决的重要议题，妥善处理对社会稳定和谐与经济社会可持续发展至关重要。

## 2. 尘肺病诊断的研究现状

本研究主要阐述尘肺病诊断的影像学技术及其早期生物标志物，影像学诊断是尘肺病诊断的基础，通过 X 线摄影和 CT 扫描等技术，可以直观地观察肺部的纤维化程度和病变范围，但由于其在早期尘肺病的识别上存在一定的局限性，加上尘肺病其潜伏期长且目前尘肺病后期治疗手段仍较少，生物标志物通过检测血液、体液或组织中的特定分子信号反映尘肺病的病理生理过程，为尘肺病的早期诊断和精准管理提供新的途径和思路。

### 2.1. 尘肺病影像学诊断

在尘肺病的诊断过程中，主要依据为患者有可靠的生产性矿物粉尘暴露历史，结合高质量的 X 射线高千伏或数字化放射(DR)正位胸片表现。诊断时，医务工作者需严格按照既定标准，通过评估 X 光胸片中微小阴影的整体密集程度、肺区的分布范围以及是否存在阴影聚集、大面积阴影或胸膜斑等情况，来确定疾病的分期：可以被分为 I 期、II 期和 III 期三个阶段[2]。随着医学影像学技术的发展，CT 技术和 AI 计算机辅助技术也对尘肺病的诊断起到了很好的辅助鉴别作用。

### 2.1.1. X 线胸片

自 20 世纪初 X 射线被发现以来, X 线胸片就成为了肺部疾病诊断的重要工具。在尘肺病的诊断领域中, X 线胸片的应用可以追溯到上个世纪中叶, 当时由于工业革命带来的职业性疾病问题日益凸显, X 线胸片成为评估肺部纤维化和结节性病变的主要手段[7]-[9], 由于其经济性、便捷性等优势, 一直是尘肺病检查的首选方法。随着影像学技术的快速发展, 目前临床实施的检查手段主要包括传统的高千伏 X 线胸片、数字化 X 线摄影(DR)和计算机 X 线摄影(CR)。

高千伏 X 线胸片是尘肺病诊断的基础工具。它能够提供病变的存在、范围和分布等信息, 并能对病变进行分级, 指导治疗决策。国际劳工组织(ILO)在 1980 年制定了尘肺的 X 射线诊断分类标准, 而中国则遵循 GBZ 70-2009 尘肺诊断标准, 该标准同样维持了使用高千伏 X 射线胸片作为诊断依据。

数字化 X 线摄影(DR)已成为尘肺病筛查和诊断中不可或缺的工具。与高千伏胸片相比, DR 胸片在技术层面展现出显著优势, 其辐射剂量处于较低水平, 量子探测效率颇为可观, 曝光宽容度较大, 影像数据能够长期存储且重复性表现强[10]-[13]。根据曾刘桃等人的研究, DR 技术因其高分辨率和成像质量, 已在尘肺病的诊断中显示出重要价值, 尤其是其图像后处理功能, 如放大、反转、降噪等。数字化摄影技术的诞生, 极大程度地提升了图像的分辨率与明晰度, 让尘肺病的诊断精准性得以显著提高[14]。在 2017 年, 王峥等学者开展的研究对我国尘肺病 X 线诊断标准的演进历程予以回顾。研究表明, 从 1963 年《矽肺 X 线分期及其诊断标准》的拟定, 至 GBZ 70-2015《职业性尘肺病的诊断》的施行, 我国尘肺病 X 线诊断标准持续迈向国际化并日臻完善[15]。国际上, 国际劳工组织(ILO)自 1950 年起始便着手拟定并更新尘肺病的 X 线分类标准[16], 旨在契合全球尘肺病诊断之所需, 既为尘肺病诊断构筑起统一的参照基准, 亦为 X 线胸片的解读给予标准化的指引。

