

DOI:10.13267/j.cnki.syzlzz.2024.076

· 专家论坛 ·

肿瘤影像学：临床应用现状、进展及挑战

张晓辉^{1,2,3}, 罗晓芸^{1,2}, 肖美玲^{1,2}, 姚琼^{1,2}, 王菁^{1,2,3}, 田梅⁴, 张宏^{1,2,3,5}

1. 浙江大学医学院附属第二医院核医学科, 浙江 杭州 310009; 2. 浙江大学医学 PET 中心, 浙江 杭州 310009; 3. 浙江省医学分子影像重点实验室, 浙江 杭州 310009; 4. 复旦大学人类表型组研究院, 上海 201203; 5. 浙江大学生物医学工程教育部重点实验室, 浙江 杭州 310027

通信作者: 张宏, E-mail: hzhang21@zju.edu.cn; 田梅, E-mail: tianmei@fudan.edu.cn; 张晓辉, E-mail: zhanghui4127@zju.edu.cn

摘要: 恶性肿瘤是全球范围内威胁人类生命健康的重大公共卫生问题。早期、精确诊断是精准医学时代提高肿瘤治愈率和改善预后的关键。光学、X 线、CT、MRI、超声和核医学等不同影像模态可从微观-介观-宏观水平表征肿瘤功能、代谢和解剖等信息变化, 在肿瘤早期检测、诊断分期、疗效监测和预后评估中具有不可或缺的地位。本文阐述了不同影像方法在肿瘤诊疗中的临床应用进展, 并探讨了肿瘤影像学在设备发展、影像探针/对比剂研发和临床转化等方面面临的挑战。

关键词: 肿瘤; X 线; 体层摄影术; 磁共振成像; 正电子发射断层显像

Cancer imaging: clinical application, achievements and challenges

Zhang Xiaohui^{1,2,3}, Luo Xiaoyun^{1,2}, Xiao Meiling^{1,2}, Yao Qiong^{1,2}, Wang Jing^{1,2,3}, Tian Mei⁴, Zhang Hong^{1,2,3,5}

1. Department of Nuclear Medicine, the Second Affiliated Hospital of Zhejiang University School of Medicine, Hangzhou 310009, China; 2. Zhejiang University Medical PET Center, Hangzhou 310009, China; 3. Key Laboratory of Medical Molecular Imaging of Zhejiang Province, Hangzhou 310009, China; 4. Human Phenome Institute, Fudan University, Shanghai 201203, China; 5. Key Laboratory for Biomedical Engineering of Ministry of Education, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China

Corresponding to: Zhang Hong, E-mail: hzhang21@zju.edu.cn; Tian Mei, E-mail: tianmei@fudan.edu.cn; Zhang Xiaohui, E-mail: zhanghui4127@zju.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(82030049); 国家重大科研仪器研制项目(32027802); 国家重点研发计划项目(2021YFA1101700); 国家自然科学基金国际合作重点项目 A3 前瞻计划项目(82361148130); 国家自然科学基金重大项目(82394430, 82394433)



Semin Cancer Biol, 2015, 35(suppl): S185-198.

[56] Broos K, Lecocq Q, Raes G, et al. Noninvasive imaging of the PD-1: PD-L1 immune checkpoint: embracing nuclear medicine for the benefit of personalized immunotherapy[J]. Theranostics, 2018, 8(13): 3559-3570.

[57] Xiao ZY, Mayer AT, Nobashi TW, et al. ICOS is an indicator of T-cell-mediated response to cancer immunotherapy[J]. Cancer Res, 2020, 80(14): 3023-3032.

[58] Wei WJ, Jiang DW, Ehlerding EB, et al. Noninvasive PET imaging of T cells[J]. Trends Cancer, 2018, 4(5): 359-373.

[59] Pandit-Taskar N, Postow MA, Hellmann MD, et al. First-in-humans imaging with ⁸⁹Zr-df-IAB22M2C anti-CD8 minibody in patients with solid malignancies: preliminary pharmacokinetics, biodistribution, and lesion targeting[J]. J Nucl Med, 2020, 61(4): 512-519.

[60] Wang CH, Keliher E, Zeller MWG, et al. An activatable PET imaging radioprobe is a dynamic reporter of myeloperoxidase activity *in vivo*[J]. Proc Natl Acad Sci U S A, 2019, 116(24): 11966-11971.

