

医学物理新发展

庞博 张琦 全红

(武汉大学物理科学与技术学院 430072)

医学物理是一门连接物理学与医学的交叉学科。它既包含了最前沿的物理原理,也紧密依赖临床需求推动技术革新。^[1]自1895年伦琴发现X射线以来,物理学与医学便结下了不解之缘。正是得益于物理学的不断进步,现代医学才拥有了透视人体内部的眼睛和精准打击病灶的“武器”。

从最初的X光片,到能够逐层重建的人体CT;从传统的二维放射治疗,到如今的容积旋转调强放疗;从黑白的B超图像,到能够反映分子代谢过程的全身PET扫描,医学物理学始终在推动医学的认知边界不断拓展。可以说,每一次物理技术的突破,都会在医学领域掀起一场“革命”。

今天,医学物理的发展正在进入一个新的阶段。一方面,传统影像与放疗技术在不断完善,正向着更清晰、更精准、更安全的方向迈进;另一方面,新兴的光子计数CT、切伦科夫成像、高强度聚焦超声,以及人工智能与量子技术的引入,又在不断拓宽医学物理的边界。这些变化不仅仅是科研成果的展示,更关系到普通患者的诊断体验和治疗效果。

本文将围绕医学影像、放射治疗、新兴前沿与跨界融合四大板块,梳理医学物理近年来的主要发展,并通过类比和实例,帮助读者理解其背后的原理与意义。

一、医学影像的发展——从“看不见”到“看得清”

医学影像是医学物理最直观的体现。它让医生能够“透视”人体内部,从而进行更准确的诊断与治疗。影像技术的发展轨迹,可以概括为:从“看不

见”到“看得见”,再到“看得更清晰、更早、更全面”。

1. X射线与CT:从影子到三维模型

如果把医学影像比作一场视觉革命,那么X射线就是开端。1895年,伦琴发现X射线能穿透人体,并在底片上留下骨骼影像。这一发现迅速改变了医学诊断方式,让医生第一次能够直接“看见”骨折、异物甚至肺部的病变。

但X光片毕竟是二维投影,犹如给人体拍一张“影子照”。要想了解更复杂的内部结构,就需要进一步的突破。计算机断层扫描(CT)的出现,正是一次质的飞跃。CT通过从不同角度采集X射线投影数据,再由计算机重建三维图像,仿佛是把身体“切成一片片薄片”后再重新拼合起来。^[2]

如今的螺旋CT能在短短几秒内完成全身扫描(图1),医生甚至可以从任意角度观察病灶。更重要的是,随着低剂量扫描和人工智能重建算法的发展,CT不仅清晰度更高,而且辐射剂量也在不断降低。可以说,CT让“看清楚”成为可能,同时兼顾了“少伤害”。

近年来的光子计数CT更是备受关注。与传统CT只记录总能量不同,光子计数CT能“分辨不同颜色的X光子”,就像从黑白电视跨越到彩色电视,不仅清晰度提高,还能区分不同物质。这意味着医生可以更好地区分病变组织与正常组织,例如鉴别痛风结晶和钙化灶,避免误诊。

2. 磁共振成像(MRI):磁场里的“听诊器”

CT依赖的是辐射,而MRI则是另一种完全不同的思路。它不靠射线,而是利用磁场和射频信号“倾听”体内氢原子的共振。人体内含有大量的水

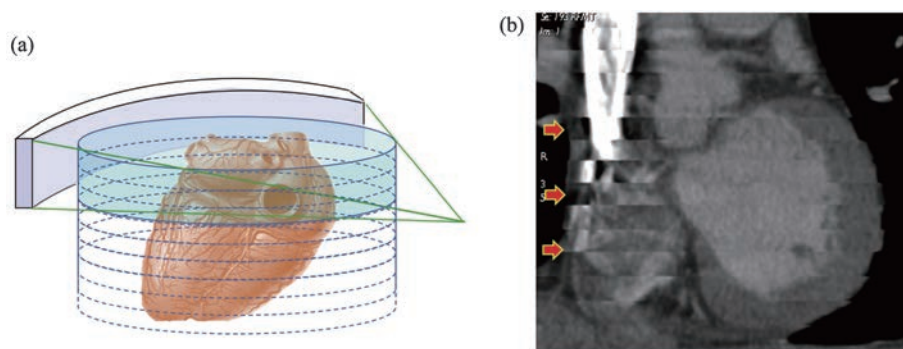


图1 一种CT采样示意图

(a)检测器仅覆盖心脏的一小部分,需要多次采集才能实现全覆盖;
 (b)在16行检测器上采集的初始图样,此时存在配准误差(红色箭头)^[2]

分子,而氢原子核在磁场中会像小磁针一样排列。当射频脉冲“敲击”它们时,它们会像乐器一样发出微弱的“歌声”,这些信号经过处理,就能拼凑出内部的图像。

MRI的魅力在于,它不仅能显示解剖结构,还

能反映功能状态(图2)。例如功能性MRI(fMRI)可以追踪大脑在活动时的血流变化,就像为大脑绘制“思维地图”。扩散张量成像(DTI)则能描绘神经纤维的走向,为神经外科提供精细导航。^[3]

