

人工智能技术在新冠肺炎影像学中的应用

刘菲^{1*}, 徐媛^{2,3}, 周文策⁴, 刘波^{1,3,4#}

¹滨州医学院医学影像学院, 山东 滨州

²兰州大学第二医院放射科, 甘肃 兰州

³医学影像人工智能甘肃省国际科技合作基地, 甘肃 兰州

⁴兰州大学第二医院普外科, 甘肃 兰州

收稿日期: 2023年5月21日; 录用日期: 2023年6月14日; 发布日期: 2023年6月25日

摘要

新型冠状病毒肺炎(Corona Virus Disease 2019, COVID-19)是一种通过密切接触和呼吸道飞沫传播导致的严重呼吸道疾病, 传染病大流行对人们健康和生命安全、公共卫生防疫体系和社会稳定性及经济发展有巨大影响。人工智能(Artificial Intelligence, AI)是流行病相关研究中热点技术, 在COVID-19疫情期间发挥重要作用。本文重点介绍医学影像学 with AI 技术的医工交叉在COVID-19患者临床诊断、病程发展、治疗决策、疗效评估及COVID-19疫情防控等方面的应用进行综述, 以期提高临床的效率, 减轻医务人员的负担。

关键词

COVID-19, 人工智能, 深度学习, 机器学习, 影像诊断

Application of Artificial Intelligence Technology in COVID-19 Imaging

Fei Liu^{1*}, Yuan Xu^{2,3}, Wence Zhou⁴, Bo Liu^{1,3,4#}

¹School of Medical Imaging, Binzhou Medical University, Binzhou Shandong

²Department of Radiology, Second Hospital of Lanzhou University, Lanzhou Gansu

³Gansu International Scientific and Technological Cooperation Base of Medical Imaging Artificial Intelligence, Lanzhou Gansu

⁴Department of General Surgery, Second Hospital of Lanzhou University, Lanzhou Gansu

Received: May 21st, 2023; accepted: Jun. 14th, 2023; published: Jun. 25th, 2023

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 刘菲, 徐媛, 周文策, 刘波. 人工智能技术在新冠肺炎影像学中的应用[J]. 临床医学进展, 2023, 13(6): 9851-9859. DOI: 10.12677/acm.2023.1361378

Abstract

Corona Virus Disease 2019 (COVID-19) is a severe respiratory disease transmitted by close contact and respiratory droplets. The infectious disease pandemic has a great impact on people's health and life safety, public health and epidemic prevention system, social stability and economic development. Artificial Intelligence (AI) is a hot technology in epidemic related research and plays an important role during the COVID-19 epidemic. This article focuses on the application of the intersection of medical imaging and AI technology in the clinical diagnosis, course of disease, treatment decision-making, efficacy evaluation, and prevention and control of COVID-19, in order to improve clinical efficiency and reduce the burden on medical staff.

Keywords

COVID-19, Artificial Intelligence, Deep Learning, Machine Learning, Imaging Diagnosis

Copyright © 2023 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

新型冠状病毒肺炎(Corona Virus Disease 2019, COVID-19)的传播具有高传染性和隐蔽性[1] [2] [3]。据世界卫生组织 2023 年 1 月 30 日的报道, COVID-19 正接近爆发的转折点, 但其仍旧是构成国际关注的突发公共卫生事件, 主要是由于 COVID-19 患者在不同病程时期临床症状有所不同, 从发热、干咳等轻症[2] [4] [5]可继续发展为急性呼吸窘迫综合征(Acute Respiratory Distress Syndrome, ARDS) [6]或重型肺炎, 甚至死亡[7] [8]。早期诊断对 COVID-19 患者显得尤为重要, 治疗方案的选取及疗效的评估也是预测预后关键。

影像学检查, 如 X 线和电子计算机断层扫描(Computed Tomography, CT)是肺部疾病诊断的重要工具, 也在 COVID-19 的诊断中具有独特的优势[9] [10] [11] [12]。可以迅速地提供详细的信息, 协助医师做出准确的判断[13] [14] [15]。人工智能(Artificial Intelligence, AI)是一门不断发展的基于计算机技术的新兴学科, 被广泛应用于各个领域[16]。将 AI 技术应用于影像学图像, 有助于辅助疾病早期诊断及鉴别诊断、评估影像学分期、预测预后及治疗效果, 提高诊断效率和精准性, 降低地区之间医疗卫生水平差距[17]。其中, 深度学习(Deep Learning, DL)和机器学习(Machine Learning, ML)算法为 COVID-19 的排查与分析做出巨大贡献[18]。AI 技术已成为全球的新冠肺炎疫情下评估和应对疫情的重要工具。因此本研究使用 AI 为 COVID-19 患者的胸部影像学图像进行分析, 从而高效便利地诊断、治疗及评估预后[17] [19]。

