



医学影像学的研究进展综述

袁灵, 成思航, 苏童, 易妍, 李潇, 朱亮, 何泳蓝, 王凤丹, 陈钰, 王志伟, 王萱, 孙昊, 刘炜, 有慧, 张燕, 付海鸿, 田均平, 张竹花, 王怡宁, 薛华丹, 宋伟, 潘杰, 冯逢, 金征宇*

中国医学科学院&北京协和医学院, 北京协和医院放射科, 北京 100730

* 联系人, E-mail: jin_zhengyu@163.com

收稿日期: 2021-07-09; 接受日期: 2021-08-11; 网络版发表日期: 2021-08-17

摘要 近年来医学影像学的快速发展, 实现了从解剖成像至功能、分子成像的转变, 促进了对疾病的本质及其演变规律的认识, 大幅提高了影像诊断的准确性. 如今, X线、计算机断层成像(computed tomography, CT)、磁共振成像(magnetic resonance imaging, MRI)技术已常规应用于疾病的诊断、治疗指导及治疗效果评价. 医学影像学实现了从二维到三维成像, 甚至是四维成像的功能成像转变, 各个系统的研究均有长足进展. 本文结合北京协和医院放射科各个专业组影像学的发展, 对各个系统影像学现状及最新的研究进展进行综述, 旨在为临床医学的发展提供更多诊疗参考.

关键词 医学影像, X线, CT, MRI, 人工智能, 影像组学

近年来随着医学影像学的快速发展, 影像检查方法经历了从X线到计算机断层成像(computed tomography, CT)、磁共振成像(magnetic resonance imaging, MRI)、正电子发射计算机断层扫描(positron emission computed tomography, PET)等多种影像成像方法的变革, 实现了从解剖成像至功能、分子成像的转变, 促进了对疾病的本质及其演变规律的认识, 大幅提高了影像诊断的准确性. 北京协和医院放射科作为国内最早建立的放射科, 在领域内做出了较多成绩, 部分成果在国内及国际具有学术影响力. 本文将结合北京协和医院放射科各个专业组的相关工作成果, 对各个系统医学影像学的发展现状及最新的研究进行综述, 旨在为临床医学的发展提供更多诊疗参考.

1 神经系统影像研究进展

神经影像新技术的发展是神经学发展的重要推动力. 多模态的神经影像技术已成为研究认知、神经系统发育和疾病的重要手段, 在帮助理解发育性脑疾病(如自闭症、儿童多动症)、精神性脑疾病(如抑郁症、精神分裂症)、神经退行性疾病(阿尔茨海默病、帕金森病等), 以及癫痫、中风、脑外伤、脑肿瘤等重大脑疾病的病理生理机制方面发挥了重要作用, 而且对于解决实际临床问题(如建立早期诊断标准、探索药物治疗机制、制定神经外科手术计划等)也具有重要价值. 磁共振弥散张量成像(diffusion tensor imaging, DTI)对白质束的观察、追踪具有优势, 可以帮助进行

引用格式: 袁灵, 成思航, 苏童, 等. 医学影像学的研究进展综述. 中国科学: 生命科学, 2021, 51: 1130–1139

Yuan L, Cheng S H, Su T, et al. A review of the research progress of medical imaging (in Chinese). Sci Sin Vitae, 2021, 51: 1130–1139, doi: [10.1360/SSV-2021-0296](https://doi.org/10.1360/SSV-2021-0296)

脑发育和脑认知功能的研究, 脑疾病的病理变化以及脑部手术的术前计划和术后评估. 磁共振波谱(magnetic resonance spectroscopy, MRS)可对器官组织代谢生化改变及化合物进行定量分析, 已广泛运用于活体组织代谢与功能测定. 多种灌注成像方法, 如CT灌注成像(computed tomography perfusion imaging, CTP)、磁共振灌注成像(perfusion-weighted imaging, PWI)、血氧水平依赖性功能磁共振成像(blood oxygen level-dependent functional MRI, BOLD-fMRI)、动脉自旋标记示踪法(arterial spin labeling, ASL)等可评估脑组织活力和受损组织血流情况, 提高人们对脑灌注损伤和组织氧合损伤病理生理机制的认识, 在脑血管病、肿瘤性病变的诊断、评估中都具有重要作用. 在如火如荼的脑科学研究大时代中, 通过建立宏观脑影像数据与微观神经环路结构和功能之间的联系, 多种模态的神经影像技术必将发挥重要作用.

中国科学院自动化研究所田捷团队开展合作研究, 通过影像组学特征提取和机器学习技术针对多种脑肿瘤开展了系列研究. 在低级别胶质瘤方面, 他们通过提取400余个磁共振影像组学特征, 应用人工智能(artificial intelligence, AI)机器学习方法寻找和选择与低级别胶质瘤继发癫痫相关的重要特征, 创建了基于影像组学的低级别胶质瘤患者癫痫风险预测模型^[1]. 在脑膜瘤方面, 他们提取脑患者术前多序列MR影像, 分析定量影像组学特征与脑组织侵袭的潜在关联, 实现了脑膜瘤患者脑组织侵袭风险以及术前肿瘤分级的精准预测^[2]. 相关风险模型的建立可为指导脑肿瘤临床个体化治疗提供重要依据.