近年来,高场强MRI(强度达到1.5 T以上)的发

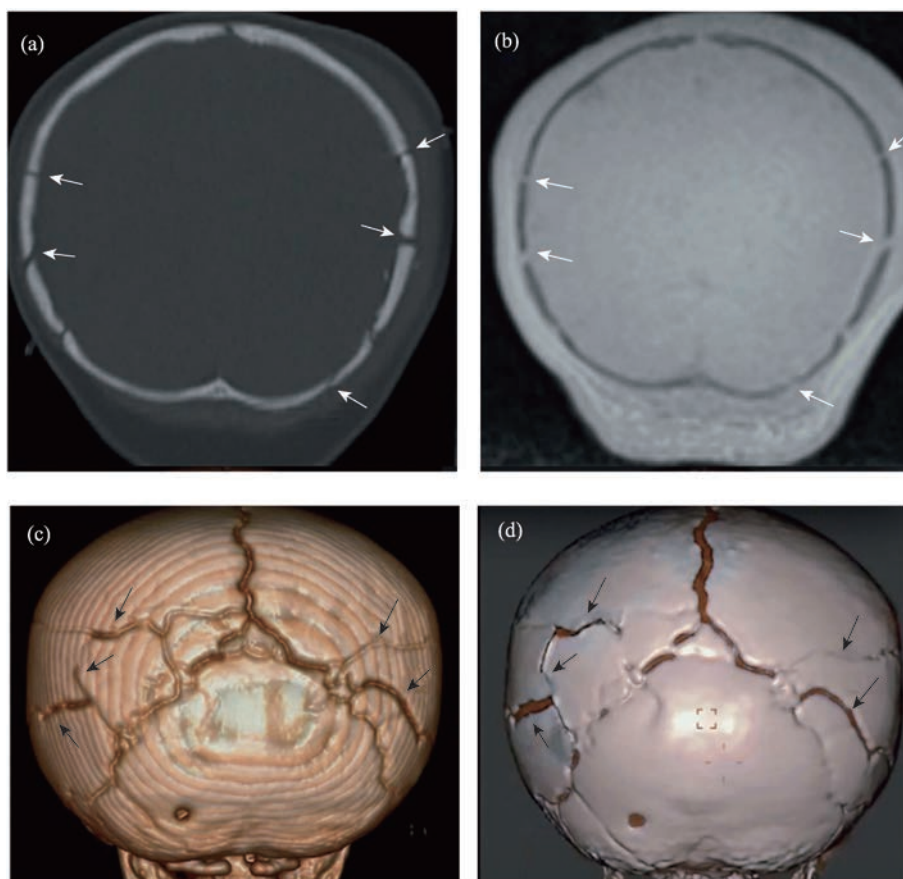


图2 CT和MRI对照图,箭头指向病例多处骨折

(a)头部CT;(b)黑骨MRI;(c)对CT进行彩色3D处理;(d)对MRI进行彩色3D处理^[3]

展进一步推动了分辨率的提升。7 T MRI能够显示出细微的皮层分层结构,甚至捕捉到微小病灶的早期变化。但高场强也像“大功率电磁炉”,会带来更高的能量沉积和安全隐患,因此在推广应用时仍需谨慎。

未来,结合分子成像探针和智能分析,MRI有望在早期疾病筛查和精准治疗中发挥更大作用。

3. PET与功能成像:追踪身体的“能量流向”

如果说X射线和CT是解剖学的眼睛,MRI是结构和功能的结合体,那么正电子发射断层成像(PET)就是代谢学的窗口(图3)。

PET的原理是给病人注射少量带有放射性的示踪剂,例如“会发光的糖”—— ^{18}F -氟代脱氧葡萄糖(FDG)。肿瘤细胞因为代谢旺盛,就会“吃”更多的糖。这样,PET就能描绘出肿瘤的分布。医生不仅能看到病灶的位置,还能了解它的活跃程度,从而判断肿瘤的良恶性以及治疗效果。^[4]

最新的全身PET能在一次扫描中覆盖全身,而且灵敏度显著提升。这意味着医生可以更早发现微小病灶,提高早期诊断的准确率。未来,PET与

MRI的融合(PET-MRI)也正在兴起,它结合了代谢和结构信息,被誉为“影像学的终极组合”。

4. 超声:实时的“声波探照灯”

相比CT和MRI,超声最大的特点是安全、便捷。它通过高频声波进入人体,再根据回声信号形成图像。因为不涉及电离辐射,超声特别适合孕妇和儿童。

超声就像一支“声波探照灯”,能实时显示内部结构的动态(图4)。产科超声能看到胎儿的活动,心脏超声能监测心脏的跳动。^[6]近年来,高频探头和超声造影技术让超声的分辨率大幅提升,甚至可以分辨细小血管和神经结构。

二、放射治疗的精准化之路——从“打得到”到“打得准”

医学影像让医生能“看得见”病灶,而放射治疗则是让医生能“打得准”。在肿瘤治疗中,放疗是与手术、化疗并列的三大支柱之一,有60%~70%的肿瘤患者在治疗过程中会使用放疗。放疗的目标,就像狙击手一样:既要使射线精准送入肿瘤中心,又

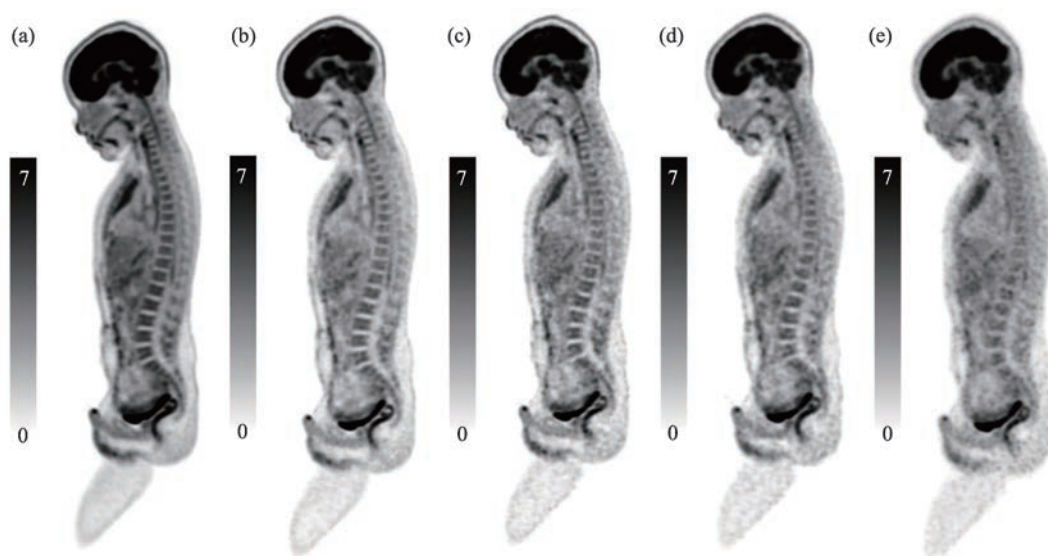


图3 不同剂量结核病PET系统扫描的淋巴瘤图像

(a) 4 MBq/kg; (b) 1 MBq/kg; (c) 0.5 MBq/kg; (d) 0.25 MBq/kg; (e) 0.125 MBq/kg^[5]

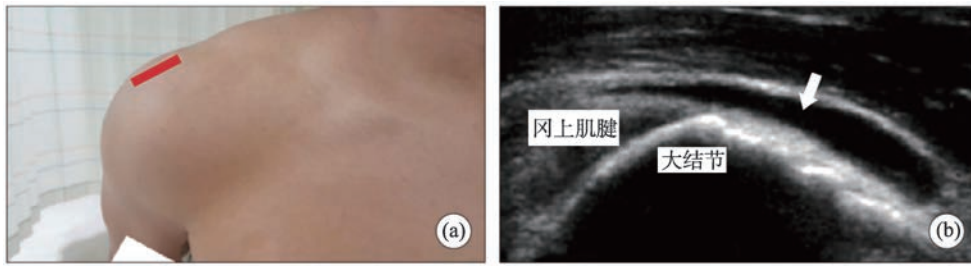


图4 超声探测异常肩峰看到泪滴形征(a)探头位置;(b)冈上肌腱的纵向视图^[7]