2. 人工智能在 COVID-19 诊疗应用现状

目前, AI 已被用于防控疫情的各个方面[20]。使用 AI 技术处理影像学图像可以用于缩短扫描时间和后处理时间, 直接提高工作效率, 节约大量医疗资源[17] [21]; 人们使用 DL 和基于结构的方法筛选并鉴定出两种抗 COVID-19 的天然化合物, 分别为巴马汀和索驰酮, 这两种化合物与 COVID-19 中的 Main 蛋白酶(Mpro 酶)有高亲和力, 可结合成稳定配合物, 从而抑制 Mpro 酶活性, 该发现极大地支持了药物研发和创新工作[22]; AI 技术在疫情的预测和监控方面也发挥了至关重要的作用。

2.1. 诊断

肺内磨玻璃密度影(Ground-Glass Opacity, GGO)是 COVID-19 在 CT 上的最常见的重要影像学特征[12] [23] [24] [25] [26]。COVID-19 患者的肺部 CT 的变化可分为四个阶段[24] [27] [28] [29] [30]。早期可在单侧或双侧肺下叶见 GGO; 进展期患者的双侧肺叶多会有弥漫性 GGO; 重症期[3]肺实变会更加常见, 并伴有小叶间隔增厚的 GGO; 在 14 天后多为恢复期, 病灶明显吸收, 边界趋于清晰, 仅有少部分患者会残留 GGO [31] [32] [33]。在面对 COVID-19 患者的大量影像学图像, 仅靠医师人工诊断耗费大量的时间和精力, 且高强度工作可能会影响医师的判断力, 对图像的判读出现误差。AI 技术具有在几秒钟内定位病灶的强大能力, 它可以极大地减轻医生从影像学图像中仔细查找和判断病灶的工作量。AI 技术在医学领域的发展也启发研究人员将 AI 技术应用于医学影像学方面的研究。

研究人员通过收集大量 COVID-19 患者影像数据进行训练、分析, 并对复杂病例进行分类得到构建 AI 模型[34] [35] [36]。例如, Song Y 等[37]通过对 88 例 COVID-19 患者、100 例细菌性肺炎患者和 86 例健康对照者的胸部 CT 扫描数据进行对比学习, 在预训练 ResNet50 的基础上构建一种基于 DL 的算法——DRE Net, 该模型准确率为 0.93, 证明 DL 在辅助医生诊断 COVID-19 患者具有可行性; Wang B 等[38]提出一种组合的“分割-分类”模型管道, 该管道利用先进的分割模型(如全卷及网络 U-Net、V-Net、3D U-Net)以及分类模型(如 DPN-92、Inception-v3、ResNet-50 和 ResNet-50), 通过对模型的经验训练和评估选择出最佳诊断模型为三维 U-Net++, 并对其重复训练至模型性能 AUC 为 0.991, 可以突出显示病变区域特征性信息, 从而帮助医师快速定位并详细检查病灶, 为 COVID-19 的诊断做出巨大贡献; Sara H. K.等[39]从深度学习卷积神经网络(Deep learning convolutional Neural Networks, CNN)池选取 Mobile Net、Dense Net、Xception、Res Net、InceptionV3、Incept ResNetV2、VGG Net、NAS Net 等模型进行比较, 最佳组合是 DenseNet121 特征提取器和 Bagging 树分类器, 预测准确率达到 0.99, 即只需上传影像学图像, 就能提供初步预测 COVID-19 患者。此外, H. Mukherjee 等[40]提出一种可以同时识别胸部 X 线和 CT 影像的深度学习神经网络(deep neural network, DNN)来识别 COVID-19 阳性病例的准确率为 96.28%。Ghoshal 和 Tucker [41]通过研发贝叶斯 CNN 算法, 基于开放数据库中 68 例 COVID-19 胸部 X 线图像, 评价深度学习算法识别肺炎的不确定性, 进一步改善医师和 AI 的诊断效能。

利用 AI 技术分割图像感兴趣区(Region of Interest, ROI)也被广泛应用于 COVID-19 的诊断。Chen 等[42]使用基于 U-Net++的自动分割技术分割病灶, 该研究构建的识别 COVID-19 模型准确度为 95.2%, 灵敏度为 100%, 特异性为 93.6%, 在该模型辅助下, 放射科医生平均阅读时间比其独立诊断减少了 65%, 极大地提高医生的诊断效率; C. Zheng 等[43]提出了基于 U Net 3D 的 CNN 模型, 该模型 ROC 曲线的灵敏度为 0.907、特异性为 0.911, 使用该模型的 DeCoV Net 算法对肺部进行分割, 并将分割的肺区域输入 3D CNN 可以预测感染 COVID-19 的概率准确度为 90.1%、阳性预测值为 84.0%、阴性预测值为 98.2%, Shi 等人[44]对 2685 例肺炎患者的胸部 CT 图像进行处理, 预处理使用 VB-Net, 将感染部位分割成不同的部分, 应用随机森林模型基于各种手工勾画的特征, 该模型性能的灵敏度、特异性和准确率分别为 90.7%、83.3%和 87.9%。综上所述, 基于 X 线或 CT 影像的 AI 模型对 COVID-19 的检测性能与经验丰富的放射科医师相近, 能对 COVID-19 进行初步诊断和对医疗资源合理分配。