(收稿日期: 2024-07-29)

Abstract: Cancer represent a significant global public health concern, posing a substantial threat to human life and health. The enhancement of cancer survival rates and prognostic outcomes hinges on the early and precise diagnosis, particularly in the contemporary epoch of precision medicine. Various imaging modalities, such as optical imaging, X-ray, CT, MRI, ultrasound, and nuclear medicine, possess the capability to delineate alterations in tumor function, metabolism, and anatomy across microscopic, mesoscopic, and macroscopic scales. These modalities occupy a crucial role in the initial detection, diagnostic staging, monitoring of treatment, and prognostic evaluation of tumors. Despite their significance, numerous challenges persist in the realms of equipment advancement, the research and development of imaging probes/contrast agents, and clinical translation.

Key words: neoplasms; X-ray; computed tomography; magnetic resonance imaging; positron emission tomography

恶性肿瘤是全球范围内的重大公共卫生问题, 严重威胁人类生命健康^[1]。随着基因组和蛋白组等组学技术和生物信息大数据技术的革命性进展, 肿瘤治疗从循证医学和转化医学逐渐发展为当前的精准医学模式。肿瘤精准诊疗提倡实现实时动态的肿瘤诊断与分型, 制定个体化的肿瘤预防和治疗方案, 改善患者生活质量和预后^[2]。因此, 发展早期、精准的肿瘤诊疗技术是现阶段肿瘤学领域的重要方向和任务。医学影像是肿瘤诊疗中最常规、最直接的手段之一, 涵盖光学、X 线、CT、MRI、超声和核医学等不同影像模态, 可从微观分子到宏观结构水平反映肿瘤的功能、代谢和解剖等信息变化, 在肿瘤早期筛查、诊断分期、疗效评估、复发监测和预后评估等个体化全程管理中具有不可或缺的地位^[3]。本文以不同影像方法的临床应用为重点, 阐述近年来肿瘤影像学的进展和挑战。

1 不同影像学方法

1.1 光学成像

光学成像是利用光学透镜和其他光学原件系统, 捕捉和处理可见光和其他电磁波谱范围内图像的成像技术, 主要包括生物发光成像、荧光成像和光声成像等。其中, 荧光成像可通过光子与生物体不同组织间的反射、散射、吸收和自荧光等相互作用, 获取生物组织的荧光信号。发射波长位于 900~1 700 nm 的近红外 II 区 (near-infrared-II, NIR-II) 荧光成像因其振动泛音带和组合跃迁, 具有最小的光-组织相互作用, 显示出较低的光子散射和较弱的组织自身荧光, 极大地提高了检测深度、分辨率和敏感度^[4]。利用 NIR-II 成像进行术中导航, 可精准区分肿瘤与正常组织, 发现临床隐匿性病变, 降低切缘阳性率, 最大限度地减少麻醉时间, 从而提高手术质量并改善患者预后^[5]。NIR-II 荧光成像不仅能够精确控制药物递送的剂量与位置, 还能最大程度减少不良反应, 提高治疗效率。以

NIR-II 荧光为特定刺激的响应型纳米平台可实现按需药物递送, 为肿瘤精准诊疗提供新方法^[6]。

1.2 X 线成像

X 线成像是利用人体组织结构密度、厚度和吸收射线程度的差异, 在成像介质上产生黑白对比不同的影像, 进而用于疾病的检出和诊断。随着计算机技术的不断发展, 基于数字化 X 线摄影 (digital radiography, DR) 技术的数字化断层融合成像技术 (digital tomosynthesis, DTS) 已逐步应用于临床^[7]。DTS 是将传统体层技术与现代电子技术结合的一项新型 X 线成像技术, 具有检查辐射剂量低、空间分辨率高、伪影少和不受患者体位限制等优势, 可增强对人体细微结构的成像效果, 提高对深在、隐匿和重叠部位病变的检出率。经 DTS 合成的乳腺二维图像可代替常规全数字化乳腺摄影图像, 在不增加辐射剂量的前提下, 提高鉴别诊断良恶性病变的效能, 更为准确地显示病灶形态^[7]。对比增强能谱乳腺 X 线摄影 (contrast enhanced spectral mammography, CESM) 可一定程度上反映乳腺病灶摄取碘对比剂的能力, 进而间接反映其血供情况。CESM 的诊断效能明显优于传统的乳腺 X 线摄影^[8], 且对微钙化灶的检出优于全数字化乳腺 X 线成像^[9], 亦可作为评价新辅助化疗效果的检查手段之一。最新的分层相位对比断层 (hierarchical phase-contrast tomography, HiP-CT) X 线成像技术可从全器官到细胞水平进行多尺度 3D 成像, 诊断效能与病理学检查金标准一致^[10]。