要最大限度保护周围健康组织。

1. 三维适形放疗: 量体裁衣的“放疗裁缝”

直线加速器的出现使高能 X 射线照射技术成为主流照射技术。直线加速器能产生能量可控、方向灵活的射线,就像“狙击步枪”,比“手电筒”更集中。为了使光子能精准立体地覆盖靶区的照射,减少靶区外的损伤,三维适形放疗(3D-CRT)的提出让射线的形状可以根据肿瘤的三维轮廓来设计,犹如为肿瘤量身定制一副“防护口罩”,把辐射能量精确包裹在肿瘤形状内。这大大提高了治疗的针对性(图5)。它是现代放射治疗迈向精准时代的重要一步。它的核心理念,是让放射线的“形状”与肿瘤的三维轮廓完美贴合,从而在尽量杀死肿瘤细胞的同时,最大限度地保护周围健康组织。它不仅为精准放疗的发展奠定了基础,也在设备条件有限的地

区,仍然是安全、可靠、性价比高的选择。

2. 调强放疗: 剂量雕刻师

调强放疗 (IMRT, Intensity-Modulated Radiotherapy)是现代放射治疗中精确度极高的一种技术。它的核心思想,是让每一束放射线都拥有不同的“强度”,通过计算机优化控制,使肿瘤区域接受足够高的剂量,而周围健康组织则得到最大限度的保护。

在传统的三维适形放疗中,射线的形状可以“包裹”肿瘤,但每个射束的强度是均匀的。而在调强放疗中,医生将每个射束分割成无数个小单元,每个小单元的能量都可以独立调整。它利用多叶准直器把射线分割成许多小束,并能独立调节每束的强度,就像用喷枪为肿瘤“分层涂漆”。这种方式不仅能贴合肿瘤复杂的几何形状,还能绕开关键器官。

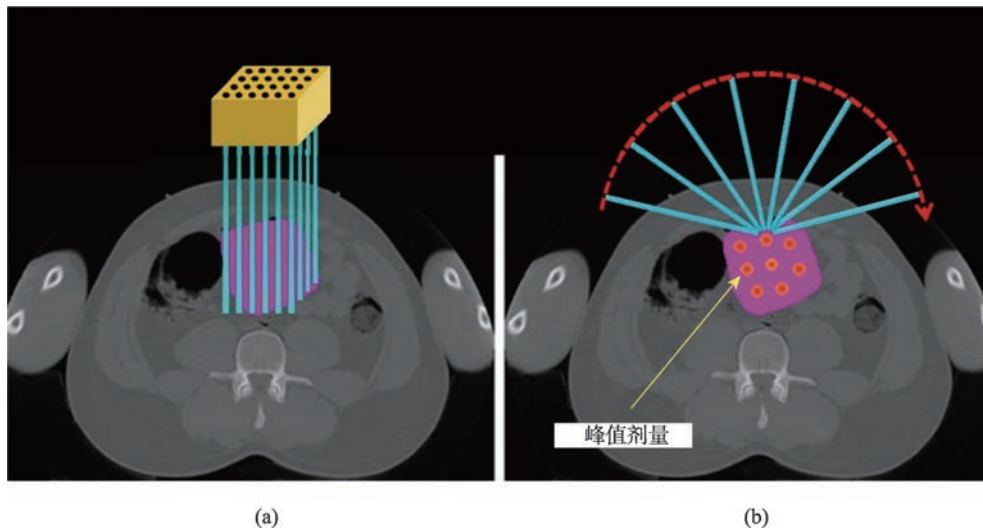


图5 2D GRID 疗法(a)和 3D LATTICE 疗法(b)^[8]

在治疗计划的制定中,医生和物理师会利用计算机反向优化算法,根据肿瘤和器官的位置、形状以及耐受剂量等因素,自动计算出最合适的射线强度分布。治疗时,加速器按照计划精确执行,就像一台能“听懂指令”的光子打印机(图6)。

调强放疗的出现,使放疗真正进入了“精准雕刻”时代。它尤其适用于头颈部、前列腺、妇科以及胸腹部等临近重要器官的肿瘤,可以显著降低副作用,提高治疗效果。如今,IMRT已经成为全球放疗中心的标准配置,也为自适应放疗和粒子治疗等更先进技术的发展奠定了基础。

3. 影像引导与自适应放疗:治疗中的“导航系统”

虽然IMRT已经很精准,但人体是动态的,病人在治疗中可能会移动,肿瘤也会因为呼吸或消化而位置改变。如果“狙击手”只靠一次性瞄准,很可能会出现偏差。

于是,影像引导放疗(IGRT)应运而生。IGRT在治疗前或治疗过程中为患者进行CT或X射线成像,实时确认肿瘤位置,必要时调整体位。这就像在射击时加上了“激光瞄准器”,保证射线真正落在目标点。

更先进的是自适应放疗(ART)。它不仅能确认位置,还能根据肿瘤在整个治疗周期中的缩小或转移,动态调整治疗计划。好比在开车时有导航经常修正路线,让治疗始终保持最佳精准度(图6)。^[10]

4. 粒子治疗:布拉格峰的“深水炸弹”

X射线的物理特性决定了它在穿过人体时能量不断释放,会给肿瘤前后的组织带来额外损伤。为了解决这个问题,科学家们引入了其他粒子作为治疗工具。

质子的剂量分布有一个著名的“布拉格峰”:能量在进入人体时释放较少,而在到达肿瘤深处时突然集中释放,几乎把能量“全部倒在目标点”。^[12]这就像一枚潜水艇发射的“深水炸弹”,前进时不爆炸,而是潜到目标点才释放威力。

相比质子,碳离子等重离子不仅有类似的布拉格峰效应,还具有更高的生物效应,能有效杀伤某些对X射线耐受的肿瘤。临床上,质子与重离子放疗被广泛应用于儿童肿瘤、脊柱肿瘤以及靠近视神经、脑干等关键器官的肿瘤。因为它们能在保证疗效的同时,把副作用降到最低(图7)。

除了质子和碳离子,其他粒子也有放疗的尝试,比如氦粒子和 π 介子。目前,全球已有数百台粒子治疗加速器投入临床,中国的质子治疗中心和重离子治疗中心也在快速发展。虽然设备昂贵,但其精准和低副作用的优势,使其成为未来放疗的重要方向。