2.2. 鉴别诊断

COVID-19 患者的典型影像学表现有助于早期诊断, 但其他类型肺部疾病, 尤其是病毒性肺炎在影像学上与 COVID-19 具有相似性[12] [45], 均出现以 GGO 为主要表现的病灶区[30] [46] [47], 且可能与感染与炎性表现重叠区域, 增大了医生诊断的难度系数, 容易误诊, 鉴别诊断在临床实践和制定诊疗方案中有重大的意义。

影像组学[48]通过采集影像学图像,分割图像的感兴趣区,包括手动和自动两种分割方法提取病灶图像特征,统计分析病灶体积、密度和纹理特征等多维度的了解疾病信息,观察病灶的变化[17] [49] [50],影像组学特征主要包括形状、纹理及变换特征等[51],影像组学技术可以将影像学特征与患者其他临床特征相结合,对大量影像学数据信息进行深度处理、预测和分析从而辅助医生作出最准确的诊断[52] [53],现已广泛应用于肿瘤方面的诊断,例如,汪靖婷等[54]搜集周围性肺癌和肺腺癌患者的 CT 图像,建立临床、影像组学及临床组学预测模型,使用 ROC 曲线评价模型诊断效能,建立鉴别诊断的列线图,显示出较好的诊断效能。应用影像组学对鉴别 COVID-19 患者和其他肺部疾病患者也起到了巨大的作用。

多位学者使用 AI 辅助 COVID-19 患者胸部 X 线和 CT 的鉴别诊断。例如, Wang Shuai 等人[55]提出了一种 CNN 模型,纳入 79 例 COVID-19 患者和 180 例典型病毒肺炎患者的胸部 CT,并绘制图像 ROI 进行预处理和训练,经过训练优化,其诊断结果与病原学检测结果高度一致,将该模型的性能与熟练的影像学医生的性能进行了比较时显示出更高的准确性和敏感性,将可能成为筛查流行病的有力工具; Apostolopoulos 和 Mpesiana [56]收集 224 例 COVID-19 患者胸部 X 线、700 例社区获得性肺炎及 504 例正常胸部 X 线图像,利用卷积神经网络(Convolutional Neural Networks, CNN)的迁徙学习(transfer learning)在胸部 X 线图像上提取与 COVID-19 相关的基本特征,鉴别的最佳准确性、灵敏度和特异性为 96.78%、98.66%及 96.46%,有助于实现 COVID-19 的低成本、快速和自动诊断; Wang 和 Wong [57]基于 CNN 开发了深度学习算法模型 COVID-Net,引入包含 13,870 例患者病例的总计 13,975 张胸部 X 线图像的 COVID x 数据集,对 COVID-Net 进行训练评估,预测 COVID-19 患者的精准度达到 83.5%,医生可以在筛查过程中利用这些预测,帮助他们迅速做出准确的评估; Liu 等[58]采用了一个基于肺部病变分割模型和诊断分析模型的 AI 诊断系统,将肺部病变影像学图像作为分割网络生成的输入,使用了 260 例患者的 40,880 个图像,包括 83 例 COVID-19 患者、91 例普通肺炎患者和 86 例健康者测试类器模型,该系统能够将 COVID-19 患者与其他两类区分开来,准确率为 0.9249,灵敏度为 0.9493,特异性为 0.9113,且具有准确性和普遍适用性,可以帮助影像学医生进行快速诊断。