2006年起, 北京协和医院放射科神经专业组在国际领先开展高分辨率磁共振脑血管壁成像研究, 早期发表的论文成为该领域奠基性的文章, 被国际多个指南所引用^[3]. 近几年本团队又开展了头颈联合管壁成像技术、管壁成像与ASL技术联合应用等, 对缺血性脑卒中、脑小血管病、青年性脑卒中、MOYA-MOYA病、血管炎等进行深入研究, 已经取得了丰硕的研究成果^[4]. 本团队在国内最早开展ASL技术的研究, 实现了双侧颈内动脉、椎基底动脉三大脑供血区域的观察, 并发现在因颈动脉狭窄行颈动脉血运重建术的患者中, 术前双侧颈内动脉供血体积的不对称性可以预测术后脑过度灌注, 术后ASL显示的各大血管供血区的恢复也与颈动脉血运重建术后的认知改善

有关^[5].

在神经功能性疾病方面, 3D T1-加权高分辨率结构像结合磁敏感加权成像(susceptibility-weighted imaging, SWI)技术已转化应用于临床, 通过对中脑及桥脑径线的人工测量为帕金森病、进行性核上性麻痹及多系统萎缩诊断提供了不容忽视的帮助^[6]. 通过3D T1, 3D T2 FLAIR全脑及3 T, 7 T高及超高场强海马内部结构MRI成像技术帮助临床寻找癫痫致痫灶, 准确导航定位, 制定精细手术计划^[7].

2 头颈部影像研究进展

在头颈部疾病影像诊断评估中, 近年来的研究进展体现在以下三个方面: (i) 各种常规及先进成像技术在临床及规范应用方面的探索. (ii) 基于新技术结合大数据分析(放射组学、机器学习、深度学习等)以及头颈部成像报告和数据系统(reporting and data system, RADS)在头颈部肿瘤定性诊断及疗效预测方面的研究. (iii) AI在头颈部的图像分割、图像合成、定性诊断、分子病理及临床疗效预测等方面的应用, 以及不同神经网络算法在头颈部成像分析的可靠性及有效性.

北京同仁医院放射影像团队针对头颈部肿瘤性病变, 采用优化的扩散加权成像(diffusion weighted imaging, DWI)、动态对比增强成像(dynamic contrast enhancement, DCE)等序列实现了头颈部肿瘤性病变的精准诊断及鉴别、治疗反应的精准评价等. 他们建立的DCE-MRI技术规范扫描方案, 实现了对鼻腔鼻窦肿瘤良恶性精准鉴别, 提高了鼻腔鼻窦恶性肿瘤诊断灵敏度. 在影像组学方面, 他们还发现磁共振影像组学特征在鉴别鼻腔鼻窦淋巴瘤和鳞状细胞癌, 预测喉癌及下咽癌的甲状软骨侵犯方面具有优势^[8,9].

我科头颈专业组将最先进、最清晰的影像技术用于解剖最精细的头颈部位成像, 针对侧颅底肿瘤的薄层高分辨成像技术, 可以聚焦最易损伤的颈内动脉, 助力术前精准导航. 同时, 针对甲状旁腺肿瘤的四维CT检查, 聚焦常规影像难以探及或确诊的病变, 提出协和影像分型^[10]. 针对头颈恶性肿瘤的成像特点, 定制多参数DWI及动态增强MR检查方案, 在国际上率先开展头颈部区域的快速DWI成像, 解决以往头颈部DWI扫描时间长、变形伪影重的难点^[11]. 在头颈CT血

管成像(CT angiography, CTA)及头CT灌注(CT perfusion, CTP)方面进行系列研究十余年, 涉及双能量成像、低剂量低对比剂用量以及重建算法等多项新技术新方法, 提出协和的影像评价标准, 2019年由金征宇牵头编写“头颈部CT血管成像扫描方案与注射方案专家共识”^[12]。

3 心脏大血管系统影像研究进展

早在1924年, 我科第一位科主任保罗·霍奇斯就进行了胸部X线男性心脏大小的研究^[13]。1956年, 汪绍训和谢志光^[14]共同研究出适合中国人应用的计算心表面积的公式, 并制成便于查对的“心表面积预计值表”, 被学术界称之为“汪-谢公式”。近20年来, 心脏大血管的诊断和治疗技术均有长足进步, 在现代医学理念以及科学技术的推动下, 心血管影像学取得了突破性进展, 逐步从单纯的解剖形态学向功能学、从定性到定量、从二维到三维成像转变, 并迅速向数字化、智能化方向迈进。主要体现在以下三个方面: (i) 在冠状动脉成像方面, 近年的热点研究方向包括能谱冠脉CT检查、超低剂量对比剂冠脉CTA成像、无对比剂的冠状动脉磁共振血管成像(MR angiography, MRA)技术等在内的多种技术。(ii) 在人工智能的心脏大血管成像应用方面, AI帮助实现了冠状动脉CTA的图像自动分割、重建及冠脉积分、管腔狭窄定量分析。(iii) 在心肌病诊断方面, CT心肌灌注成像、磁共振心肌负荷灌注、T1及T2 mapping技术也为缺血性、非缺血性心肌病的研究提供了新的思路和方法。

首都医科大学附属北京安贞医院放射影像团队应用三维全心冠状动脉定性成像技术(coronary atherosclerosis T1-weighted characterization with integrated anatomical reference, CATCH)序列对易损粥样硬化斑块进行离体、在体评估, 明确了CATCH序列对斑块内出血的诊断效能并证实CATCH上的高信号斑块与急性冠脉综合征临床严重程度相关, 为冠脉易损斑块的无创影像评价提供了新的技术支持^[15]。阜外医院放射影像团队, 在国内率先开启了人工智能在心血管影像中的应用研究, 将深度学习技术应用于X线胸片心胸比率的自动化测量^[16]。