三、新兴技术前沿——拓展医学物理的边界

如果说医学影像和放射治疗已经是医学物理

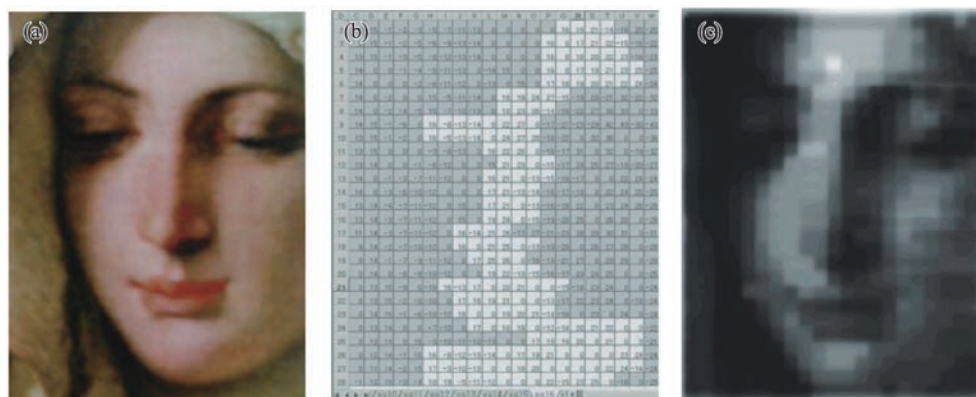


图6 IMRT系统在X光片上复现绘画

(a)原始画作;(b)使用电子表格计算每个位置的强度;(c)投射到X光片上^[9]

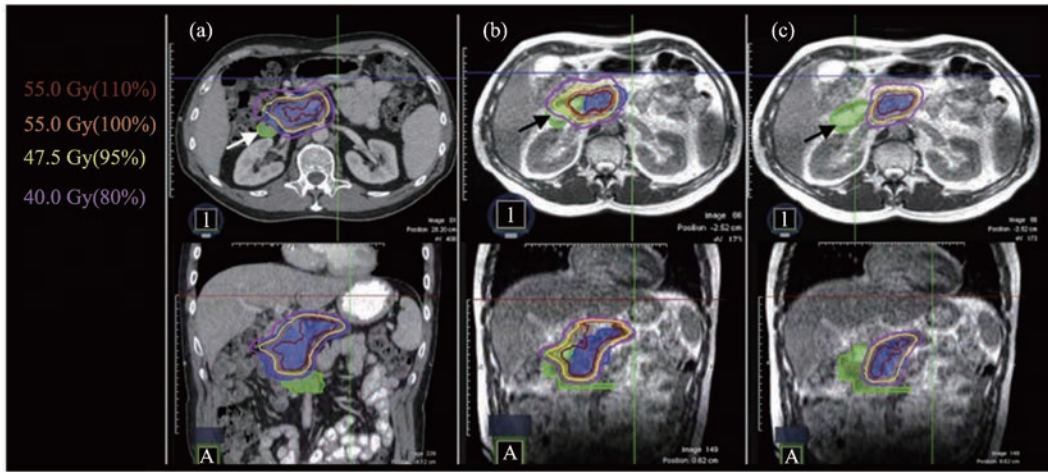


图7 利用MRI进行的ART

(a)初始CT的剂量布置;(b)将CT的信息转化为MRI信息;(c)在MRI中调整剂量布置达成ART^[11]

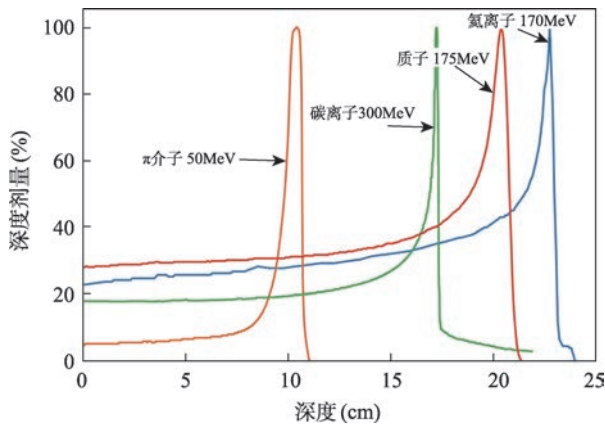


图8 用于粒子治疗的175 MeV质子、170 MeV/u氦离子、50 MeV π 介子和300 MeV/u碳离子的不同深度相对剂量分布图^[13]

的两大“基石”，那么正在涌现的新技术，则像是不断向外扩展的疆域。这些新工具让我们有机会看得更细、更早，治得更安全、更彻底。

近年来，光子计数CT、切伦科夫成像、高强度聚焦超声(HIFU)、低温等离子体医学等新兴方向，正在为医学物理注入活力。

1. 光子计数CT: 从黑白到彩色

传统CT的探测器就像一台“电能收集器”，它只记录所有X光子的总能量，而不关心这些光子分别来自哪里、能量是多少。结果就是，影像清晰度

有限，很多物质的细微差别无法区分。

光子计数CT则不同。它能对每一个进入探测器的X光子进行“逐个登记”，并根据能量高低进行分类(图9)。这就好比过去的电视是黑白的，只能看到明暗差别，而光子计数CT则像彩色电视，可以看到“色彩信息”。^[14]

临床应用中，这意味着医生可以区分不同类型的沉积物。例如，痛风患者的尿酸结晶与普通钙化在传统CT上看起来很相似，容易混淆；但光子计数CT能凭借能谱差异，把两者清晰区分开来，从而避免误诊。此外，它还能更好地显示血管斑块成分，为心血管疾病的早期预防提供帮助。

目前，光子计数CT正在加速从实验室走向临床。它不仅提升了分辨率，还在一定程度上降低了辐射剂量，未来有望成为高端影像中心的标配。

2. 切伦科夫成像: 让射线“看得见”

放射治疗的一个难题是，射线本身是不可见的。医生虽然能计算剂量分布，但在治疗过程中，无法直接“看到”射线到底打在了哪里。

切伦科夫成像的出现，给这个问题提供了一个巧妙的解决方案(图10)。当高能带电粒子在组织中穿行时，如果速度超过局部介质中的光速，就会产生一种微弱的蓝色光，这就是切伦科夫辐射。它就像