AI 辅助胸部影像学图像的分割对 COVID-19 的鉴别诊断具有重要意义。Xu 等人[59]提出通过 DL 算法自动筛检 COVID-19 的 CT 影像,并对 110 例 COVID-19 患者的 219 例胸部 CT 图像、156 例其他类型肺炎患者和 175 例健康人群三组病例的胸部 CT 图像使用 3D-CNN 分割模型进行分离,采用经典的 ResNet-18 网络结构进行图像特征提取和注意力机制(Attention Mechanism, AM)的模型进行比较,得到区分 COVID-19 患者的整体总准确率为 86.7%,有望成为医生有效的辅助诊断方法; Jin 等[60]提出了一种基于 DL 的诊断 COVID-19、社区获得性肺炎(Community-Acquired Pneumonia, CAP)、流感和非肺炎的 AI 系统,以 CT 图像作为数据,执行图像分割、COVID-19 定位和鉴别诊断,对 496 例 COVID-19 患者和 1385 例非 COVID-19 患者的肺部 CT 图像进行分割,识别 COVID-19 例的特异性为 95.5%,敏感性为 94.1%,AUC 为 0.979,且 AI 系统的平均阅片时间为 2.73 秒,在 COVID-19 方面的诊断性能略高于影像学医生,能够显著提高放射科医生的工作效率。

AI 技术应用于 COVID-19 患者影像学鉴别诊断大大提高了鉴别效率,有利于防疫措施的迅速开展,为患者的积极治疗提供了有利的帮助。

2.3. 治疗过程评估

随着患者病情严重程度分级的提高,肺部病灶密度存在增加趋势[13] [61] [62] [63] [64] [65]。AI 技术可以准确定位肺内病灶[66] [67] [68],并计算 COVID-19 病变在肺内所占容积比和病灶密度对病情分级、提示病情动态变化[19],也用来评估患者的疗效及预后预测[14] [69]。

AI 算法辅助 COVID-19 患者多方面评估。例如, Huang [70]等使用由 DL 算法对 126 例轻、中、重

及危重型 COVID-19 患者的胸部 CT 扫描自动生成的定量图像参数(肺阴影百分比, QCT-PLO), 评估了初始基线特征和随时不同类型 COVID-19 QCT-PLO 严重程度的纵向变化, 客观评估 COVID-19 的肺部受累, 用于量化疾病负担和监测疾病进展或预测疗效; 赵建华等[71]使用北京推想科技有限公司的 AI 肺炎辅助诊断系统分割 COVID-19 患者胸部 CT 图像的 ROI, 并测量病灶的体积和密度, 该系统利用迁移学习技术, 纳入大量 COVID-19 患者的 CT 数据进行训练, 通过 DL 分割模型勾画肺病灶, 计算肺炎病灶的密度、体积、占肺叶和整肺体积的百分比预测患者的严重程度, 协助影像学医生分析异常病例和重症病例, 有序化分级治疗及疗效评估等, 有效控制 COVID-19 的重症率; Liu 等[58]使用 AI 技术生成的定量测量可以评估药物疗效, 肺部 CT 图像病灶大小和体积量化病情的严重程度, 测量病灶的变化比较药物治疗前和治疗后结果之间的差异, 通过 CT 扫描定量测量病灶变化, 显示 AI 系统在客观定量评估药物疗效方面具有潜力, AI 系统结合临床数据还可以准确评估预后, 帮助临床医生设计针对性的诊疗方案和适当地分配医疗资源; Qian 等[72]对患者进行大规模的回溯性、队列和 AI 辅助研究, 使用 DL 中的多任务学习算法(Multi-task Learning, MTL)分割 CT 图像、提取特征并计算体积, 引入 3D U-Net 对大规模数据进行分类, 使用 AI 系统标记肺叶中的 GGO 和实变病灶并计算体积、受累肺叶的数量和每个肺叶中的病灶体积百分比, 初步评估危险因素, 识别和监测高危人群, 便于医生及时关注高危人群的健康状况。

此外, 苏祝平等[65]利用影像组学方法建立描述肺部 CT 特征与不同阶段 COVID-19 患者病灶变化列线图模型, 以预测患者肺部病灶的转归, 得到当出现不规则条索影、充气支气管征和不规则形态病灶的比例 $\geq 50\%$ 时, 肺部病灶将会得到改善, 该模型具有较高的敏感性和特异性; Mushtaq 等[73]使用深度学习 AI 系统量化 697 例 COVID-19 患者初始胸部 X 线肺部受累严重程度, 评估肺损伤分数来预测患者不良预后, 将其性能与 RALE 评分进行了比较(RALE 评分是一种已被验证用于评估 ARDS 患者的严重程度和预测结局影像学评分), 两种影像学评分的危险比相似, 且大多数高于临床危险因素, 证明基于深度学习的 AI 系统具有通过初始胸部 X 线预测重症和死亡病例的能力; Yue 等[74]使用基于 ML 的影像组学模型提取患者 CT 高通量放射特征, 提取了隐藏在病灶、GGO 和实变中的特征, 并使用多中心队列进行训练和独立队列进行测试, 最终得到基于 ML 的 CT 影像组学特征和模型具有使用初始胸部 CT 预测 COVID-19 患者住院时间的可行性和准确性的结论, 提示医生关注预测结果为长期住院的患者, 避免病情加重恶化。