计算机 X 线摄影(CR)使用特殊的磷光板来捕获 X 线图像, 通过读取器将这些图像转换成数字格式, 使得图像可以被增强、放大和分析。这种数字化处理有效提高了图像质量, 还通过调整窗宽和窗位来优化图像显示, 更好地检测小结节性病变[17]。这对于早期尘肺病的检测尤其有价值, 因为这些病变可能在早期阶段不容易被传统 X 线技术发现。CR 技术可以减少患者的辐射剂量, 对于长期从事高粉尘暴露职业的工人来说是一个重要的考虑因素。CR 技术支持高保真存储、传输、调阅和复制, 有效提高了图像质量和工作效率, 为远程医疗和专家会诊提供了可能性, 对于资源有限或偏远地区的尘肺病诊断尤为重要。

### 2.1.2. 计算机断层扫描(CT)

计算机断层扫描(CT)在尘肺病的诊断和分期中的作用尤为显著, 早期 CT 技术主要被用于研究尘肺病的病理生理机制, 如肺组织的纤维化和结节形成, CT 扫描提供了比传统 X 线胸片更详细的肺部结构信息, 可以辅助医务工作者能够更准确地评估肺部病变的程度和分布[17]-[20]。

高分辨率 CT (HRCT)的问世, 使尘肺病早期病变的检测能力获得极大提升, 于石棉肺与煤工尘肺的诊断方面作用尤为突出[21]。高分辨率计算机断层扫描(HRCT)所采用的容积扫描技术, 可在一次呼吸周期或心动周期内达成整个胸部的成像操作, 成功降低因患者身体运动引发的伪影现象, 使肺部组织图像的清晰度得以增强。HRCT 的容积扫描能够采集到组织的三维数据, 这些数据能够实施各向同性重建, 保障病变组织在各个维度上的特征均能被切实、精准地呈现。当前的技术水平已经能够实现对薄层图像的重建, 层厚可达到 0.5 毫米或更薄, 降低漏诊的风险, 有助于确保病变组织特征在各方向上的准确性和真实性[22]-[24]。与 X 胸片及常规 CT 相比, HRCT 能够显示肺部细微的结构变化, 肺间质的增厚和肺泡的破坏, 对于尘肺早期可逆性病变组织可清晰显示, 便于早期干预治疗, 对尘肺病的早期辅助诊断和治疗至关重要[25] [26]。

CT 重建的后处理技术涵盖最大密度投影(MIP)、多平面重建(MPR)、表面阴影显示(SSD)及容积渲染

技术(VRT)等多种类型,这些技术在尘肺的鉴别诊断工作中有着较为广泛的运用[27]。MPR 技术能够提供任意角度的肺部切片图像,全面评估肺部病变的分布和范围;MIP 技术通过投影显示肺内结构的最大密度,对于检测小结节和纤维化病变具有较高的敏感性;SSD 技术则通过模拟肺部病变的外部轮廓,增强了病变的可视性;VRT 技术通过三维重建,提供了更为直观的肺部病变空间结构,以助于理解病变立体形态和相邻结构的关系[28]-[30]。研究[31]-[33]表明,通过对比尘肺病患者的 HRCT 图像和 MIP 重建图像,发现 MIP 能够更清晰地显示肺内小结节和纤维化病变,提高了病变的检出率;VRT 技术能够直观展示肺大泡和肺纤维化的范围,在评估尘肺病患者肺功能损害和预后方面非常重要,为临床治疗决策提供了重要参考。

低剂量 CT 技术通过减少辐射剂量,同时保持足够的图像质量,为尘肺病的早期检测和监测提供了有效的工具。研究表明,LDCT 在检测尘肺病中的小结节和纤维化方面具有较高的敏感性和特异性[34]。Manners 等学者开展的研究显示,超低剂量 CT(ULDCT)可提供充足的放射学依据,用以支撑石棉肺的诊断工作,并且在针对石棉相关胸膜疾病进行筛查时,具备极为可观的应用价值[35]。在尘肺病的筛查和早期诊断中,LDCT 技术尤为重要。Ludes 等人的研究指出,ULDCT 在筛查石棉接触相关疾病时,并不逊色于标准 CT,且能大幅降低辐射剂量[36],对于尘肺病的筛查和长期监测尤为重要。