我科心脏及大血管专业组针对目前我国心血管疾病影像诊断尚缺乏功能学有效定量分析这一难题, 围

绕“心血管形态功能一体化综合评估体系建立”从CT、MR、分子影像及人工智能等多个角度不断探索, 推广创新技术, 逐渐建立以无创替代有创、形态功能相结合的心血管影像一站式综合评价体系。在冠心病方面, 在国内率先开展动态负荷CT心肌灌注功能成像研究, 采用4D融合降噪结合超低管电压、管电流自动调制技术, 大幅降低有效辐射剂量降低至3~5 mSv^[17]。团队为进一步探索基于深度学习的定量优化评估技术, 通过对定量参数的系统性优化和模式改进, 提高了CTP评估准确性^[18]。团队率先在国内开展光谱CT低剂量成像、血管能量成像和心肌延迟强化能量成像一站式检查, 进一步降低了扫描辐射剂量。在影像技术层面, 团队在国内率先将全心及靶容积冠脉MRA成像方法应用于无对比剂冠脉MRA成像, 诊断敏感性、特异性显著提高, 达到国际先进水平^[19]。在心肌病影像诊断方面, 团队建立了淀粉样变性、肢端肥大症等系统性疾病心脏受累的前瞻性病例队列, 完善心血管影像数据库, 将心肌组织定量成像T1及T2 mapping技术应用于系统性疾病心脏受累的早期检出、预后评价及复查随访^[20]。

4 呼吸系统影像研究进展

近年来, 深度学习与人工智能在全球信息化浪潮下依旧热度不减, 同样依托于计算机的影像组学也一样吸引眼球。人工智能在肺结节识别与良恶性鉴别、肺炎(甚至是新型冠状病毒肺炎)的识别、图像重建中技术日趋成熟, 部分已应用到临床实践中。能谱CT技术、低剂量扫描等技术也愈加成熟, 在临床应用尤其是肺结节筛查及定性诊断中的探索越来越多。对于肺气肿及弥漫性病变等病变, 气道成像、肺容积测定、影像组学对疾病的诊断、分期及预后预测提供了重要依据。肺部磁共振成像的研究应用也越来越多, 其中DWI和DCE-MRI技术对于肺结节、纵隔占位的识别及鉴别均有重要作用。

伯明翰阿拉巴马大学2007年起组建了慢性阻塞性肺疾病(chronic obstructive pulmonary disease, COPD)的遗传流行病学(COPD Gene)研究者慢性阻塞性肺疾病遗传流行病学研究队列, 这是一项正在进行的多中心观察性队列研究, 研究对象包括10000多名吸烟者和曾经吸烟者, 旨在了解COPD的病因、进展和异质

性. 研究发现, 与不良临床结果相关的影像学特征包括早期间质性肺异常、肺气肿的视觉表现和模式、肺动脉与升主动脉直径的比率、肺气肿的定量评估、气道壁厚度和呼气体滞留等. 此外, 近年的热点研究还包括肺气肿和气道疾病的新定量指标、评估辐射剂量减少技术以及利用深度学习对COPD进行分型^[21].

北京协和医院放射科成立早期, 汪绍训和谢志光^[22]针对肺结核、肺血吸虫病的X线表现进行了系统研究. 1958年, 胡懋华与有关专家赴江西大吉山钨矿实地考察硅肺的发病情况, 撰写出《矽肺X线分期及其诊断标准》论文, 为硅肺的诊治作出了重要贡献. 北京协和医院放射呼吸团队积极开展临床新技术, 为临床实际解决需求, 在国内率先开展肺低剂量CT筛查, 而且将辐射剂量缩减到国际推荐剂量的三分之一, 做到胸片剂量的超低剂量扫描, 在国内处于领先地位. 本团队陆续开展胸部能谱CT检查、低辐射剂量低对比剂剂量CT肺动脉成像(pulmonary angiography, CTPA)、胸部MR增强及DWI序列扫描等影像新技术, 进行肺真菌感染、肺间质疾病、肺血管炎、淋巴瘤、肺淋巴管平滑肌瘤病、肺泡蛋白沉积症等少见疾病的研究, 将其影像学表现、随诊动态变化及定量测量的协和经验向全国推广. 本团队在肺癌、慢性阻塞性肺疾病等呼吸系统常见病方面也进行了广泛和深入的研究, 通过影像组学预测肺腺癌ALK融合基因表达, 精准预测术前表现为纯磨玻璃结节的肺腺癌的侵袭性, 助力临床诊疗及预后^[23-25].

5 消化系统影像研究进展

随着影像学技术的不断进步与发展, 消化系统影像的诊断水平也随之不断提升, 最为显著的进展主要体现在以下三个方面: (i) 基于CT与MR不断加快的成像速度, 以及图像的时间分辨率和空间分辨率不断提高, 多层螺旋CT、三维重建、CT或MR仿真内镜、MR薄层快扫序列等消化系统影像后处理技术和MR新序列使得消化系统影像在形态学的细节显示上更加精准. (ii) 消化系统影像逐渐从形态学成像向功能成像过渡, 以CT和MR灌注成像、磁共振胰胆管造影(MR cholangiopancreatography, MRCP)、MRI、MRS、PET/CT、PET/MR为代表的功能性成像技术在消化系统疾病的早期诊断、鉴别诊断、疗效评

价、预后分析等方面显示出重要价值. (iii) 放射组学通过应用高通量计算从体层图像(MR, CT和PET)快速提取大量量化的影像特征, 并转换为可发掘的高保真数字化数据, 通过对消化系统影像的量化分析可以解析消化道疾病相关的发病机制及病理生理学进程. 李华秀等人^[26]对影像组学在食管癌、肝脏疾病及结直肠肿瘤中的研究进展进行了综述, 总结了影像组学在消化系统疾病病灶分割、鉴别诊断、治疗方案选择和预后评价中的重要作用. 此外, 逐渐兴起的人工智能技术也促进消化系统影像诊断水平迈向新的台阶.