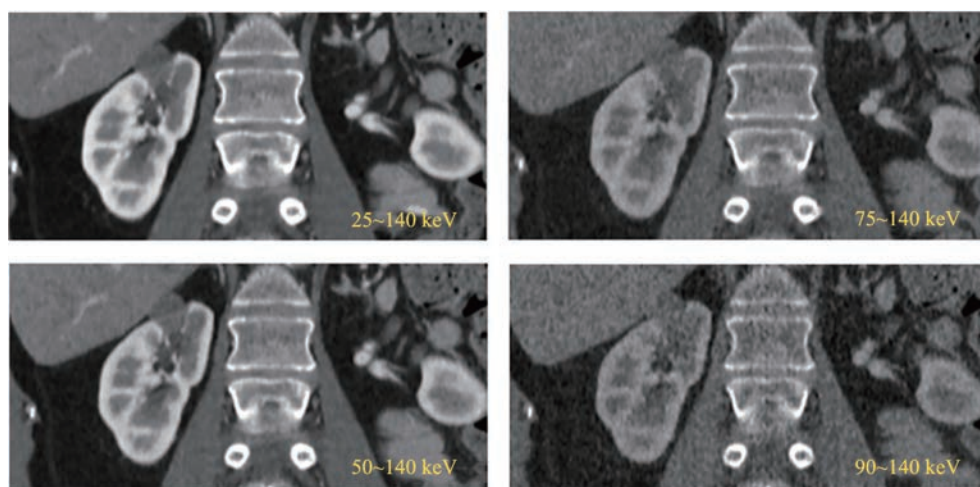


图9 利用光子CT技术检索不同能量区间的光子^[15]

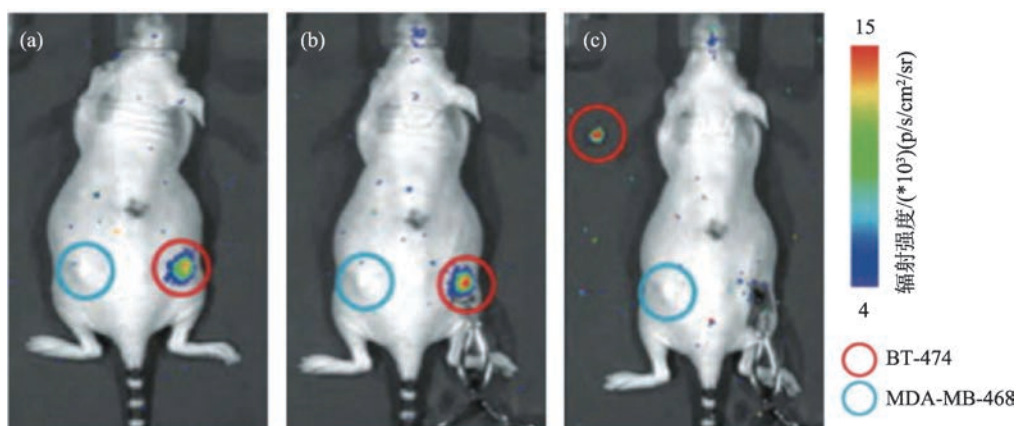


图10 切伦科夫成像引导手术

(a)手术切口前小鼠;(b)切除前信号的强度增加;(c)切除的肿瘤(左上角)^[16]

子弹穿过空气时产生的音爆,只不过表现为光闪。

医学物理师利用高灵敏度相机捕捉这种光,就能实时绘制射线在体内的轨迹。换句话说,切伦科夫成像让“无形的射线”变得可见。^[16]

其应用前景十分广阔:在放疗中,它能够帮助医生实时监控剂量分布,确保实际执行与计划一致;在核医学中,它可以用来追踪放射性药物在体内的走向;甚至在外科手术中,它也可能成为一盏“导航灯”,协助医生勾勒病灶边界。

虽然切伦科夫光极为微弱,目前还需要在暗室或特殊条件下才能成像,但随着成像器件和算法的进步,未来它有望成为放疗中的“第三只眼”。

3. 高强度聚焦超声(HIFU): 声波手术刀

提到超声,很多人会想到产科B超。但超声不仅能“看”,还能“治”。高强度聚焦超声(HIFU)正是其中的代表。

HIFU的原理很直观:就像用放大镜把阳光聚焦到一点,可以点燃纸片;HIFU把超声波聚焦到体内某个点,就能在该处产生高温,进而“烧掉”肿瘤细胞。^[17]

这种方法具有多重优势。它是一种真正意义上的无创治疗,不需要开刀,病人的皮肤上不会留下任何伤口;同时,其聚焦精度可以达到毫米级,使得能量仅在病灶处集中释放,从而实现对肿瘤

的高度选择性消融;更为重要的是,即便病灶复发,依旧可以再次实施治疗,因而具备良好的可重复性。

目前,HIFU已在子宫肌瘤、肝癌、前列腺疾病等治疗中展现出良好疗效(图 11),部分医院甚至将其作为常规选择之一。未来,结合影像引导和 AI 控制,HIFU有望成为微创治疗的“主力军”。

4. 低温等离子体医学:医学里的“科幻武器”

等离子体常见于科幻电影,例如光剑、等离子炮。但在医学领域,低温等离子体已经走出实验室,开始用于临床(图 12)。

所谓低温等离子体,指的是在室温下通过电离产生的一种富含活性粒子的状态。这些粒子包括自由基、离子、紫外光等,能与细胞和分子发生作用。

这种“物理之火”展现出了广阔的应用潜力。它能够迅速杀灭细菌、病毒和真菌,因此在创面处理和医疗器械消毒中表现出独特优势;同时,它还能通过刺激细胞因子释放,加快伤口愈合,尤其在糖尿病足等慢性难愈合创面上取得了令人瞩目的效果;更为前沿的是,一些初步研究发现,低温等离

子体对癌细胞具有一定的选择性杀伤作用,为未来肿瘤治疗提供了新的思路。^[19]

形象地说,低温等离子体就像一把“分子级手术刀”,既能消灭病原体,又能激活身体的修复能力。虽然目前还处于探索阶段,但它为医学物理打开了一扇新的大门。

四、跨界融合——医学物理与其他前沿科技的对话

医学物理并不是孤立存在的,它的发展离不开其他学科的支持。近年来,超导、量子、人工智能、材料科学等新兴技术的崛起,正与医学物理形成越来越紧密的交汇。这种跨学科趋势表明,医学物理的未来并不局限于“物理学+医学”,而是“物理学+医学+X”。这种跨界融合不仅让医学工具更先进,也让人们对未来医疗产生了新的想象。

1. 超导技术与医学影像

MRI是临床上最重要的影像手段之一,而它的核心部件正是超导磁体。超导材料在低温下能实现“零电阻”,从而维持强大而稳定的磁场。可以说,没有超导,就没有今天的高场强MRI。