### 2.1.3. AI 计算机辅助诊断

随着人工智能技术的发展,尘肺病的 X 线胸片和 CT 技术诊断的 AI 辅助诊断应用迎来了新的变革。深度学习等 AI 技术被用于提高 X 线胸片的诊断准确性和效率[37] [38]。Wang 等人[39]表示深度学习模型 INSTIMATION-V3 在尘肺病的 DR 图像分类中表现出较好的性能,表明 AI 技术在尘肺病筛查中具有一定的可行性。王峥[40]等研究人员运用全卷积神经网络 U-Net 模型针对 DR 图像予以判别,其结果显示尘肺病的诊断准确率高达 95%,该准确率明显超越了两位医师的诊断准确水平,充分表明基于人工智能模型的计算机辅助诊断能够极大地提升尘肺病诊断的精确程度。

## 2.2. 尘肺病生物标志物早期诊断

由于影像学技术不能评估患者的功能状态,并且其诊断结果晚于疾病的发生。加上尘肺病其潜伏期长且目前尘肺病后期治疗手段仍较少,寻找生物标志物并应用于尘肺病的防治具有重要价值。

### 2.2.1. 尘肺病的发病机制

尘肺病的发病机制主要包括机体的慢性炎症和肺部纤维化[41]。主要涉及长期吸入生产性粉尘,尤其是含有二氧化硅的粉尘,被巨噬细胞吞噬并导致细胞毒性,从而出现肺部组织弥漫性纤维化。这一过程始于粉尘颗粒被肺泡巨噬细胞吞噬,引发一系列炎症反应、氧化应激、纤维化以及细胞凋亡[42]。这些机制相互作用,共同推动肺部病变的发展。特别是粉尘颗粒的吞噬激活了 NF- $\kappa$ B 等转录因子,导致炎症因子如 TNF- $\alpha$  和 IL-1 $\beta$  的释放[43],进而引发氧化应激和组织损伤。随着病情进展,这些变化可能导致肺功能减退和呼吸衰竭。

### 2.2.2. 早期诊断的生物标志物

在慢性炎症方面,尘肺病的早期生物标志物包括白细胞介素(IL-1 $\beta$ , IL-6 和 IL-8 等)、肿瘤坏死因子(TNF)- $\alpha$ 、趋化因子及核结合蛋白(HMGB-1) [44]-[46]。这些细胞因子在尘肺病的炎症反应中起到核心作用:IL-1 $\beta$  作为一种先天免疫的促炎因子,在尘肺病患者肺部炎症和纤维化病灶中高表达,通过诱导机体产生多种炎症因子,加重炎症反应,虽可以反映尘肺病患者粉尘接触的情况,但其敏感性需进一步验证;IL-6 和 IL-8 在尘肺病中具有抗炎、促炎和促纤维化等功能,其表达和分泌量的异常与尘肺病的发展密切相关,均可作为尘肺病早期诊断的生物标志物;TNF- $\alpha$  作为一种多功能细胞因子,参与机体炎症和免疫

反应, 研究表明其水平的升高与粉尘接触水平和尘肺病严重程度有关; 趋化因子是一种小分子蛋白, 可以反映多种肺部疾病的易感性和严重程度, 研究表明尘肺病患者体内血清单核细胞趋化因子(Monocyte chemotactic Protein, MCP)-1 水平、血清单核细胞趋化因子(Monocyte Chemotactic Protein, MCP)-1 水平及周围血 CXC 趋化因子等多种趋化因子水平发生不同程度的变化; HMGB-1 作为一种普遍的核结合蛋白, 不仅参与 DNA 的转录与重组, 也可作为炎症因子参与免疫反应, 对尘肺病的诊断和反映其严重程度有着重要的提示作用。