AI 用于监测 COVID-19 患者病灶类型、评估疾病进展和预测预后, 降低了影像学医师观察肺部影像学图像的主观性, 有利于准确评估患者治疗效果; 也可以通过对肺部 CT 图像的评估, 将患者按病情严重程度分流, 提高诊治效率, 使医疗资源合理分配。

3. 小结

自 COVID-19 爆发至今, 科研人员和医务人员积极开发应对疫情的方法。AI 技术是当前发展的热点技术, 尤其是 ML 和 DL 技术, 广泛应用于疫情防治的各个阶段, 尤其适用于感染者迅速增长的开放初期, 成为 COVID-19 中不可或缺的辅助手段。本综述重点是汇总既往 AI 技术与 COVID-19 冠状病毒临床诊疗相关研究, 以期提高医师的工作效率, 为未来流行病及 AI 研究提供参考。综上, 将临床研究与 AI 技术结合, 可以对 COVID-19 情况进行诊断、鉴别、病情严重程度评估和预后预测, 还可以对接触者进行跟踪控制疫情的扩散, 以期望疫情的消失。

4. 未来展望

随着健康码行程卡的下线和防疫措施的取消, COVID-19 感染人数还在不断隐藏式增长, 甚至部分患者康复后又重复感染, 严重威胁人们生命健康安全。AI 技术辅助手段为大量 COVID-19 患者的就诊及

预后评估提供高效便捷的帮助。使用以 AI 为基础模型来应对疫情及未来可能发生的流行病, 仍需计算机科学家与医学领域专家的努力与大量实践, 为医疗领域提供信息科学的前沿应用, 提升医护人员诊疗效率和医疗服务能力。

基金项目

国家自然科学基金地区科学基金项目(No. 82260555)。

参考文献

- [1] 翟萌, 姜惠芬. 新冠病毒肺炎 COVID-19 的传播途径及预防和防护[J]. 基因组学与应用生物学, 2020, 39(10): 4895-4898.
- [2] 国家消化内镜专业质控中心, 中国医师协会内镜医师分会, 中华医学会消化内镜学分会. 新型冠状病毒肺炎疫情防控期间 ERCP 诊疗专家共识[J]. 中华实验外科杂志, 2020(9): 393-398.
- [3] 刘蓬然, 等. 人工智能技术在抗击新型冠状病毒肺炎疫情中的应用进展[J]. 中华全科医师杂志, 2022, 21(6): 567-572.
- [4] 叶鸣昱, 曹华. 新型冠状病毒感染与皮炎在皮肤、肺部表现的异同点[J]. 临床内科杂志, 2023, 40(3): 159-162.
- [5] 程诚, 等. 新型冠状病毒肺炎确诊患者首发临床症状分析[J]. 郑州大学学报(医学版), 2022, 57(6): 788-791.
- [6] 傅小云, 等. 浅析新型冠状病毒肺炎并发急性呼吸窘迫综合症的病理及病理生理[J]. 中国呼吸与危重监护杂志, 2022, 21(10): 756-760.
- [7] Ozder, A. (2020) A Novel Indicator Predicts 2019 Novel Coronavirus Infection in Subjects with Diabetes. *Diabetes Research, Clinical Practice*, **166**, Article ID: 108294. <https://doi.org/10.1016/j.diabres.2020.108294>
- [8] Soltani, J. (2020) Pediatric Coronavirus Disease 2019 (COVID-19): An Insight from West of Iran. *Northern Clinics of Istanbul*, **7**, 284-291.
- [9] Wu, A.J., et al. (2023) Detection of COVID-19 Pulmonary Manifestations with Radiotherapy Simulation CT Imaging. *Clinical Imaging*, **93**, 83-85. <https://doi.org/10.1016/j.clinimag.2022.11.008>