1923年起, 我科陆续开展消化道造影、气钡双重造影等检查, 针对胃良恶性溃疡、食管良性肿瘤、肠结核、炎性肠病、胰腺癌的影像表现等均有深入研究. 如今随着CT、MRI新技术及新对比剂的应用, 我科的临床研究也与时俱进、不断创新.

针对胰岛素瘤的定位、定性诊断, 我科运用胰腺灌注CT、多参数MRI等检查手段将检出率提升到国际领先水平^[27]; 还对自身免疫性胰腺炎进行多项深入研究, 提出其诊断和预测复发的关键影像征象^[28]; 摸索并提出了创新、优化的MRCP扫描方案, 解决了高龄、病弱等患者成像效果差的难题^[29]. 我科开创性地将多频率磁共振弹力成像技术应用于胰腺疾病评估, 提高了胰腺癌的检出率和对肿瘤大小评估的准确性, 以及对胰腺癌和自身免疫性胰腺炎的鉴别能力^[30].

针对肝脏灌注CT成像, 我科评价了灌注参数的正常肝内分布差异, 应用灌注重建图像替代常规多期增强的可行性, 以及病变灌注参数信息与双能成像参数的相关性^[31]. 针对胰腺神经内分泌肿瘤的肝转移, 我科评价了不同磁共振扫描序列对于病变的检出能力^[32].

对于消化道空腔脏器的病变, 我科应用能谱CT和人工智能技术提高胃癌术前T分期的准确性, 通过提取胃癌影像特征构建模型进行术前有无淋巴结转移的预测研究^[33], 术前预测组织病理学特征^[34], 评估治疗反应等, 为胃癌个体化诊疗提供多方位、有价值的信息. 使用光谱过滤结合高级模拟迭代重建技术进行CT结肠成像, 在保证结肠CT图像质量的同时, 显著降低辐射剂量, 从而在结肠息肉和结肠肿瘤的筛查中发挥巨大优势^[35].

6 泌尿生殖系统影像研究进展

最近的技术进步和新发现使泌尿生殖系统影像成为极具吸引力的领域之一。在泌尿系统影像进展方面: CT泌尿系造影(CT urography, CTU)技术得到了规范, 加利福尼亚大学影像团队进一步优化了CTU扫描方案, 同时最大限度地减少辐射剂量, 最大限度地增加尿路充盈状态, 从而提高病变检出率及诊断准确性^[36]; CT双能成像对肾结石的探查进一步深入; MR肾脏功能成像对肾病机制的研究取得重要进展; 对比剂安全使用指南也进一步完善。在男性生殖系统影像方面: 穿刺前MR检查更多地运用于对前列腺癌诊断效能的评估、危险分层的评估; 在临床信息的基础上, 优选MR检查序列, 高效、准确地解决前列腺癌的诊断和危险度评估, 并预测病人的长期预后, 是尚需解决的问题; 德国海德堡大学医学中心研究发现, 针对前列腺癌的MRI深度学习与临床前列腺影像报告和数据系统评估(prostate imaging reporting and data system, PI-RADS)效果相当^[37]。在女性生殖系统影像方面: 子宫成像进展主要集中于MR功能成像, 包括MRS、DTI及动态增强扫描; 目前国内外对于卵巢和输卵管的影像学研究涉及其生理变化和病理改变两大方面, 后者的研究内容主要集中在卵巢肿瘤、多囊卵巢综合征、子宫内膜异位症、附件炎症、卵巢血管造影等方面, 运用的影像学技术包括MRI、CT及多模态成像等。密歇根大学医院影像团队对功能成像对于女性生殖系统疾病的作用进行了综述, 总结发现其在良恶性疾病的鉴别、肿瘤分期、能否保留生育功能、子宫内膜异位症和子宫肌瘤的术前评估、盆底功能评估中都具有重要应用^[38]。

本团队以临床应用为龙头导向、国际认可的标准化成像和图像大数据为基础, 以泌尿及生殖系统疾病为抓手, 应用能量CT、功能磁共振等先进影像技术和影像组学人工智能研究手段, 建立疾病精准影像诊断模型, 并将科研成果转化整合入临床工作流程。

在肾上腺疾病中, 本团队在国内外率先利用影像组学研究方法对肾上腺肿瘤中传统影像学方法难以鉴别的乏脂腺瘤、嗜铬细胞瘤与转移癌进行研究^[39]。在肾脏疾病中, 在国内外首次验证了磁共振成像采集新技术在肾脏成像的可行性并已用于临床检查, 同时利用功能磁共振方法和纹理分析技术, 在体无

创评价IgA肾病患者肾功能和病理亚型^[40], 利用纹理分析技术在体无创鉴别肾癌病理亚型^[41]。在泌尿道疾病中, 针对泌尿系结石, 从低剂量检查、无创在体术前评价结石成分、影像组学鉴别结石成分这三方面进行精准影像诊断, 相关成果已应用于泌尿系结石临床影像诊断流程中^[42]。在前列腺疾病中, 将国际最新的PI-RADS诊断指南引入国内临床工作中, 在此基础上进行前列腺癌多参数磁共振和影像组学的精准诊断, 为前列腺癌临床诊断和个体化治疗提供了丰富的影像学信息^[43,44]。