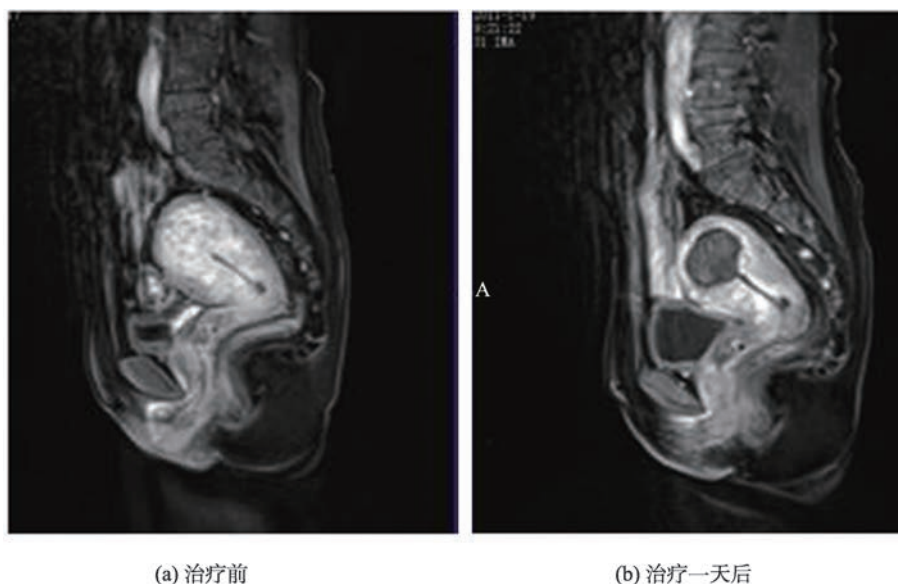


图 11 子宫腺肌病治疗前后对比^[18]

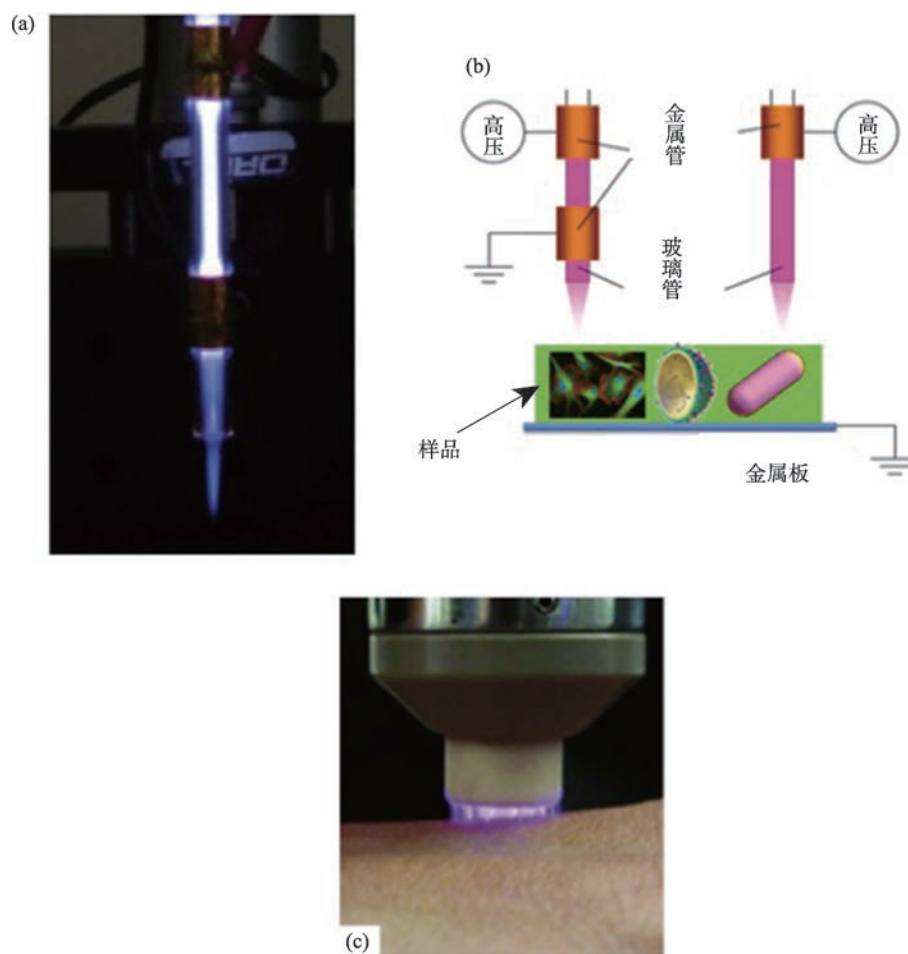


图12 使用氩等离子进行治疗
(a)氩的等离子束流;(b)设备布置示意图;(c)直接在皮肤使用进行治疗^[19]

未来,随着高温超导材料的不断突破,MRI设备有望变得更加紧凑、稳定,甚至可能不再依赖昂贵的液氮制冷。^[20]这将大大降低成本,让更多医院、尤其是基层医疗机构,也能普及高质量MRI检查。换句话说,超导技术的进步,有望让MRI从“奢侈品”变成“日用品”(图13)。

2. 量子技术与医学传感

量子技术同样正在进入医学领域。量子传感器能对极其微弱的磁场和电场变化做出响应。比如,大脑神经活动会产生极弱的磁场,传统方法很难探测,而量子磁力计则有可能实现高灵敏度、无创的脑磁成像(MEG)。^[21]这为研究阿尔茨海默病、癫痫等脑部疾病提供了全新手段。

此外,量子成像利用光子的量子关联特性,可以突破传统成像分辨率的限制(图14)。未来,也许医生能用量子光学设备看到比现有影像更细微的病变,甚至在分子水平上进行成像。

3. 人工智能与大数据

在影像和放疗中,人工智能已经发挥巨大作用。但未来,它的潜力还远不止于此。随着医疗大数据的积累,AI可以对患者进行个体化风险预测,帮助医生制定精准治疗方案。它甚至可能在影像采集前就预测需要的扫描参数,从而减少无效检查和重复辐射。并且针对某一放疗任务也可能有多种可使用的人工智能模型供以研究(图15)。