- [10] Fang, Y., Zhang, H., Xie, J., Lin, M., Ying, L., Pang, P. and Ji, W. (2020) Sensitivity of Chest CT for COVID-19: Comparison to RT-PCR. *Radiology*, **296**, E115-E117. <https://doi.org/10.1148/radiol.2020200432>
- [11] Lei, J., Li, J., Li, X. and Qi, X. (2020) CT Imaging of the 2019 Novel Coronavirus (2019-nCoV) Pneumonia. *Radiology*, **295**, 18. <https://doi.org/10.1148/radiol.2020200236>
- [12] 熊永江, 等. 16 例 COVID-19 患者的影像回顾[J]. 中国研究型医院, 2020, 7(2): 36-40.
- [13] Shi, H., et al. (2020) Radiological Findings from 81 Patients with COVID-19 Pneumonia in Wuhan, China: A Descriptive Study. *The Lancet Infectious Diseases*, **20**, 425-434. [https://doi.org/10.1016/S1473-3099\(20\)30086-4](https://doi.org/10.1016/S1473-3099(20)30086-4)
- [14] 陈静, 等. 定量 CT 评估新型冠状病毒肺炎患者肺部改变的可行性分析[J]. 中国 CT 和 MRI 杂志, 2022, 20(10): 28-30.
- [15] 黄文鹏, 等. 双源双能量 CT 成像在新型冠状病毒肺炎中的应用价值[J]. 中华消化病与影像杂志(电子版), 2022, 12(4): 198-203.
- [16] 杨柳青. 人工智能在数字缩微建设中的应用[J]. 农业图书情报学报, 2020, 32(4): 59-67.
- [17] 王娜娜, 等. 人工智能辅助诊断系统在 COVID-19 患者病程变化中的诊疗作用[J]. 中国医疗设备, 2022, 37(8): 37-41+65.
- [18] Babu, C., Rahul, M.O. and Chandy, D. (2022) Deep Learning Based COVID-19 Detection Using Medical Images: Is Insufficient Data Handled Well? *Current Medical Imaging*, **19**, 307-311. <https://doi.org/10.2174/1573405618666220803123626>
- [19] 黄晓旗, 等. 基于 AI 定量检测新型冠状病毒肺炎胸部 CT 演变特征分析[J]. 中国 CT 和 MRI 杂志, 2022, 20(11): 55-57.
- [20] 孙书魁, 等. 人工智能在新型冠状病毒肺炎中的研究综述[J]. 计算机工程与应用, 2023, 59(5): 28-39.
- [21] 张淙越, 杨晓玲. 基于卷积神经网络的新冠肺炎 CT 图像识别系统[J]. 电脑与信息技术, 2022, 30(3): 12-14+40.
- [22] Joshi, T., et al. (2020) Predictive Modeling by Deep Learning, Virtual Screening and Molecular Dynamics Study of Natural Compounds against SARS-CoV-2 Main Protease. *Journal of Biomolecular Structure and Dynamics*, **39**,