就肺部纤维化而言, 转化生长因子(TGF)- $\beta$ 1 和基质金属蛋白酶(MMP-MMP-2 和 MMP-9) [47] [48]属于关键的促纤维化要素之一。转化生长因子(TGF)- $\beta$ 1 借助对免疫反应的抑制以及对细胞外基质成分的诱导作用, 推动肺部纤维化发展。TGF- $\beta$ 1 的异常表达水平和粉尘接触程度存在关联, 其过度表达能够引发炎症细胞的渗出与活化, 最终致使瘢痕组织形成与纤维化现象产生。MMP-2 和 MMP-9 也在尘肺病的纤维化过程中发挥作用, 通过降解细胞外基质蛋白, 调节肺部结构的重塑。

### 3. 尘肺病诊断的挑战和未来方向

#### 3.1. 诊断标准的统一和更新

尘肺病作为一种职业性疾病, 其诊断标准的统一和更新对于全球范围内的疾病监测和患者管理至关重要。国际劳工组织(ILO)在尘肺病的诊断分类中扮演了核心角色, 其 U/ICC 分类系统自 1950 年首次发布以来, 已成为全球尘肺病诊断的金标准[48]。ILO 分类系统通过标准化 X 线影像的解读, 促进了不同国家和地区之间尘肺病诊断的一致性。随着医学影像技术的进步, 尤其是高分辨率计算机断层扫描(HRCT)的应用, 尘肺病的诊断标准也在不断更新。HRCT 能够提供更详细的肺部结构信息, 有助于早期识别和分类尘肺病。一些国家开始探索将 HRCT 纳入尘肺病的诊断标准中, 以提高诊断的敏感性和特异性。《职业性尘肺病的诊断》(GBZ 70-2015)的发布, 标志着中国尘肺病诊断标准与国际标准进一步接轨。该标准不仅包括了传统的 X 线胸片解读, 还对数字化摄影胸片的技术要求进行了规定, 为尘肺病的诊断提供了更多样化的工具。但尘肺病诊断标准的统一和更新仍面临挑战。不同地区和国家在医疗资源、技术水平和职业健康政策上的差异, 导致了尘肺病诊断标准的实施难度。国际劳工组织(ILO)的 U/ICC 分类系统虽然已成为全球尘肺病诊断的金标准, 但在不同国家和地区的适应性和可及性上仍存在挑战。尘肺病诊断标准的统一和更新是一个动态的过程, 需要全球范围内的合作和不断的技术革新。未来的研究应聚焦于提高诊断标准的科学性、适用性和可及性, 以更好地服务于尘肺病患者的诊断和治疗。

#### 3.2. 诊断技术创新的应用和探索

尘肺病的诊断技术在过去几十年中经历了显著的创新和发展。从传统的 X 线胸片到现代的计算机断层扫描(CT)和高分辨率 CT(HRCT), 再到新兴的人工智能(AI)辅助诊断及早期诊断的生物标志物的探索, 这些技术的进步有效提高了尘肺病的诊断准确性和效率, 但其实践中也面临着一系列挑战。

X 线胸片的分辨率有限, 对于尘肺病的早期诊断和细微病变的识别能力不足, 这限制了其在疾病早期阶段的诊断效能。胸片的解读受到读片者的经验和主观性影响, 导致读片结果的一致性和准确性存在差异, 尤其是在区分尘肺病的不同阶段时。此外, X 线胸片无法提供关于肺部病变深度和性质的信息, 对于病变的定量分析和纤维化程度的评估能力有限。

CT 在尘肺病诊断中具有明显优势, 但也存在一些挑战, HRCT 其高昂的成本和辐射风险限制了其在常规筛查中的应用, 并且对设备的依赖性、对操作者技术的高要求以及对图像解读的主观性都阻碍了其进一步发展。未来的研究需要进一步优化 CT 扫描技术, 提高图像的标准化和解读的客观性以及探索 CT 与其他影像技术如磁共振成像(MRI)的联合应用, 以实现更全面的尘肺病诊断。