在女性生殖系统方面, 本团队建立结构化报告系统, 开展了多项CT及MR功能成像、人工智能相关系列研究, 将多种国际新兴影像技术用于妇产科疾病的定性及多参数量化评估。团队首先探索了女性生殖系统正常结构随月经周期的变化规律, 提出育龄期女性围排卵期子宫带状结构显示最为清晰, 优化常规检查流程。在女性生殖系统肿瘤成像领域, 突破弥散加权成像技术瓶颈, 探索超高b值DWI技术在内膜癌及宫颈癌的应用; 发现b值=2000 DWI可有效抑制宫颈癌瘤病灶区域背景信号, 提高病变的精准检出和定性诊断能力^[45]; 利用表观弥散系数(apparent diffusion coefficient, ADC)定量特征, 实现术前对宫颈癌转移淋巴结的精准检出和分期评估, 成功预测宫颈癌病理类型及分化程度, 辅助临床治疗方案制定^[46]。在国际上率先开展了全球最大样本量的女性生殖系统酰胺质子转移加权(amide proton transfer weighted, APTw)成像研究, 探索了国际新兴APTw成像技术在宫颈癌、子宫内膜癌、子宫腺肌症中的应用价值^[47]。

7 骨肌系统影像研究进展

随着医学成像技术的飞速发展, 骨关节系统影像学在成像技术、成像范围、获得信息的层次和临床应用等诸方面均有较多进展。在骨骼影像学方面, 骨肿瘤的MR研究主要集中在骨肿瘤和瘤样病变, 近年来更多的研究集中在DWI、MR灌注以及MRS等MRI新技术的应用方面; 骨肿瘤的CT研究则包括能谱成像以及灌注成像, 为骨肿瘤成分鉴别以及了解恶性骨肌肿瘤内部微血管分布特征提供了可能; 此外, 诸多研究开始尝试使用CT和MRI对骨质疏松进行定量诊断。在关节影像学方面, T1p、T2 mapping、软骨3D序列、MR超

短TE序列等MR新序列, MR增强扫描, MR关节造影, MRS以及关节CT能谱成像应用于对关节软骨的研究, 取得丰硕成果. 在软组织在影像学方面, 近来尤其侧重于关节周围肌腱和韧带损伤的研究, 以MR关节造影、MR波谱成像、MR超短回波时间成像、CT能谱成像等为代表的越来越多的新技术、新方法用于临床和科研之中. 骨关节系统术后影像学方面, 能谱CT以及MR的去金属伪影研究使得术后评价更加精准, 梅奥医学中心影像团队应用西门子双能量CT及IMAR算法显著减少了脊柱金属植入物的伪影, 提高了图像质量^[48].

早年我科在骨肌系统影像的研究成果颇丰, 谢志光等人发表了中国第一例报道棘球蚴病累及骨骼病变的X线征象研究, 并第一次系统描述中国人长骨结核征象. 谢志光首创了一个新的显示髌关节后脱位的投照方法, 被国内外放射学领域称为谢氏位.

2006年起我科开展全身磁共振成像(whole-body MRI, WB-MRI)研究, 突破了全身DWI(whole-body DWI, WB-DWI)关键技术瓶颈, 构建WB-MRI评价技术平台, 牵头多中心研究并首次公布正常人群全身脏器表观弥散系数参考范围, 构建了肿瘤全身MR评价规范体系, 提高了骨髓瘤等恶性肿瘤的诊疗精准性^[49]. 在代谢性骨病方面, 本团队应用双能X线骨密度仪在全国率先开展了在骨质疏松诊断方面的研究, 在国际上首次报道了腰椎退行性病变对腰椎骨密度测量的影响, 并提出脊柱正位X线椎体压缩性骨折的半定量评估方法. 在风湿免疫病方面, 在国际上率先应用CT检查类风湿关节炎的腕关节骨质侵蚀病变及进行强直性脊柱炎骶髂关节磁共振相关研究, 提出了强直性脊柱炎的MRI影像征象. 此外, 还在国际上首次提出了卡尼复合征(Carney complex)骨病的“环征”的影像征象^[50]. 针对骨科金属植入物产生伪影、影像评估的难题, 我科2013年开始尝试将双能CT扫描应用于有金属植入物的术后患者, 降低了金属伪影, 提高了图像信噪比, 降低了辐射剂量.

我科率先探索了快速成像技术与功能成像结合的可行性, 研究结果显示, DTI可以在5分钟、T2 map在3分钟内即可完成肌炎患者双侧大腿的扫描, 数据指标能定量反映肌肉的炎症程度, 与临床及病理均有很好的相关性, 该技术显著缩短了检查时间, 提高了图像质量和病人舒适度^[51].

随着计算机和人工智能技术的发展, 本团队自

2017年起开始探索将AI应用到骨龄的判读中, 优化的人工智能技术在骨龄判读的准确性可与专家相媲美, 且该技术引入西藏自治区后也取得了优越的诊断效果^[52].

8 介入放射学

随着介入技术的不断进步, 介入放射学近年来也得到了长足的发展, 主要集中在以下几个领域: 在肿瘤介入治疗领域, 多模态影像引导技术的不断发展使得对肿瘤的介入治疗更加简便易行, 也使栓塞更为精准; 新型栓塞剂(如形状记忆泡沫、可生物降解聚合物和原位凝胶溶液等生物材料)和免疫栓塞、同位素栓塞以及热疗栓塞等技术的出现, 为不同部位不同种类的肿瘤治疗提供了更加多样的选择^[53]; 多学科参与、全身免疫治疗辅助等与传统介入治疗手段的结合, 使肿瘤的介入治疗更加综合、高效. 在血管狭窄或闭塞性疾病的介入治疗领域, 采用支架、球囊、溶栓等传统手段进行治疗常常面临再狭窄、再闭塞, 而随着近年来药物涂层支架、球囊的研发成功, 有望在一定程度上解决这一问题; 此外, 覆膜支架技术的不断进步与完善也使得主动脉瘤以及主动脉夹层等疾病的治疗更加成熟. 在脑血管疾病的介入治疗领域, 电解可脱性弹簧圈的出现使颅内动脉瘤栓塞风险大幅下降; 颈动脉及颅内缺血性病变的介入治疗也随着各种介入相关材料学的进步而得到了长足的发展. 在非血管介入治疗领域, 气道、食道、肠道以及胆道支架技术日益成熟. 而经颈静脉肝内门体通道分流术(transjugular intrahepatic portosystem stent-shunt, TIPSS)近年来随着支架技术的成熟得到更加广泛的开展, 分流道再狭窄率显著下降, 这对门脉高压及相关并发症的处理具有重要意义, 下一步的可吸收支架也在研发中.