- 6728-6746. <https://doi.org/10.1080/07391102.2020.1802341>
- [23] 刘勇彬, 等. 多发磨玻璃影为主要表现的 COVID-19 患者 CT 及临床特征分析[J]. CT 理论与应用研究, 2020, 29(3): 289-294.
- [24] 吴姗姗, 等. 新型冠状病毒肺炎的临床表现及 CT 影像学特点[J]. 中国 CT 和 MRI 杂志, 2022, 20(6): 71-73.
- [25] 苗强, 等. COVID-19 肺部 CT 影像学表现[J]. 徐州医科大学学报, 2021, 41(4): 306-309.
- [26] 唐茂文, 等. 新冠肺炎(COVID-19)临床信息及胸部 CT 影像表现的初步探讨及文献复习[J]. 中国 CT 和 MRI 杂志, 2023, 21(1): 56-59.
- [27] 蔡冠晖, 等. 新型冠状病毒肺炎胸部高分辨率 CT 影像分期与鉴别[J]. 医学影像学杂志, 2020, 30(8): 1380-1383.
- [28] 陈志勇, 等. 新型冠状病毒肺炎的临床表现及 CT 影像学特点[J]. 放射学实践, 2020, 35(3): 286-290.
- [29] 马琼, 等. 新型冠状病毒肺炎临床及影像学研究进展[J]. 中国临床医学, 2020, 27(1): 23-26.
- [30] 张晓彤, 余延辉, 陈延. 3 例心源性肺水肿误诊为新型冠状病毒肺炎的影像学表现分析[J]. 中国中西医结合影像学杂志, 2022, 20(1): 53-55+80.
- [31] 郑敬, 等. COVID-19 患者康复早期临床特征、肺功能及影像学随访[J]. 解放军医学院学报, 2021, 42(4): 368-371+406.
- [32] 沈晶, 等. COVID-19 患者胸部 CT 表现特点及其演变规律[J]. CT 理论与应用研究, 2021, 30(2): 199-207.
- [33] 向容, 刘翔维, 吴勇. 新型冠状病毒肺炎的 CT 表现[J]. 中国 CT 和 MRI 杂志, 2022, 20(7): 70-72.
- [34] 萧毅, 刘士远. 人工智能技术在新型冠状病毒肺炎诊治中的应用及价值[J]. 中国医学影像学杂志, 2021, 29(4): 289-292.
- [35] Ghashghaei, S., *et al.* (2022) Grayscale Image Statistics of COVID-19 Patient CT Scans Characterize Lung Condition with Machine and Deep Learning. *Chronic Diseases and Translational Medicine*, **8**, 191-206. <https://doi.org/10.1002/cdt3.27>
- [36] Neri, E., Miele, V., Coppola, F. and Grassi, R. (2020) Use of CT and Artificial Intelligence in Suspected or COVID-19 Positive Patients: Statement of the Italian Society of Medical and Interventional Radiology. *La Radiologia Medica*, **125**, 505-508. <https://doi.org/10.1007/s11547-020-01197-9>
- [37] Song, Y., *et al.* (2021) Deep Learning Enables Accurate Diagnosis of Novel Coronavirus (COVID-19) with CT Images. *IEEE/ACM Transactions on Computational Biology and Bioinformatics*, **18**, 2775-2780. <https://doi.org/10.1109/TCBB.2021.3065361>
- [38] Wang, B., *et al.* (2021) AI-Assisted CT Imaging Analysis for COVID-19 Screening: Building and Deploying a Medical AI System. *Applied Soft Computing*, **98**, Article ID: 106897. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2020.106897>
- [39] Kassania, S.H., *et al.* (2021) Automatic Detection of Coronavirus Disease (COVID-19) in X-Ray and CT Images: A Machine Learning Based Approach. *Biocybernetics and Biomedical Engineering*, **41**, 867-879. <https://doi.org/10.1016/j.bbe.2021.05.013>
- [40] Mukherjee, H., *et al.* (2020) Deep Neural Network to Detect COVID-19: One Architecture for Both CT Scans and Chest X-Rays. *Applied Intelligence*, **51**, 2777-2789. <https://doi.org/10.1007/s10489-020-01943-6>
- [41] Biraja Ghoshal, A.T. (2020) Estimating Uncertainty and Interpretability in Deep Learning for Coronavirus (COVID-19) Detection. (Preprint)
- [42] Chen, J., *et al.* (2020) Deep learning-Based Model for Detecting 2019 Novel Coronavirus Pneumonia on High-Resolution Computed Tomography. *Scientific Reports*, **10**, Article No. 19196. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-76282-0>
- [43] Zheng, C., *et al.* (2020) Deep Learning-Based Detection for COVID-19 from Chest CT Using Weak Label. *IEEE Transactions on Medical Imaging*. (Preprint) <https://doi.org/10.1101/2020.03.12.20027185>
- [44] Shi, F., *et al.* (2021) Large-Scale Screening to Distinguish between COVID-19 and Community-Acquired Pneumonia Using Infection Size-Aware Classification. *Physics in Medicine & Biology*, **66**, Article ID: 065031. <https://doi.org/10.1088/1361-6560/abe838>
- [45] 黄益龙, 等. CT 影像组学联合征象鉴别新型冠状病毒肺炎与其他病毒性肺炎的价值[J]. 中华放射学杂志, 2022, 56(1): 36-42.
- [46] 吴清, 等. 疑似 COVID-19 的阴性患者影像学鉴别诊断[J]. 现代医药卫生, 2021, 37(9): 1532-1534.
- [47] 耿国军, 等. COVID-19 与早期肺癌磨玻璃样变的 HRCT 影像特征对比分析[J]. 中华胸心血管外科杂志, 2020, 36(7): 393-396.
- [48] 刘发明, 等. 新型冠状病毒肺炎的影像组学研究[J]. 中国医学物理学杂志, 2020, 37(4): 463-467.