1.3 CT

CT 是利用 X 线和计算机处理技术对人体内部结构进行成像的医学成像方法。随着机架转速、探测器排数和 X 线球管等硬件性能的逐渐提高, CT 扫描已作为一种常规检查手段, 在肿瘤早期筛查、诊断分期、疗效评估、介入治疗引导和放疗计划制定等方面具有重要价值。近年来, CT 技术发展更多聚焦于光子计数探测器、多能量成像功能、运

动补偿和用于图像预处理的机器学习算法等方面。光子计数 CT 技术可将 X 线衰减转换为电信号,使得每 1 个光子产生的信号脉冲都被计数,被电极的电路读取,实现多能成像,减少辐射剂量,以更高的密度对比度和更高的分辨率重建图像,推动 CT 影像更清晰、扫描更快速、性能更安全和结果更智能^[11]。能谱 CT 技术能够根据 X 线在物质中的衰减系数转变为相应的图像,有利于鉴别组织的特异性。通过对各种病变的 CT 能谱分析图和能谱曲线的对比分析,有助于发现规律性特征,进一步指导肿瘤定位、定性、分级、分期和疗效评价^[12]。

1.4 MRI

MRI 是利用生物体内特定原子核在磁场中所表现出的磁共振现象而产生信号,经空间编码、重建而获得影像的一种成像技术,具有软组织分辨率高、无电离辐射损伤和可进行功能与生化代谢分析等优势。近年来,随着新型 MRI 技术的研发,MRI 在表征肿瘤的分子变化、鉴定分期、监测疗效和判断预后中具有重要作用。MRI 弥散加权成像 (diffusion-weighted imaging, DWI) 通过在活体水平观察水分子扩散运动,以表观弥散系数 (apparent diffusion coefficient, ADC) 值量化水分子扩散情况,间接反映组织功能状态,对肿瘤良恶性鉴别具有重要价值^[13]。磁共振波谱 (magnetic resonance spectroscopic, MRS) 和化学交换饱和转移 (chemical exchange saturation transfer, CEST) 成像可以无创检测特定化学物质在人体组织内的浓度和分布情况,在分子水平反映疾病代谢和生化变化,对于颅内肿瘤的良恶性鉴别、病理分级、浸润边界和疗效评估等具有重要指导价值^[14-15]。此外,基于时间依赖的磁共振弥散成像等多参数 MRI 序列能够对血管化、免疫细胞浸润和代谢等肿瘤细胞特征和肿瘤微环境进行量化评估,可充分反映肿瘤内和肿瘤间的异质性,有助于分子靶向和免疫治疗疗效评价,推动个性化精准诊疗^[16]。

1.5 超声成像

超声成像是利用超声声束扫描人体,通过对反射信号的接收处理而获得体内器官图像的影像技术,具有无创无痛、无辐射、实时成像、便携性强、成本低和适用范围广等优势。近年来,超声影像技术在肿瘤诊疗中取得了诸多显著进展。超声弹性成像 (ultrasound elastography, UE) 可通过评估组织弹性改变情况区分良恶性病变,在乳腺癌、肝癌和甲状腺癌的精准确诊中具有重要价值^[17]。对比

增强超声 (contrast enhanced ultrasound, CEUS) 利用对比增强微泡背向散射产生的非线性信号,凸显局部病灶,通过显示病灶内微循环灌注达到诊断目的,常用于病变良恶性鉴别、肿瘤消融术前评估和术后监测^[18]。针刺活检、射频消融、微波消融和高强度聚焦超声 (high intensity focused ultrasound, HIFU) 等超声引导下的介入治疗可显著提高肿瘤诊疗精准性和安全性,广泛用于肝癌、乳腺癌、前列腺癌和甲状腺癌的治疗^[19]。此外,超声微泡联合药物靶向递送的深入研究使其在化疗、免疫治疗、基因治疗和声动力学等肿瘤综合治疗中具有广阔应用前景和转化价值^[20]。

1.6 核医学成像

核医学成像是基于核素示踪原理,利用放射性核素或其标记化合物在体内代谢分布的特殊规律,从体外获得脏器和组织功能结构影像的成像技术,主要包括单光子发射计算机断层成像 (single photon emission computed tomography, SPECT) 和正电子发射断层成像 (positron emission tomography, PET)。作为一种先进的分子影像手段,核医学成像能够早期、无创、动态表征机体代谢和功能改变,在多种恶性肿瘤特别是淋巴瘤和多发性骨髓瘤的早期诊断分期、复发监测和治疗反应早期评估中具有不可或缺的地位^[21]。核医学成像还可作为新药研发的重要评估手段,定量分析药代动力学和药效学等特性,进行肿瘤精准个体化治疗药物筛选^[22]。此外,采用不同诊疗核素探针将显像诊断与内照射治疗相结合,可达到诊疗一体化的目的。通过核素内照射治疗靶病灶,实现个体化精准诊疗,改善患者预后。目前,核医学诊疗一体化已在分化型甲状腺癌、前列腺癌、神经内分泌肿瘤、肝癌、嗜铬细胞瘤和恶性肿瘤骨转移等疾病中显示出出色的治疗效果^[23]。