本团队早在20世纪50年代初就在国内首批开展内镜逆行胰胆管造影(endoscopic retrograde cholangiopancreatography, ERCP)检查、动脉造影、心血管造影等介入操作, 并对技术手段、成像方法进行了改进和创新. 目前关于介入放射学的发展应用, 血管疾病介入诊疗技术主要包括颈动脉及颅内血管成形术和支架置入术、急性脑梗塞动脉取栓、外周动脉成形术、颈内静脉透析导管置入术、深静脉输液港置

入术、腔静脉滤器置入术、肺动脉血栓栓塞溶栓取栓等; 非血管介入诊疗技术主要围绕各类肿瘤性疾病经动脉灌注化疗栓塞、经皮消融治疗以及肿瘤并发症的介入治疗。

近年来介入诊疗技术得到了持续发展。本团队在国内最早开展了磁共振引导下聚焦超声治疗子宫肌瘤, 开创了无创伤治疗肿瘤的先河, 制定了相关指南和共识^[54]。在特殊静脉插管采血, 包括岩下窦静脉采血、肾上腺静脉采血、门静脉采血、卵巢静脉采血等的数量居全世界首位, 为内分泌疑难病的诊断打下了

坚实的基础。

9 结语

经历百年余的发展, 医学影像学发展日新月异, 目前已从解剖成像进入功能和分子成像的时代。医学影像学不仅在疾病的诊断、治疗指导及治疗效果评价方面发挥重要作用, 同时医学影像技术的发展、人工智能技术的进步和医疗大数据的不断积累将促使放射学发展进入新时代。

参考文献

- 1 Liu Z, Wang Y, Liu X, et al. Radiomics analysis allows for precise prediction of epilepsy in patients with low-grade gliomas. *Neuroimage Clin*, 2018, 19: 271–278
- 2 Zhu Y, Man C, Gong L, et al. A deep learning radiomics model for preoperative grading in meningioma. *Eur J Radiol*, 2019, 116: 128–134
- 3 Li M, Xu W, Song L, et al. Atherosclerosis of middle cerebral artery: evaluation with high-resolution MR imaging at 3T. *Atherosclerosis*, 2009, 204: 447–452
- 4 Li M L, Lin Q Q, Liu Y T, et al. The clinical value of head-neck joint high-resolution vessel wall imaging in ischemic stroke. *J Stroke Cerebrovasc Dis*, 2020, 29: 105062
- 5 Lin T, Lai Z, Lv Y, et al. Effective collateral circulation may indicate improved perfusion territory restoration after carotid endarterectomy. *Eur Radiol*, 2018, 28: 727–735
- 6 Feng F, You H, Hu L, et al. Preliminary study of susceptibility-weighted imaging in differentiation of multiple system atrophy and idiopathic Parkinson disease (in Chinese). *Chin J Med Imaging Technol*, 2007, 23: 781–784 [冯逢, 有慧, 胡凌, 等. 磁敏感加权成像鉴别多系统萎缩与特发性帕金森病的初步研究. 中国医学影像技术, 2007, 23: 781–784]
- 7 You H, Lu J J, Ren L K, et al. Differences in interictal perfusion patterns between refractory and non-refractory temporal lobe epilepsies evaluated with FAIR techniques (in Chinese). *Chin J Med Imaging Technol*, 2005, 21: 696–698 [有慧, 陆菁菁, 任连坤, 等. 应用FAIR技术评价难治性和非难治性颞叶癫痫灌注异常. 中国医学影像技术, 2005, 21: 696–698]
- 8 Wang X, Dai S, Wang Q, et al. Investigation of MRI-based radiomics model in differentiation between sinonasal primary lymphomas and squamous cell carcinomas. *Jpn J Radiol*, 2021, 39: 755–762
- 9 Guo R, Guo J, Zhang L, et al. CT-based radiomics features in the prediction of thyroid cartilage invasion from laryngeal and hypopharyngeal squamous cell carcinoma. *Cancer Imaging*, 2020, 20: 81
- 10 Song A, Wang O, Liu C X, et al. Diagnostic value of 4-dimensional computed tomography in preoperative localization in patients with primary hyperparathyroidism (in Chinese). *Chin J Intern Med*, 2020, 59: 788–795 [宋梭, 王鸥, 刘春晓, 等. 甲状旁腺四维CT在原发性甲状旁腺功能亢进术前定位中的诊断价值. 中华内科杂志, 2020, 59: 788–795]
- 11 Su T, Chen Y, Zhang Z, et al. Optimization of simultaneous multislice, readout-segmented echo planar imaging for accelerated diffusion-weighted imaging of the head and neck: a preliminary study. *Acad Radiol*, 2020, 27: e245–e253
- 12 Chinese Society of Radiology. Expert consensus of the head and neck CT angiography scanning and injection protocols (in Chinese). *Chin J Radiol*, 2019, 53: 81–87 [中华医学会放射学分会. 头颈部CT血管成像扫描方案与注射方案专家共识. 中华放射学杂志, 2019, 53: 81–87]
- 13 Hodges P C P C, Eyster J. Estimation of cardiac area in man. *Am J Roentgenol*, 1924, 12: 252
- 14 Wang S X, Hsieh C K. Cardiac measurements in Chinese population (in Chinese). *Chin J Radiol*, 1956, 4: 5–11 [汪绍训, 谢志光. 中国人的心脏测量. 中华放射学杂志, 1956, 4: 5–11]
- 15 Xie Y, Kim Y J, Pang J, et al. Coronary atherosclerosis T1-weighted characterization with integrated anatomical reference. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2017, 10: 637–648