可以设想,未来的放疗科或影像科,就像一座

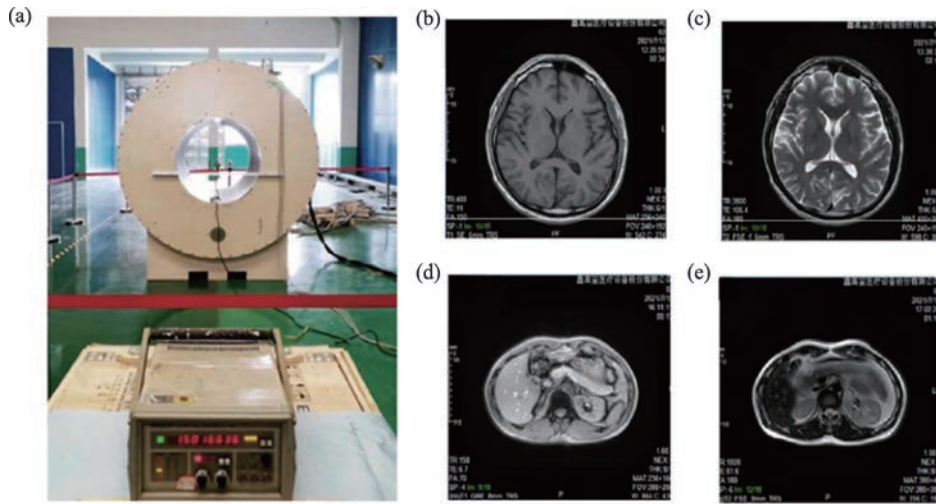


图13 大口径全身无冷冻剂MRI和人体影像学检查

(a)1.5 T无低温超导磁体;(b)SE序列大脑图像;(c)FSE序列大脑图像;(d)GRE序列腹部图像;(e)FSE序列腹部图像^[20]

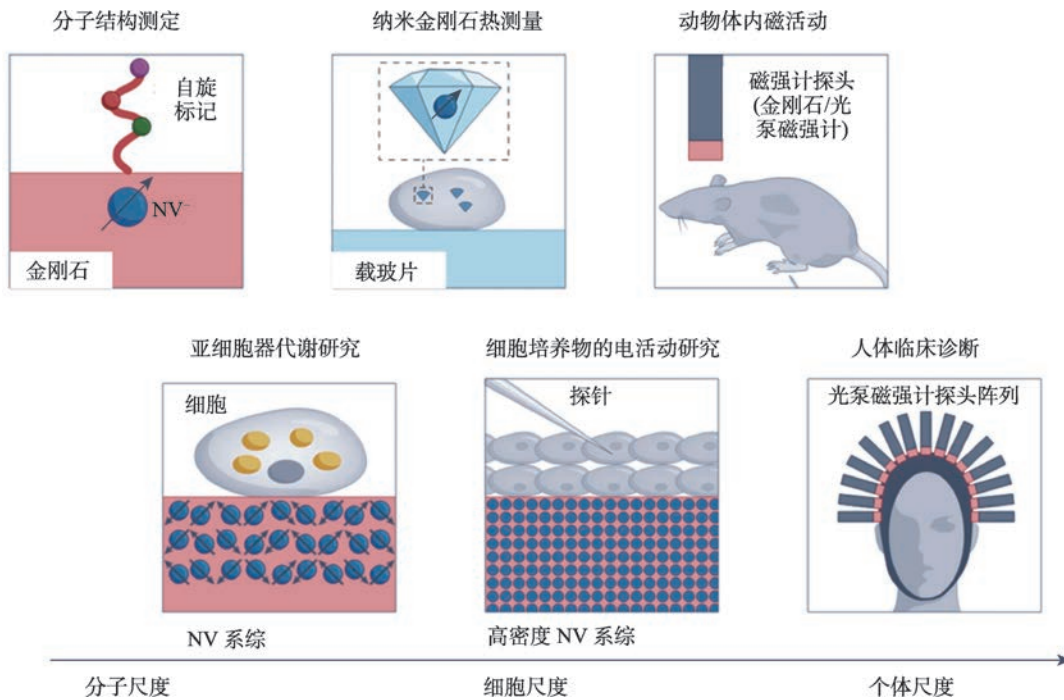


图14 量子传感器将对不同长度尺度的生物医学研究产生影响^[21]

“智能工厂”：患者进入后，AI系统根据影像和既往病史自动生成最佳治疗流程，医生只需审核与把关。这不仅能极大提高效率，也能减少医疗资源的不均衡。

4. 其他前沿技术

更广泛地看，医学物理正在和其他前沿技术交

叉融合。例如：

- 纳米材料能作为造影剂或药物载体，提高成像灵敏度和治疗靶向性；
- 3D打印可用于个性化放疗固定器和体模，提高精准度；
- 计算科学为大规模图像重建和剂量计算提供算力支持。

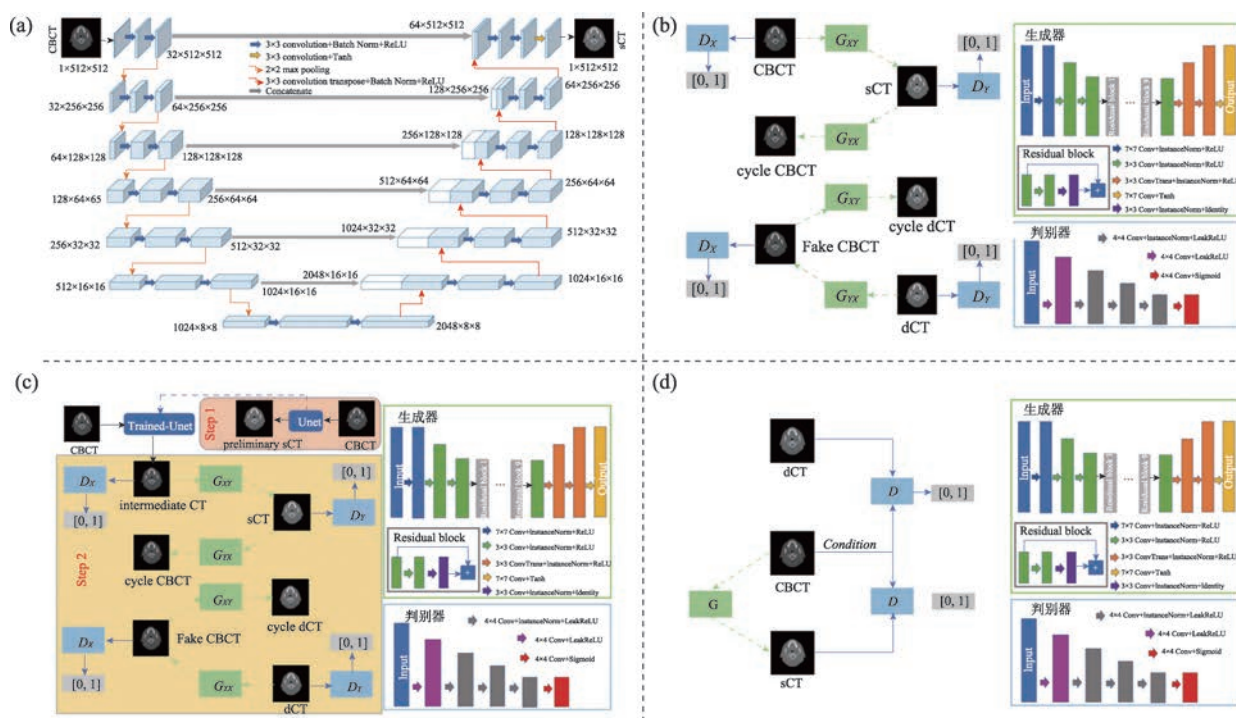


图 15 四种影像生成的深度学习模型

五、未来展望——医学物理的新地平线

医学物理的过去百余年来，是一部从“看得见”到“治得准”的发展史。那么，它的未来又将走向何方？

1. 更低风险：追求“零伤害”