- [49] 张振华, 等. 基于 AI 技术的新型冠状病毒肺炎 CT 影像特点分析[J]. 医疗卫生装备, 2020, 41(5): 6-8+27.
- [50] 钟琦, 等. CT 影像组学对鉴别 COVID-19 和甲型 H1N1 流感的应用研究[J]. 临床放射学杂志, 2021, 40(10): 1939-1943.
- [51] 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.
- [52] Ge, C., et al. (2022) COVID-19 Imaging-Based AI Research—A Literature Review. *Current Medical Imaging*, **18**, 496-508. <https://doi.org/10.2174/1573405617666210902103729>
- [53] Mei, X., et al. (2020) Artificial Intelligence-Enabled Rapid Diagnosis of Patients with COVID-19. *Nature Medicine*, **26**, 1224-1228. <https://doi.org/10.1038/s41591-020-0931-3>
- [54] 汪靖婷, 等. 基于临床及 CT 影像组学特征构建周围型小细胞肺癌与肺腺癌诊断模型的研究[J]. 临床放射学杂志, 2023, 42(3): 406-410.
- [55] Wang, S., et al. (2021) A Deep Learning Algorithm Using CT Images to Screen for Corona Virus Disease (COVID-19). *European Radiology*, **31**, 6096-6104. <https://doi.org/10.1007/s00330-021-07715-1>
- [56] Apostolopoulos, I.D. and Mpesiana, T.A. (2020) Covid-19: Automatic Detection from X-Ray Images Utilizing Transfer Learning with Convolutional Neural Networks. *Physical and Engineering Sciences in Medicine*, **43**, 635-640. <https://doi.org/10.1007/s13246-020-00865-4>
- [57] Wang, L., Lin, Z.Q. and Wong, A. (2020) COVID-Net: A Tailored Deep Convolutional Neural Network Design for Detection of COVID-19 Cases from Chest X-Ray Images. *Scientific Reports*, **10**, Article No. 19549. <https://doi.org/10.1007/s13246-020-00865-4>
- [58] Zhang, K., et al. (2020) Clinically Applicable AI System for Accurate Diagnosis, Quantitative Measurements, and Prognosis of COVID-19 Pneumonia Using Computed Tomography. *Cell*, **181**, 1423-1433. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2020.04.045>
- [59] Xu, X., et al. (2020) A Deep Learning System to Screen Novel Coronavirus Disease 2019 Pneumonia. *Engineering*, **6**, 1122-1129. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2020.04.010>
- [60] Jin, C., et al. (2020) Development and Evaluation of an Artificial Intelligence System for COVID-19 Diagnosis. *Nature Communications*, **11**, Article No. 5088. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18685-1>
- [61] Chung, M., et al. (2020) CT Imaging Features of 2019 Novel Coronavirus (2019-nCoV). *Radiology*, **295**, 202-207. <https://doi.org/10.1148/radiol.2020200230>
- [62] Bernheim, A., et al. (2020) Chest CT Findings in Coronavirus Disease-19 (COVID-19): Relationship to Duration of Infection. *Radiology*, **295**, 685-691. <https://doi.org/10.1148/radiol.2020200463>
- [63] Bai, H.X., et al. (2020) Performance of Radiologists in Differentiating COVID-19 from Non-COVID-19 Viral Pneumonia at Chest CT. *Radiology*, **296**, E46-E54. <https://doi.org/10.1148/radiol.2020200823>
- [64] 詹朝土, Boitshepo, G.T. 重型或危重型新型冠状病毒肺炎 46 例高分辨率 CT 征象分析[J]. 中国现代医药杂志, 2022, 24(12): 31-35.
- [65] 苏祝平, 等. 基于 CT 影像特征预测 COVID-19 患者肺部病变进展[J]. 中山大学学报(医学科学版), 2023, 44(2): 286-294.
- [66] Gou, Q., et al. (2021) Stent Placement Combined with Intraluminal Radiofrequency Ablation and Hepatic Arterial Infusion Chemotherapy for Advanced Biliary Tract Cancers with Biliary Obstruction: A Multicentre, Retrospective, Controlled Study. *European Radiology*, **31**, 5851-5862. <https://doi.org/10.1007/s00330-021-07716-0>
- [67] 沈杰, 等. AI 自动定位技术在新型冠状病毒肺炎胸部 CT 检查中的应用[J]. 中国医疗设备, 2020, 35(10): 106-109.
- [68] 邓莉萍, 等. 智能定位 CT 在新型冠状病毒肺炎筛查中的可行性研究[J]. 中国医疗设备, 2020, 35(6): 49-53+74.
- [69] 刘力, 陈宏, 钟威, 等. 人工智能 CT 定量分析预测并评估 COVID-19 肺炎临床分型的研究[J]. CT 理论与应用研究, 2021, 30(6): 743-751.
- [70] Huang, L., et al. (2020) Serial Quantitative Chest CT Assessment of COVID-19: A Deep Learning Approach. *Radiology: Cardiothoracic Imaging*, **2**, 1-8. <https://doi.org/10.1148/ryct.2020200075>
- [71] 赵建华, 等. 基于深度学习的新型冠状病毒肺炎转归胸部 CT 评价[J]. 国际放射医学核医学杂志, 2020(12): 737-743.
- [72] Yu, Q., et al. (2020) Multicenter Cohort Study Demonstrates More Consolidation in Upper Lungs on Initial CT Increases the Risk of Adverse Clinical Outcome in COVID-19 Patients. *Theranostics*, **10**, 5641-5648. <https://doi.org/10.7150/thno.46465>
- [73] Mushtaq, J., et al. (2020) Initial Chest Radiographs and Artificial Intelligence (AI) Predict Clinical Outcomes in COVID-19 Patients: Analysis of 697 Italian Patients. *European Radiology*, **31**, 1770-1779.

<https://doi.org/10.1007/s00330-020-07269-8>

- [74] Yue, H., *et al.* (2020) Machine Learning-Based CT Radiomics Method for Predicting Hospital Stay in Patients with Pneumonia Associated with SARS-CoV-2 Infection: A Multicenter Study. *Annals of Translational Medicine*, **8**, 859-859. <https://doi.org/10.21037/atm-20-3026>