- 16 Li Z, Hou Z, Chen C, et al. Automatic cardiothoracic ratio calculation with deep learning. [IEEE Access](#), 2019, 7: 37749–37756
- 17 Wang Y, Qin L, Shi X, et al. Adenosine-stress dynamic myocardial perfusion imaging with second-generation dual-source CT: comparison with conventional catheter coronary angiography and SPECT nuclear myocardial perfusion imaging. [Am J Roentgenol](#), 2012, 198: 521–529
- 18 Yi Y, Xu C, Wu W, et al. Low-dose CT perfusion with combined use of CTP and CTP-derived coronary CT angiography at 70 kVp: validation with invasive fractional flow reserve. [Eur Radiol](#), 2021, 31: 1119–1129
- 19 Lin L, Wang L, Zhang X N, et al. A clinical strategy to improve the diagnostic accuracy of 1.5-T non-contrast MR coronary angiography for detection of coronary artery disease: combination of whole-heart and volume-targeted imaging. [Eur Radiol](#), 2021, 31: 1894–1904
- 20 Li X, Huang S, Miao H, et al. Multiparameter cardiac magnetic resonance to monitor therapeutic effect after chemotherapy in light chain amyloidosis patients. [JACC Cardiovasc Imaging](#), 2021, 14: 1485–1487
- 21 Bhatt S P, Washko G R, Hoffman E A, et al. Imaging advances in chronic obstructive pulmonary disease. Insights from the genetic epidemiology of chronic obstructive pulmonary disease (COPDGene) study. [Am J Respir Crit Care Med](#), 2019, 199: 286–301
- 22 Wang S X, Hsieh C K. X-ray examination of pulmonary paragonimiasis (in Chinese). *Chin J Radiol*, 1937, 23: 751 [汪绍训, 谢志光. 肺蛭的X光检查. *中华医学杂志*, 1937, 23: 751]
- 23 Song L, Zhu Z, Mao L, et al. Clinical, conventional CT and radiomic feature-based machine learning models for predicting ALK rearrangement status in lung adenocarcinoma patients. [Front Oncol](#), 2020, 10: 369
- 24 Song L, Zhu Z, Wu H, et al. Individualized nomogram for predicting ALK rearrangement status in lung adenocarcinoma patients. [Eur Radiol](#), 2021, 31: 2034–2047
- 25 Yang Y, Zhou J, Zhou J, et al. Efficacy, safety, and biomarker analysis of ensartinib in crizotinib-resistant, ALK-positive non-small-cell lung cancer: a multicentre, phase 2 trial. [Lancet Respir Med](#), 2020, 8: 45–53
- 26 Li H X, Li Z H, Wang G S. Application progress of radiomics in digestive system disease (in Chinese). *J Chin Clin Med Imaging*, 2017, 28: 672–674+679 [李华秀, 李振辉, 王关顺. 影像组学在消化道系统的应用进展. *中国临床医学影像杂志*, 2017, 28: 672–674+679]
- 27 Zhu L, Xue H, Sun H, et al. Insulinoma detection with MDCT: is there a role for whole-pancreas perfusion? [Am J Roentgenol](#), 2017, 208: 306–314
- 28 Zhu L, Zhang W, Jin Z, et al. DWI of autoimmune pancreatitis: is it an imaging biomarker for disease activity? [Am J Roentgenol](#), 2021, 216: 1240–1246
- 29 Zhu L, Sun Z Y, Xue H D, et al. Patient-adapted respiratory training: Effect on navigator-triggered 3D MRCP in painful pancreatobiliary disorders. [Magn Reson Imaging](#), 2018, 45: 43–50
- 30 Zhu L, Guo J, Jin Z, et al. Distinguishing pancreatic cancer and autoimmune pancreatitis with *in vivo* tomoelelastography. [Eur Radiol](#), 2021, 31: 3366–3374
- 31 Wang X, Xue H, Jin Z Y, et al. Quantitative hepatic CT perfusion measurement: Comparison of Couinaud's hepatic segments with dual-source 128-slice CT. [Eur J Radiol](#), 2013, 82: 220–226
- 32 Xu J, Cheng Y J, Wang S T, et al. Simultaneous multi-slice accelerated diffusion-weighted imaging with higher spatial resolution for patients with liver metastases from neuroendocrine tumours. [Clin Radiol](#), 2021, 76: 81.e11–81.e19
- 33 Wang Y, Liu W, Yu Y, et al. Potential value of CT radiomics in the distinction of intestinal-type gastric adenocarcinomas. [Eur Radiol](#), 2020, 30: 2934–2944
- 34 Wang Y, Liu W, Yu Y, et al. CT radiomics nomogram for the preoperative prediction of lymph node metastasis in gastric cancer. [Eur Radiol](#), 2020, 30: 976–986
- 35 Liu J J, Xue H D, Liu W, et al. CT colonography with spectral filtration and advanced modeled iterative reconstruction in the third-generation dual-source CT: image quality, radiation dose and performance in clinical utility. [Acad Radiol](#), 2021, 28: e127–e136
- 36 Cheng K, Cassidy F, Aganovic L, et al. CT urography: how to optimize the technique. [Abdom Radiol](#), 2019, 44: 3786–3799
- 37 Schelb P, Kohl S, Radtke J P, et al. Classification of cancer at prostate MRI: deep learning versus clinical PI-RADS assessment. [Radiology](#), 2019, 293: 607–617
- 38 Sakala M D, Shampain K L, Wasnik A P. Advances in MR imaging of the female pelvis. *Magn Reson Imaging*, 2020, 28: 415–431
- 39 Zhang G, Shi B, Sun H, et al. Differentiating pheochromocytoma from lipid-poor adrenocortical adenoma by CT texture analysis: feasibility study. *Abdom Radiol*, 2017, 42: 2305–2313
- 40 Liu Y, Zhang G M Y, Peng X, et al. Diffusional kurtosis imaging in assessing renal function and pathology of IgA nephropathy: a preliminary