未来的医学影像将尽可能降低辐射剂量，甚至完全避免辐射。例如光子计数CT能在更低剂量下获得更高分辨率，MRI则有望通过超导和量子技术进一步普及。影像的目标不仅是“看得清”，还要“看得安心”。

2. 更强融合：跨界协同创新

医学物理将越来越依赖跨界合作。超导带来更强磁体，量子提供更灵敏探测，纳米材料带来更精准的药物递送，AI提供实时决策支持。不同学科的“拼图”组合在一起，将推动医学向着更加智能化、个体化的方向发展。

3. 远景畅想

可以这样想象：若干年后，患者走进一家智慧医院，接待的是AI助手。扫描设备小巧却功能强大，检查几分钟就能完成；影像不仅展示结构，还能显示细胞代谢和分子活动；放疗机根据实时影像自动调整射线轨迹，精准“锁定”肿瘤；等离子体和HIFU替代部分手术，实现无创治疗。所有这一切，都离不开医学物理的支撑。

六、结语

医学物理的使命，是把抽象的物理原理转化为守护生命的工具。从伦琴的X光片，到今天的光子计数CT和粒子治疗，从最初的粗放放疗，到AI赋能的智能化方案，医学物理不断在科学与医学之间架起桥梁。

它不仅是现代医学的基石，更可能是未来医学革命的引擎。

未来，随着超导、量子、AI等前沿科技的不断融

合,医学物理必将开辟新的地平线。无论是医生还是患者,都将在这一进程中,见证医学从“经验艺术”真正走向“精准科学”。

参考文献

- [1] 殷芳芳, 杨振宇, 蔡璟, 等. 中国医学物理学科的建设与探索专家共识[J]. 中国医学物理学杂志, 2024, 41(4): 397-403.
- [2] HSIEH J, FLOHR T. Computed tomography recent history and future perspectives[J]. *Journal of Medical Imaging*, 2021, 8(5)[2025-09-04].
- [3] FLORKOW M C, WILLEMSSEN K, MASCARENHAS V V, et al. Magnetic Resonance Imaging Versus Computed Tomography for Three-Dimensional Bone Imaging of Musculoskeletal Pathologies: A Review[J]. *Journal of Magnetic Resonance Imaging*, 2022, 56(1): 11-34.
- [4] MINGELS C, CHUNG K J, PANTEL A R, et al. Total-Body PET/CT: Challenges and Opportunities[J]. *Seminars in Nuclear Medicine*, 2025, 55(1): 21-30.
- [5] TROTTER J, PANTEL A R, TEO B K K, et al. Positron Emission Tomography (PET)/Computed Tomography (CT) Imaging in Radiation Therapy Treatment Planning: A Review of PET Imaging Tracers and Methods to Incorporate PET/CT[J]. *Advances in Radiation Oncology*, 2023, 8(5): 101212.
- [6] BERTOLO A, FERRIER J, CAZZANELLI S, et al. High sensitivity mapping of brain-wide functional networks in awake mice using simultaneous multi-slice fUS imaging[J]. *Imaging Neuroscience*, 2023, 1: 1-18.
- [7] KIM S Y, CHEON J H, SEO W J, et al. A pictorial review of signature patterns living in musculoskeletal ultrasonography[J]. *The Korean Journal of Pain*, 2016, 29(4): 217-228.
- [8] WEBSTER M, PODGORSK A, LI F, et al. New Approaches in Radiotherapy[J]. *Cancers*, 2025, 17(12): 1980.
- [9] CHO B. Intensity-modulated radiation therapy: a review with a physics perspective[J]. *Radiation Oncology Journal*, 2018, 36(1): 1-10.
- [10] CHIN S, ECCLES C L, MCWILLIAM A, et al. Magnetic resonance-guided radiation therapy: A review[J]. *Journal of Medical Imaging and Radiation Oncology*, 2020, 64(1): 163-177.
- [11] DONA LEMUS O M, CAO M, CAI B, et al. Adaptive Radiotherapy: Next-Generation Radiotherapy[J]. *Cancers*, 2024, 16(6): 1206.
- [12] 曾伊玲, 全红. 质子FLASH放疗计划设计的考虑因素及现状分析[J]. *科学通报*, 2023, 68(31): 4231-4244.
- [13] KRISHNAN M, RANJITH C P. A narrative review of particle therapy in cancer[J]. *Cancer Research, Statistics, and Treatment*, 2023, 6(2): 248-260.
- [14] DOUEK P C, BOCCALINI S, OEI E H G, 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.
- [15] FLOHR T, PETERSILKA M, HENNING A, et al. Photon-counting CT review[J]. *Physica Medica*, 2020, 79: 126-136.
- [16] THOREK D L, ROBERTSON R, BACCHUS W A, et al. Cerenkov imaging - a new modality for molecular imaging[J].
- [17] BRUNO F, CATALUCCI A, ARRIGONI F, et al. An experience-based review of HIFU in functional interventional neuroradiology: transcranial MRgFUS thalamotomy for treatment of tremor [J]. *La radiologia medica*, 2020, 125(9): 877-886.
- [18] BACHU V S, KEDDA J, SUK I, et al. High-Intensity Focused Ultrasound: A Review of Mechanisms and Clinical Applications[J]. *Annals of Biomedical Engineering*, 2021, 49(9): 1975-1991.
- [19] GRAVES D B. Low temperature plasma biomedicine: A tutorial review[J]. *Physics of Plasmas*, 2014, 21(8): 080901.
- [20] WANG Y, WU P, WANG W, et al. Cryogen-free superconducting magnetic resonance imaging system: A review[J]. *Fundamental Research*, 2025: S2667325825002250.
- [21] ASLAM N, ZHOU H, URBACH E K, et al. Quantum sensors for biomedical applications[J]. *Nature Reviews Physics*, 2023, 5(3): 157-169.