人工智能技术在尘肺病诊断中的发展和应用也面临诸多挑战。AI 技术的训练和验证需要大量的高质量数据,而这些数据的收集和标注是一个耗时且成本高昂的过程。AI 模型的泛化能力和可解释性也是当前研究的关键问题。如何将 AI 技术与现有的诊断流程和标准相结合,提高其在实际临床应用中的有效性和可靠性是未来研究的关键方向。

尘肺病的机制复杂,慢性炎症和肺部纤维化等方面的作用机制和临床验证研究有了较好的结论,但目前尘肺病临床研究上尚存在标志物筛选较为分散、缺少重复性研究、单一标志物特异性不强等问题,仍难以全面反映并解释尘肺病发生发展的全过程及其复杂性。

#### 4. 结论与展望

尘肺病作为一种常见的职业性疾病,使得其影像学技术和生物早期标志物诊断研究有了意义非常的进展和挑战。X 线胸片作为一种传统的诊断方式,虽然在呈现肺部初期病变时存在一定的局限之处,其依旧是尘肺病筛查与诊断工作的基础手段。目前的 DR 技术已然成为尘肺病诊断的核心手段,拥有一套相对成熟的诊断规范,在成像成效以及尘肺病诊断效能方面表现优异,且具备丰富的图像处理特性。不过,DR 技术在不同设备间的参数准则仍有待进一步优化,不同资历及经验水平的医师在诊断的精准性与一致性方面也尚有提升空间。如何对 DR 设备参数进行调试以实现最优状态,提升胸片质量以及尘肺病诊断的准确性,是很有研究价值的方向。高分辨率计算机断层扫描(HRCT)技术得以应用之后,尘肺病诊断的精确性有了显著的提升,尤其在早期病变的甄别以及纤维化病变的评测环节作用突出。当下有必要对影像学检查流程展开动态的优化与标准化工作,增强诊断的一致性与准确性。综合考量成本效益与辐射风险,低剂量 CT 技术的研发与应用状况是否能够应用于尘肺病合并症的诊断工作,均有待进一步深入探讨。人工智能(AI)技术不断发展,为尘肺病的影像学诊断开辟了崭新的路径,借助深度学习算法提升病变检测的灵敏性与特异性。AI 技术在尘肺病诊断方面尚处于起步时期,不过其针对 DR 图像的识别与分类具备可挖掘的潜力,需大量深入的研究验证其在各类尘肺病以及不同阶段的适用性与有效性。目前关于炎性细胞因子、转化生长因子(TGF)- $\beta$ 1、基质金属蛋白酶(MMP)等生物标志物在尘肺病发生发展进程中的作用机理与临床验证研究,已收获较为理想的成果,但对于探寻具备高敏感性与高特异性的早期生物标志物,以及探究多种生物标志物联合效果的潜在可能性等[49],仍需展开更为深入的研究工作。

#### 基金项目

重庆市科卫联合医学科研面上项目(2022MSXM076)《基于肠-肺轴的全新角度探索职业性尘肺的潜在治疗策略》;重庆市科卫联合医学科研面上项目(2022MSXM148)《痰液涎液化糖链抗原(KL-6)与脂质联合检测在尘肺诊断中的应用研究》;南岸区科技局决策咨询与创新研究计划(2020NAKJ04)《GDF11 通过介导 PI3K/AKT/mTOR 通路抑制胰腺癌细胞增殖的机制研究》。

#### 参考文献

- [1] 李德鸿. 不要把尘肺病防治引入歧途[J]. 环境与职业医学, 2018, 35(4): 283-285.
- [2] 中华人民共和国国家卫生健康委员会. GBZ70-2015 职业性尘肺病的诊断[S]. 2015.
- [3] 国家卫生健康委员会. 2022 年 4 月 25 日新闻发布会文字实录[EB/OL]. <http://www.nhc.gov.cn/xcs/s3574/202204/2fbf355668df4fd0ade8b5c3cf455f95.shtml>, 2022-04-26.
- [4] 王峥, 张建芳, 钱青俊. 我国职业性尘肺病诊断标准的演变和发展[J]. 中国工业医学杂志, 2017(1): 69-71.
- [5] 鲁洋, 刘拓, 朱秋鸿. 我国职业病诊断标准应用情况调查[J]. 中国卫生标准管理, 2022, 13(13): 1-5.
- [6] 胡莲花, 李辉, 盛秋洁. 2013-2023 年深圳市职业病防治院尘肺病筛查诊断情况研究[J/OL]. 中国典型病例大全, 2024, 18(4): 80-86.