2 影像学在肿瘤诊疗中的应用

2.1 早期检测

早期检测与筛查是提高肿瘤治愈率和改善预后的先决条件。低剂量 CT 扫描是公认的肺癌早期筛查的有效手段,可使肺癌死亡率降低 31%^[24]。随着人工智能 (artificial intelligence, AI) 的快速发展,基于低剂量 CT 影像的 AI 模型可实现肺结节的自动检测,且具有较高的敏感度和特异度,显著改善了肺癌患者的生存预后。乳腺 X 线是乳腺癌的主要筛查方式,对女性乳腺癌筛查的总体敏

感度约为 85%，而对于致密型腺体的女性，敏感度却降至 47.8%~64.4%^[25]。乳腺超声不受腺体密度的影响，可以调整角度从多个方向评估乳腺肿物的形态、内部结构、边缘层次和肿瘤内部血供情况，可作为乳腺癌 X 线筛查的重要补充手段^[26]。结肠镜检查是结直肠癌的主要筛查手段。对于无法进行结肠镜检查的受检者，CT 结肠造影技术（又称 CT 仿真结肠镜）可作为一种非侵入性检查手段，提高结直肠癌的检出率^[27]。因此，影像学检查在肿瘤的早期检测中扮演着不可或缺的角色，为患者提供更早的治疗干预，提高患者生存率。

2.2 诊断与分期

肿瘤精准诊断与分期是进一步制定个体化诊疗方案的前提。CT 能够清晰显示肿瘤的浸润范围与程度、周围淋巴结转移和远处脏器转移情况，是肺癌、胃癌和结直肠癌等恶性肿瘤诊断分期的主要影像学检查手段。CT 增强扫描可通过使用对比剂提高病变组织和正常组织之间的图像对比度，帮助发现平扫时未显示的病变，明确病变范围和边界，鉴别病变的良恶性，进一步提高检查敏感度和特异度^[28]。MRI 具有软组织分辨率高、多方位扫描和多参数成像等特点，能清楚显示肿瘤浸润深度、临近组织累及范围和区域淋巴结转移情况，是头颈部肿瘤、直肠癌和子宫颈癌等早期诊断、临床分期和术前评估的首选检查手段^[29]。超声内镜可清晰显示肿瘤局部浸润深度，并能一定程度评估区域淋巴结转移情况，对于食管、胃和直肠等空腔脏器肿瘤的 T 分期和 N 分期具有较高应用价值^[30]。同时，超声内镜精准、经济且快捷，在超声内镜引导下细针穿刺可获得病理组织协助确诊^[31]。PET/CT 融合代谢和解剖双模态信息，并可一次性全身成像，因而对于肿瘤诊断和分期具有独到的优势，目前已作为指南推荐用于肺癌、乳腺癌、淋巴瘤和多发性骨髓瘤等多种恶性肿瘤的诊断与鉴别诊断、分期和治疗前评估^[32]。总之，影像学对于肿瘤的精确诊断和分期至关重要，辅助临床进行精准个体化诊疗决策。

2.3 疗效监测

早期的疗效监测评估有助于及时调整个体化诊疗方案，避免过度治疗。随着对肿瘤生物学行为及其分子机制的研究深入，在传统化疗之外的靶向和免疫治疗等新疗法在临床上的应用日益广泛。由于作用机制不同，靶向和免疫治疗不一定显示出与细胞毒性治疗相同的影像学征象。实体瘤疗效评价标准（Response Evaluation Criteria in Solid

Tumors, RECIST）是临床上评估化疗、靶向治疗和免疫治疗疗效的最常用工具，但该标准仅以 CT 和 MRI 结构影像上瘤灶径线变化作为评估依据，不能反映肿瘤功能变化，亦不能与假性进展进行有效区分，因而对于全面精准评估疗效具有一定局限性^[33]。PET/CT 能够在体、无创且灵敏监测组织器官代谢情况，往往在解剖结构变化之前就能准确反映肿瘤代谢活性的改变，可有效区分治疗后残余活性肿瘤组织与坏死或纤维成分^[3]。目前，PET/CT 已被指南推荐用于淋巴瘤和多发性骨髓瘤的早期疗效评估^[34-35]，同时也是食管癌、乳腺癌和肺癌新辅助治疗效果评价的重要手段。