- clinical study. [Clin Radiol](#), 2018, 73: 818–826
- 41 Zhang G M Y, Shi B, Xue H D, et al. Can quantitative CT texture analysis be used to differentiate subtypes of renal cell carcinoma? [Clin Radiol](#), 2019, 74: 287–294
- 42 Zhang G M Y, Sun H, Xue H D, et al. Prospective prediction of the major component of urinary stone composition with dual-source dual-energy CT *in vivo*. [Clin Rad](#), 2016, 71: 1178–1183
- 43 Xu L, Zhang G, Zhang D, et al. Comparison of PI-RADS version 2.1 and PI-RADS version 2 regarding interreader variability and diagnostic accuracy for transition zone prostate cancer. [Abdom Radiol](#), 2020, 45: 4133–4141
- 44 Zhang G M Y, Han Y Q, Wei J W, et al. Radiomics based on MRI as a biomarker to guide therapy by predicting upgrading of prostate cancer from biopsy to radical prostatectomy. [J Magn Reson Imaging](#), 2020, 52: 1239–1248
- 45 Qi Y F, He Y L, Lin C Y, et al. Diffusion-weighted imaging of cervical cancer: Feasibility of ultra-high b-value at 3T. [Eur J Radiol](#), 2020, 124: 108779
- 46 Xue H, Ren C, Yang J, et al. Histogram analysis of apparent diffusion coefficient for the assessment of local aggressiveness of cervical cancer. [Arch Gynecol Obstet](#), 2014, 290: 341–348
- 47 He Y L, Li Y, Lin C Y, et al. Three-dimensional turbo-spin-echo amide proton transfer-weighted MRI for cervical cancer: A preliminary study. [J Magn Reson Imaging](#), 2019, 50: 1318–1325
- 48 Long Z, DeLone D R, Kotsenas A L, et al. Clinical assessment of metal artifact reduction methods in dual-energy CT examinations of instrumented spines. [Am J Roentgenol](#), 2019, 212: 395–401
- 49 Li S, Sun F, Jin Z Y, et al. Whole-body diffusion-weighted imaging: technical improvement and preliminary results. [J Magn Reson Imaging](#), 2007, 26: 1139–1144
- 50 Li S, Duan L, Wang F D, et al. Carney complex: Two case reports and review of literature. [World J Clin Cases](#), 2018, 6: 800–806
- 51 Wang F, Zhang H, Wu C, et al. Quantitative T2 mapping accelerated by GRAPPATINI for evaluation of muscles in patients with myositis. [Br J Radiol](#), 2019, 92: 20190109
- 52 Wang F, Cidan W, Gu X, et al. Performance of an artificial intelligence system for bone age assessment in Tibet. [Br J Radiol](#), 2021, 94: 20201119
- 53 Hu J, Albadawi H, Chong B W, et al. Advances in biomaterials and technologies for vascular embolization. [Adv Mater](#), 2019, 31: 1901071
- 54 Minimally invasive therapy group of magnetic resonance Application Professional Committee of China Association of Medical Equipment. China consensus on MR guided focused ultrasound for uterine fibroids (in Chinese). [Chin J Radiol](#), 2020, 54: 737–744 [中国医学装备协会磁共振应用专业委员会微创治疗学组. MR引导聚焦超声治疗子宫肌瘤中国专家共识. [中华放射学杂志](#), 2020, 54: 737–744]

A review of the research progress of medical imaging

YUAN Ling, CHENG SiHang, SU Tong, YI Yan, LI Xiao, ZHU Liang, HE YongLan,
WANG FengDan, CHEN Yu, WANG ZhiWei, WANG Xuan, SUN Hao, LIU Wei, YOU Hui,
ZHANG Yan, FU HaiHong, TIAN JunPing, ZHANG ZhuHua, WANG YiNing, XUE HuaDan,
SONG Wei, PAN Jie, FENG Feng & JIN ZhengYu

*Department of Radiology, Peking Union Medical College Hospital, Chinese Academy of Medical Sciences & Peking Union Medical College,
Beijing 100730, China*

In recent years, the rapid development of medical imaging has realized the transformation from anatomical imaging to functional and molecular imaging, promoted the understanding of the essence and evolution of disease, and greatly improved the accuracy of diagnosis. Nowadays, X-ray, computed tomography (CT) and magnetic resonance imaging (MRI) technologies have been routinely applied to disease diagnosis, treatment guidance and evaluation. Medical imaging has realized the functional imaging transformation from two-dimensional to three-dimensional imaging, and even four-dimensional imaging. The research of each system has made great progress. Combined with the development of imaging in each group of Radiology Department of Peking Union Medical College Hospital, this article summarized the current development and latest research progress of imaging in each system, in order to provide more diagnosis and treatment references for the development of clinical medicine.

medical imaging, X-ray, CT, MRI, artificial intelligence, radiomics

doi: [10.1360/SSV-2021-0296](https://doi.org/10.1360/SSV-2021-0296)