- [7] Pham, Q.T. (2001) Chest Radiography in the Diagnosis of Pneumoconiosis. *The International Journal of Tuberculosis and Lung Disease*, **5**, 478-482.
- [8] Leonard, J.F. and Templeton, P.A. (1992) Pulmonary Imaging Techniques in the Diagnosis of Occupational Interstitial Lung Disease. *Occupational Medicine*, **7**, 241-260.
- [9] Cullinan, P., Muñoz, X., Suojalehto, H., Agius, R., Jindal, S., Sigsgaard, T., *et al.* (2017) Occupational Lung Diseases: From Old and Novel Exposures to Effective Preventive Strategies. *The Lancet Respiratory Medicine*, **5**, 445-455. [https://doi.org/10.1016/s2213-2600\(16\)30424-6](https://doi.org/10.1016/s2213-2600(16)30424-6)
- [10] Hering, K., Borsch-Galetke, E., Elliehausen, H., Frank, K., Hieckel, H., Hofmann-Preiß, K., *et al.* (2009) Digitale Radiografie in der Untersuchung von arbeits- und umweltbedingten Lungen- und Pleuraerkrankungen. *Pneumologie*, **63**, 664-668. <https://doi.org/10.1055/s-0029-1215110>
- [11] Lee, W. and Choi, B. (2012) Utility of Digital Radiography for the Screening of Pneumoconiosis as Compared to Analog Radiography. *Health Physics*, **103**, 64-69. <https://doi.org/10.1097/hp.0b013e318249ac5d>
- [12] Suganuma, N., Yoshida, S., Takeuchi, Y., Nomura, Y.K. and Suzuki, K. (2023) Artificial Intelligence in Quantitative Chest Imaging Analysis for Occupational Lung Disease. *Seminars in Respiratory and Critical Care Medicine*, **44**, 362-369. <https://doi.org/10.1055/s-0043-1767760>
- [13] Chen, J.Q., Jiang, Z.Q., Xiao, Y., Zhao, Y.W. and Zhang, X. (2012) The Analysis of Consistency between Digital Radiography and High-KV Chest Radiographs in Diagnosis Pneumoconiosis. *Chinese Journal of Industrial Hygiene and Occupational Diseases*, **30**, 8-12.
- [14] 曾刘桃, 陈钧强, 蒋兆强. 尘肺病影像学诊断的研究进展[J]. 预防医学, 2021, 33(12): 1236-1239.
- [15] 王峥. 计算机辅助诊断在尘肺病诊断中的应用[J]. 世界最新医学信息文摘, 2019, 19(8): 78-79.
- [16] ILO (2023) ILO International Classification of Radiographs of Pneumoconioses. <https://www.ilo.org/resource/ilo-international-classification-radiographs-pneumoconioses-1>
- [17] 曲良勇, 苑翠红, 钮建武, 刘靖. 数字 X 射线摄影在尘肺筛查中的应用研究[J]. 中国辐射卫生, 2018, 27(5): 507-510.
- [18] Xia, L., Lü, F., Wang, Y., Sheng, B. and Zhou, S. (2012) Compute Tomography-Based Quantitative Evaluation of Pneumoconiosis. *Journal of Southern Medical University*, **32**, 1768-1772.