2.4 预后评估

预后评估对于指导临床治疗方案的选择、预防并发症和预测患者生存率具有重要意义。肿瘤患者预后与原发部位、病理类型和分期等多种因素有关^[36]。研究表明，CT 和 MRI 影像上的肿瘤大小、淋巴结转移区域与范围、临近组织器官浸润和远处转移等指标是肺癌、乳腺癌和子宫颈癌等多种肿瘤的不良预后因素^[37-39]。DWI 影像上高信号肿瘤细胞密度和高增殖指数相关，提示肿瘤侵袭性较强和预后不佳^[40]。PET/CT 影像上的最大标准化摄取值（maximum standardized uptake value, SUV_{max} ）可反映肿瘤整体代谢水平，与多种肿瘤预后密切相关^[41]。一些新的半定量代谢参数，如代谢肿瘤体积（metabolic tumor volume, MTV）和总病变糖酵解（total lesion glycolysis, TLG）等指标可反映全身性肿瘤负荷情况，对淋巴瘤、多发性骨髓瘤和肺癌等恶性肿瘤预后评估具有重要价值^[42]。

3 影像学面临的挑战与展望

3.1 影像设备和模态的发展

影像学的发展离不开硬件设备的支撑。随着影像数字化时代和分子影像时代的到来，技术驱动产品创新升级，影像设备的发展面临高分辨率、高敏感度、快速、大视野和外观小型化等方面需求^[43]。长轴视场 PET/CT 可实现高敏感度全身成像，极大缩短了图像采集时间，并减少放射性药物使用剂量，减少患者和工作人员的辐射暴露^[44]。可穿戴的超声成像设备实现了对人体深层组织和器官持续性监测，提供更直观和更准确的影像信息^[45]。未来全面数字化和智能化将成为医学影像设备的重点发展方向。

单一模态成像手段易受客观因素干扰且具有

一定局限性,多种模态成像技术的融合是当前医学影像领域的发展趋势^[3,46]。随着计算机技术的飞速发展,可将不同设备的图像数据通过计算机软件进行图像融合。PET/CT、SPECT/CT和PET/MRI的研发实现了功能代谢影像与解剖形态学影像的同机融合,既能提供病灶的精细解剖结构信息,又能反映病灶的生理生化等功能代谢信息,为肿瘤的精准定位、定性和定量诊断提供更为丰富信息,目前已在肿瘤临床诊疗中得到广泛应用。PET/CT/超声成像和PET/MRI/光学成像等三模态成像也在临床前研究中取得突破,并有望实现临床转化^[47]。多模态成像融合技术使各种影像模态优势互补,突破了单一模态成像的尺度局限性,具有跨尺度、全方位和可视化等特点,为肿瘤筛查、诊断和治疗评估提供多维信息,赋能肿瘤个体化精准诊疗。

3.2 影像探针/对比剂的研发

实现肿瘤精准影像的关键,在于构建肿瘤特异和高亲和力的影像探针和对比剂。针对肿瘤发生和发展过程中的细胞代谢、特异性蛋白表达、肿瘤微环境和免疫炎症反应等病理生理过程或靶点设计新型探针/对比剂,有助于深入研究肿瘤演进的生物学机制和新药研发。近年来,光学影像探针领域的研究热点主要包括对近红外染料和骨架的结构修饰,以延长吸收和发射波长,提高信号穿透深度和信号背景比,有望改善复杂手术中解剖结构的可视化和肿瘤切除效果^[48]。在超声影像方面,成像分辨率是限制超声成像技术的重大挑战之一。简化造影剂的制作流程和减少肠系膜细胞气体吸收造成的信号影响等都有助于提高肿瘤诊断准确性。微泡、纳米微泡和纳米液滴等新型超声造影剂的研发有望实现肿瘤早期诊断、病程监测和药物靶向输送与释放^[49]。新型MRI造影剂(如粘附于特定分子的顺磁性物质靶向造影剂、依赖特定蛋白酶或环境pH等局部分子特征的造影剂和标记T细胞等特定细胞类型并依赖细胞定位的造影剂等)的研发应用可显著提高检测敏感度、生物相容性、磁强度和药物负载能力^[50]。在核医学分子影像探针领域,随着SPECT和PET的普及,以^{99m}Tc、¹⁸F和⁶⁸Ga为代表的诊断性放射性药物的研发近年来发展迅速。一些针对肿瘤缺氧、氨基酸代谢、细胞增殖、特异性蛋白表达、肿瘤微环境和肿瘤免疫等病理生理过程的特异性新型核医学分子影像探针,如¹⁸F-fluoromisonidazole (FMISO)、

⁶⁸Ga-fibroblast activation protein inhibitor (FAPI)-02、¹⁸F-prostate-specific membrane antigen (PSMA)-1007和⁶⁸Ga-dodecanetetraacetic acid-tyrosine-3-octreotate (DOTATATE)等,在乳腺癌、肝癌、神经内分泌肿瘤和前列腺癌等恶性肿瘤的精准诊断中体现重要价值^[22]。未来影像探针研发面临的问题主要在于如何针对临床问题设计安全高效的探针,并实现不同模态和功能之间的有机互补。

3.3 AI技术发展

随着影像技术的不断发展,影像数据的类型和规模正以前所未有的速度快速增长,数据爆炸已让医疗影像真正进入大数据时代。如何对影像数据进行高效、全面和准确的智慧分析是实现肿瘤精准诊治的关键,而AI是支撑影像大数据分析整合的重要方法。通过深度挖掘X线、CT、MRI、超声和PET/CT等医学图像大数据,AI技术已将肿瘤诊疗研究推进到一个新高度。AI技术不仅可以实现病灶的自动分割与识别,还可提取图像内部的海量高维特征并构建精准诊疗模型,进而为肿瘤的早期筛查、精准诊断、疗效评价与预后预测等提供重要临床价值^[51]。然而,AI作为一项新兴技术,仍有待进一步发展和完善。医学影像相关算法模型仍不成熟,存在系统性故障和模型误判漏判风险。未来医学影像AI领域研究面临的挑战和热点方向主要包括模型可解释性、数据标注与标准化、样本多样性与复杂性、模型泛化性和多中心大规模数据的验证等方面^[52]。

总之,光学、X线、CT、MRI、核医学和超声等不同影像方法可从活体、组织和分子等不同尺度水平表征肿瘤演进过程中的功能、代谢和解剖等病理生理变化,在肿瘤早筛、诊断分期、疗效监测和预后评估等个体化全程管理中各有优势。多种模态成像技术的互补与融合是医学影像领域未来的发展趋势。随着影像设备的不断更新迭代、新型分子影像探针的研发应用和AI大模型的兴起发展,医学影像有望提供智能化肿瘤风险预警和诊断建议,推动个体化治疗方案制定,优化临床决策过程,为肿瘤精准诊疗提供强有力的技术支撑。

参考文献:

- [1] Bray F, Laversanne M, Sung H, et al. Global cancer statistics 2022: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries[J]. CA Cancer J Clin, 2024, 74(3): 229-263.