- [19] Hu, X., Zhou, R., Hu, M., Wen, J. and Shen, T. (2022) Differentiation and Prediction of Pneumoconiosis Stage by Computed Tomography Texture Analysis Based on U-Net Neural Network. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, **225**, Article 107098. <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2022.107098>
- [20] Zhang, X., Kusaka, Y. and Ishii, Y. (1995) Computed Tomography of Pneumoconiosis. *Sangyo Eiseigaku Zasshi*, **37**, 321-328. [https://doi.org/10.1539/sangyoisei.37.5\\_321](https://doi.org/10.1539/sangyoisei.37.5_321)
- [21] Franquet, T., Giménez, A. and Díaz, C. (2017) Asbestos-Related Diseases: The Role of Imaging. *Radiographics*, **37**, 1883-1902.
- [22] 王振光, 马大庆, 陈步东, 贺文, 王新莲, 刘大亮. 容积数据高分辨率 CT 重组在弥漫性肺疾病中的应用[J]. 中华放射学杂志, 2005, 39(11): 1153-1156.
- [23] 夏艺, 管宇, 范丽, 等. 高分辨率 CT 容积定量技术在慢性阻塞性肺疾病中的应用研究[J]. 医学影像学杂志, 2013, 23(8): 1219-1222.
- [24] 程雪菲. 《胸部 CT 诊断》出版: 胸部高分辨率 CT 技术的临床应用探讨[J]. 介入放射学杂志, 2021, 30(12): 13-32.
- [25] 周绍权, 夏露花, 吕富荣. 早期尘肺 HRCT 影像学表现及优势[J]. 重庆医学, 2013, 42(11): 1305-1307.
- [26] 金盛辉, 柳澄, 王焕强. 尘肺病胸部 CT 规范化检查技术专家共识(2020 年版) [J]. 环境与职业医学, 2020, 37(10): 943-949.
- [27] 中国疾病预防控制中心. T/WSJD 32-2023 胸部 CT 辅助诊断尘肺病技术指南[EB/OL]. [https://www.medsci.cn/guideline/show\\_article.do?id=21d1e1c0030e09d2](https://www.medsci.cn/guideline/show_article.do?id=21d1e1c0030e09d2), 2024-12-19.
- [28] 中国卫生监督协会. 胸部 CT 辅助诊断尘肺病技术指南[T/WSJD32-2023] [EB/OL]. <https://niohp.chinacdc.cn/sndt/202303/P020230330351513611430.pdf>, 2024-12-19.
- [29] Rajkomar, A., Lingam, S., Taylor, A.G., Blum, M. and Mongan, J. (2016) High-Throughput Classification of Radiographs Using Deep Convolutional Neural Networks. *Journal of Digital Imaging*, **30**, 95-101. <https://doi.org/10.1007/s10278-016-9914-9>
- [30] Wang, X., Yu, J., Zhu, Q., Li, S., Zhao, Z., Yang, B., *et al.* (2020) Potential of Deep Learning in Assessing Pneumoconiosis Depicted on Digital Chest Radiography. *Occupational and Environmental Medicine*, **77**, 597-602. <https://doi.org/10.1136/oemed-2019-106386>
- [31] Savranlar, A., Altın, R., Mahmutyazıcıoğlu, K., Özdemir, H., Kart, L., Özer, T., *et al.* (2004) Comparison of Chest Radiography and High-Resolution Computed Tomography Findings in Early and Low-Grade Coal Worker's Pneumoconiosis.