- [2] Mateo J, Steuten L, Aftimos P, et al. Delivering precision oncology to patients with cancer[J]. *Nat Med*, 2022, 28(4): 658–665.
- [3] Zhang K, Sun YJ, Wu S, et al. Systematic imaging in medicine: a comprehensive review[J]. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*, 2021, 48(6): 1736–1758.
- [4] Kenry, Duan YK, Liu B. Recent advances of optical imaging in the second near-infrared window[J]. *Adv Mater*, 2018, 30(47): e1802394.
- [5] Zhang ZY, Du Y, Shi XJ, et al. NIR-II light in clinical oncology: opportunities and challenges[J]. *Nat Rev Clin Oncol*, 2024, 21(6): 449–467.
- [6] Yan TJ, Su MY, Wang ZM, et al. Second near-infrared plasmonic nanomaterials for photoacoustic imaging and photothermal therapy[J]. *Small*, 2023, 19(30): e2300539.
- [7] Chong A, Weinstein SP, McDonald ES, et al. Digital breast tomosynthesis: concepts and clinical practice[J]. *Radiology*, 2019, 292(1): 1–14.
- [8] Lobbes MB, Lalji U, Houwers J, et al. Contrast-enhanced spectral mammography in patients referred from the breast cancer screening programme[J]. *Eur Radiol*, 2014, 24(7): 1668–1676.
- [9] Lalji UC, Jeukens CR, Houben I, et al. Evaluation of low-energy contrast-enhanced spectral mammography images by comparing them to full-field digital mammography using EUREF image quality criteria[J]. *Eur Radiol*, 2015, 25(10): 2813–2820.
- [10] Walsh CL, Tafforeau P, Wagner WL, et al. Imaging intact human organs with local resolution of cellular structures using hierarchical phase-contrast tomography[J]. *Nat Methods*, 2021, 18(12): 1532–1541.
- [11] Douek PC, Boccalini S, Oei EHG, et al. Clinical applications of photon-counting CT: a review of pioneer studies and a glimpse into the future[J]. *Radiology*, 2023, 309(1): e222432.
- [12] Rajiah P, Parakh A, Kay F, et al. Update on multienergy CT: physics, principles, and applications[J]. *Radiographics*, 2020, 40(5): 1284–1308.
- [13] Messina C, Bignone R, Bruno A, et al. Diffusion-weighted imaging in oncology: an update[J]. *Cancers*, 2020, 12(6): 1493.
- [14] Hangel G, Jain S, Springer E, et al. High-resolution metabolic mapping of gliomas via patch-based super-resolution magnetic resonance spectroscopic imaging at 7T[J]. *Neuroimage*, 2019, 191: 587–595.
- [15] Mancini L, Casagrande S, Gautier G, et al. CEST MRI provides amide/amine surrogate biomarkers for treatment-naïve glioma sub-typing[J]. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*, 2022, 49(7): 2377–2391.
- [16] Hoffmann E, Masthoff M, Kunz WG, et al. Multiparametric MRI for characterization of the tumour microenvironment[J]. *Nat Rev Clin Oncol*, 2024, 21(6): 428–448.
- [17] Oglat AA, Abukhalil T. Ultrasound elastography: methods, clinical applications, and limitations: a review article[J]. *Appl Sci*, 2024, 14(10): 4308.
- [18] Erlichman DB, Weiss A, Koenigsberg M, et al. Contrast enhanced ultrasound: a review of radiology applications[J]. *Clin Imaging*, 2020, 60(2): 209–215.
- [19] Bachu VS, Kedda J, Suk I, et al. High-intensity focused ultrasound: a review of mechanisms and clinical applications[J]. *Ann Biomed Eng*, 2021, 49(9): 1975–1991.
- [20] Bouakaz A, Michel Escoffre J. From concept to early clinical trials: 30 years of microbubble-based ultrasound-mediated drug delivery research[J]. *Adv Drug Deliv Rev*, 2024, 206: 115199.
- [21] Jin CT, Luo XY, Li XY, et al. Positron emission tomography molecular imaging-based cancer phenotyping[J]. *Cancer*, 2022, 128(14): 2704–2716.
- [22] Schwenck J, Sonanini D, Cotton JM, et al. Advances in PET imaging of cancer[J]. *Nat Rev Cancer*, 2023, 23(7): 474–490.
- [23] Bodei LS, Herrmann K, Schöder H, et al. Radiotherapeutics in oncology: current challenges and emerging opportunities[J]. *Nat Rev Clin Oncol*, 2022, 19(8): 534–550.
- [24] Li N, Tan FW, Chen WQ, et al. One-off low-dose CT for lung cancer screening in China: a multicentre, population-based, prospective cohort study[J]. *Lancet Respir Med*, 2022, 10(4): 378–391.
- [25] US Preventive Services Task Force, Nicholson WK, Silverstein M, et al. Screening for breast cancer: US Preventive Services Task Force recommendation statement[J]. *JAMA*, 2024, 331(22): 1918–1930.
- [26] Evans A, Trimboli RM, Athanasiou A, et al. Breast ultrasound: recommendations for information to women and referring physicians by the European Society of Breast Imaging[J]. *Insights Imaging*, 2018, 9(4): 449–461.
- [27] Sali L, Ventura L, Mascali M, et al. Single CT colonography versus three rounds of faecal immunochemical test for population-based screening of colorectal cancer (SAVE): a randomised controlled trial[J]. *Lancet Gastroenterol Hepatol*, 2022, 7(11): 1016–1023.
- [28] Yoneyama T, Tateishi U, Endo I, et al. Staging accuracy of pancreatic cancer: comparison between non-contrast-enhanced and contrast-enhanced PET/CT[J]. *Eur J Radiol*, 2014, 83(10): 1734–1739.

- [29] Horvat N, Carlos Tavares Rocha C, Clemente Oliveira B, et al. MRI of rectal cancer: tumor staging, imaging techniques, and management[J]. *Radiographics*, 2019, 39(2): 367–387.
- [30] Aslanian HR, Muniraj T, Nagar A, et al. Endoscopic ultrasound in cancer staging[J]. *Gastrointest Endosc Clin N Am*, 2024, 34(1): 37–49.
- [31] van der Merwe SW, van Wanrooij RLJ, Bronswijk M, et al. Therapeutic endoscopic ultrasound: European Society of Gastrointestinal Endoscopy (ESGE) guideline[J]. *Endoscopy*, 2022, 54(2): 185–205.
- [32] El-Galaly TC, Gormsen LC, Hutchings M. PET/CT for staging; past, present, and future[J]. *Semin Nucl Med*, 2018, 48(1): 4–16.
- [33] Eisenhauer EA, Therasse P, Bogaerts J, et al. New response evaluation criteria in solid tumours: revised RECIST guideline (version 1.1)[J]. *Eur J Cancer*, 2009, 45(2): 228–247.
- [34] Younes A, Hilden P, Coiffier B, et al. International Working Group consensus response evaluation criteria in lymphoma (RECIL 2017)[J]. *Ann Oncol*, 2017, 28(7): 1436–1447.
- [35] Cavo M, Terpos E, Nanni C, et al. Role of ¹⁸F-FDG PET/CT in the diagnosis and management of multiple myeloma and other plasma cell disorders: a consensus statement by the International Myeloma Working Group[J]. *Lancet Oncol*, 2017, 18(4): e206–217.
- [36] Ho-Huynh A, Tran A, Bray G, et al. Factors influencing breast cancer outcomes in Australia: a systematic review[J]. *Eur J Cancer Care*, 2019, 28(4): e13038.
- [37] Teichgraber DC, Guirguis MS, Whitman GJ. Breast cancer staging: updates in the AJCC cancer staging manual, 8th edition, and current challenges for radiologists, from the AJR special series on cancer staging[J]. *AJR Am J Roentgenol*, 2021, 217(2): 278–290.
- [38] Cibula D, Rosaria Raspolini M, Planchamp F, et al. ESGO/ESTRO/ESP guidelines for the management of patients with cervical cancer—Update 2023[J]. *Radiother Oncol*, 2023, 184: 109682.
- [39] van Laar M, van Amsterdam WAC, van Lindert ASR, et al. Prognostic factors for overall survival of stage III non-small cell lung cancer patients on computed tomography: a systematic review and meta-analysis[J]. *Radiother Oncol*, 2020, 151: 152–175.
- [40] Wang YT, Li YC, Yin LL, et al. Can diffusion-weighted magnetic resonance imaging predict survival in patients with cervical cancer? A meta-analysis[J]. *Eur J Radiol*, 2016, 85(12): 2174–2181.
- [41] Matikas A, Johansson H, Grybäck P, et al. Survival outcomes, digital TILs, and on-treatment PET/CT during neoadjuvant therapy for HER2-positive breast cancer: results from the randomized PREDIX HER2 trial[J]. *Clin Cancer Res*, 2023, 29(3): 532–540.
- [42] Mikhaeel NG, Heymans MW, Eertink JJ, et al. Proposed new dynamic prognostic index for diffuse large B-cell lymphoma: international metabolic prognostic index[J]. *J Clin Oncol*, 2022, 40(21): 2352–2360.
- [43] Pulumati A, Pulumati A, Dwarakanath BS, et al. Technological advancements in cancer diagnostics: Improvements and limitations[J]. *Cancer Rep*, 2023, 6(2): e1764.
- [44] Dimitrakopoulou-Strauss A, Pan LY, Sachpekidis C. Long axial field of view (LAFOV) PET-CT: implementation in static and dynamic oncological studies[J]. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*, 2023, 50(11): 3354–3362.
- [45] Hu HJ, Huang H, Li MH, et al. A wearable cardiac ultrasound imager[J]. *Nature*, 2023, 613(7945): 667–675.
- [46] Tian M, He XX, Jin CT, et al. Transpathology: molecular imaging-based pathology[J]. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*, 2021, 48(8): 2338–2350.
- [47] Thakare V, Tran VL, Natuzzi M, et al. Functionalization of theranostic AGuIX[®] nanoparticles for PET/MRI/optical imaging[J]. *RSC Adv*, 2019, 9(43): 24811–24815.
- [48] Seah D, Cheng ZM, Vendrell M. Fluorescent probes for imaging in humans: where are we now?[J]. *ACS Nano*, 2023, 17(20): 19478–19490.
- [49] Tarighatnia A, Fouladi MR, Nader ND, et al. Recent trends of contrast agents in ultrasound imaging: a review of the classifications and applications[J]. *Mater Adv*, 2022, 3(9): 3726–3741.
- [50] Farzin A, Etesami SA, Quint J, et al. Magnetic nanoparticles in cancer therapy and diagnosis[J]. *Adv Healthc Mater*, 2020, 9(9): e1901058.
- [51] Bera K, Braman N, Gupta A, et al. Predicting cancer outcomes with radiomics and artificial intelligence in radiology[J]. *Nat Rev Clin Oncol*, 2022, 19(2): 132–146.
- [52] Panayides AS, Amini A, Filipovic ND, et al. AI in medical imaging informatics: current challenges and future directions[J]. *IEEE J Biomed Health Inform*, 2020, 24(7): 1837–1857.

(收稿日期 : 2024-08-12)