- European Journal of Radiology*, **51**, 175-180. <https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2003.10.017>
- [32] 王宁宁, 靳毅, 王成霞, 等. 尘肺病影像学及 AI 辅助诊断技术的研究进展[J]. 职业与健康, 2024, 40(6): 851-855.
- [33] Sakai, M., Murayama, S., Gibo, M., Akamine, T., Yoshinaga, M., Iraha, S., *et al.* (2005) Can Maximum Intensity Projection Images with Multidetector-Row Computed Tomography Help to Differentiate between the Micronodular Distribution of Focal and Diffuse Infiltrative Lung Diseases? *Journal of Computer Assisted Tomography*, **29**, 588-591. <https://doi.org/10.1097/01.rct.0000175710.98923.a2>
- [34] Preisser, A.M., Schlemmer, K., Herold, R., Laqmani, A., Terschüren, C. and Harth, V. (2020) Relations between Vital Capacity, CO Diffusion Capacity and Computed Tomographic Findings of Former Asbestos-Exposed Patients: A Cross-Sectional Study. *Journal of Occupational Medicine and Toxicology*, **15**, Article No. 21. <https://doi.org/10.1186/s12995-020-00272-1>
- [35] Manners, D., Wong, P., Murray, C., Teh, J., Kwok, Y.J., de Klerk, N., *et al.* (2017) Correlation of Ultra-Low Dose Chest CT Findings with Physiologic Measures of Asbestosis. *European Radiology*, **27**, 3485-3490. <https://doi.org/10.1007/s00330-016-4722-7>
- [36] Ludes, C., Schaal, M., Labani, A., Jeung, M., Roy, C. and Ohana, M. (2016) Scanner Thoracique Ultra-Basse Dose: La mort de la radiographie thoracique? *La Presse Médicale*, **45**, 291-301. <https://doi.org/10.1016/j.lpm.2015.12.003>
- [37] 李继生. 尘肺病影像学诊断的研究进展[J]. 中国农村卫生, 2024, 16(9): 22.
- [38] 张敏, 陈钧强. 人工智能技术在尘肺病诊断中的应用研究进展[J]. 环境与职业医学, 2020, 37(2): 192-196.
- [39] Zhang, L., Rong, R., Li, Q., Yang, D.M., Yao, B., Luo, D., *et al.* (2021) A Deep Learning-Based Model for Screening and Staging Pneumoconiosis. *Scientific Reports*, **11**, Article 2201. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-77924-z>
- [40] 王峥, 贺文. 深度残差网络在尘肺病诊断中的应用初探[J]. 中国工业医学, 2019, 32(1): 31-33.
- [41] Costantini, L.M., Gilberti, R.M. and Knecht, D.A. (2011) The Phagocytosis and Toxicity of Amorphous Silica. *PLOS ONE*, **6**, e14647. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0014647>
- [42] Privalova, L.I., Katsnelson, B.A., Sharapova, N.Y. and Kislitsina, N.S. (1995) On the Relationship between Activation and Breakdown of Macrophages in the Pathogenesis of Silicosis (An Overview). *La Medicina del Lavoro*, **86**, 511-521.
- [43] Ates, I., Yucesoy, B., Yucel, A., Suzen, S.H., Karakas, Y. and Karakaya, A. (2011) Possible Effect of Gene Polymorphisms on the Release of TNF $\alpha$  and IL1 Cytokines in Coal Workers' Pneumoconiosis. *Experimental and Toxicologic Pathology*, **63**, 175-179. <https://doi.org/10.1016/j.etp.2009.11.006>
- [44] 闫鑫华, 户元元, 田燕歌. 职业性尘肺病相关生物标志物研究进展[J]. 中国职业医学, 2022, 49(3): 355-360.
- [45] 代静, 彭方达, 吴智君, 等. 粉尘接触人群生物监测研究进展[J]. 中国职业医学, 2024, 51(1): 105-110+115.
- [46] 吴玛莉, 张涛, 陈燕. 职业性尘肺病生物标志物研究进展[J]. 中国职业医学, 2022, 49(1): 101-105+110.
- [47] 寇杰. 基质金属蛋白酶基因多态性与尘肺易感性研究[D]: [硕士学位论文]. 秦皇岛: 华北理工大学, 2015.
- [48] Cabral-Pacheco, G.A., Garza-Veloz, I., Castruita-De la Rosa, C., Ramirez-Acuña, J.M., Perez-Romero, B.A., Guerrero-Rodriguez, J.F., *et al.* (2020) The Roles of Matrix Metalloproteinases and Their Inhibitors in Human Diseases. *International Journal of Molecular Sciences*, **21**, Article 9739. <https://doi.org/10.3390/ijms21249739>
- [49] 徐海明, 刘科良, 郝艳星, 等. 生物标志物的联合检测对矽肺早期辅助诊断的价值[J]. 癌变·畸变·突变, 2020, 32(5): 395-397+401.