

射波刀技术及其在前列腺癌治疗中的应用

李燕燕^{1,2}, 陈天媚^{1,2}, 何洁^{1,2}, 曾福斌^{1,2}, 张火俊²

1. 上海理工大学健康科学与工程学院, 上海 200093; 2. 海军军医大学附属上海长海医院放疗科, 上海 200433

【摘要】前列腺癌是全球男性常见的恶性肿瘤之一,其治疗目标是在有效控制肿瘤的同时,最大限度地保证患者的生活质量。随着医学影像和放射治疗技术的飞速发展,立体定向放射治疗和放射外科已成为前列腺癌治疗的重要手段。射波刀作为一种先进的影像引导式无框架放射治疗系统,以其独特的实时影像跟踪、自动补偿技术和高度精细的剂量塑形能力,在前列腺癌的精准治疗中展现出显著优势。本综述旨在回顾射波刀技术在前列腺癌治疗中的应用现状,重点探讨其剂量学优势、临床疗效、毒副作用以及与其他治疗方式的比较,并展望其未来的发展方向。

【关键词】射波刀;前列腺癌;立体定向放射治疗;剂量学;临床应用;综述

【中图分类号】R318;R730.55;R811.1

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2026)06-0716-11

CyberKnife technology and its application in the treatment of prostate cancer

LI Yanyan^{1,2}, CHEN Tianmei^{1,2}, HE Jie^{1,2}, ZENG Fubin^{1,2}, ZHANG Huojun²

1. School of Health Science and Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. Department of Radiation Oncology, Changhai Hospital Affiliated to Naval Medical University, Shanghai 200433, China

Abstract: Prostate cancer is one of the most common malignant tumors among males worldwide, and its treatment objective is to effectively control the tumor while maximally preserving patient's quality of life. With the rapid advancement of medical imaging and radiotherapy technologies, stereotactic body radiotherapy and radiosurgery have become important modalities in prostate cancer management. As an advanced frameless, image-guided radiotherapy system, CyberKnife demonstrates significant advantages in the precise treatment of prostate cancer, owing to its unique capabilities in real-time image tracking, automatic compensation, and highly conformal dose shaping. This review summarizes the current applications of CyberKnife technology in prostate cancer treatment, focusing on its dosimetric advantages, clinical efficacy, treatment-related toxicities, and comparisons with other treatment modalities. In addition, future development prospects are discussed.

Keywords: CyberKnife; prostate cancer; stereotactic body radiotherapy; dosimetry; clinical application; review

前言

前列腺癌是全球男性高发恶性肿瘤,2022年新发病例约146万人,死亡病例约39万人,位居男性癌症死亡第2位^[1]。尽管前列腺癌患者整体预后较好,但治疗选择复杂,需兼顾肿瘤根治与泌尿、性功能保护。传统治疗包括手术、外照射放疗、近距离放疗和激素治疗等^[2-3]。近年来,立体定向体部放射治疗

(Stereotactic Body Radiation Therapy, SBRT)凭借高剂量、高精度和短疗程的优势,在前列腺癌治疗中日渐重要,可实现与手术相当的生化控制率,并可能减少并发症^[4]。其中,射波刀作为图像引导的立体定向放射外科系统,具备实时追踪与高精度定位能力,可在患者体位或生理运动状态下实现精准照射^[5]。多项临床研究已证实射波刀在前列腺癌治疗中的安全性与有效性,如Nguyen等^[6]研究显示,5次大分割放疗后,患者中位36个月随访期内生化控制率达90%,仅1例出现短暂性晚期3级泌尿毒性,无严重直肠毒性发生。也有研究报道称,射波刀在老年患者中具有较好的耐受性,治疗相关负担整体较低^[7]。Vuolukka等^[8]和Kim^[9]研究同样为射波刀的临床应用提供循证依据。本综述聚焦射波刀在前列腺癌治疗中的应用,回顾其剂量学特性、临床疗效、安全性及与其他治疗方法的对比,以期临床推广和优化提供参考。

【收稿日期】2026-01-05

【基金项目】国家自然科学基金(82473233, 82272742);上海卫生健康委员会领军人才计划(2022LJ019);长海医院“固海”计划(GH145-33)

【作者简介】李燕燕,硕士研究生,研究方向:肿瘤放射治疗,E-mail: 2608300498@qq.com

【通信作者】张火俊,主任医师,博士生导师,研究方向:肿瘤放射治疗,E-mail: chyzzhj@163.com

1 射波刀的技术特点与优势

1.1 系统组成与技术原理

射波刀的核心优势在于集成机器人定位、精密影像引导与立体定向技术,目前已发展至第7代^[5]。其中M6型射波刀达到高精度的肿瘤照射,其核心技术特点包括:(1)直线加速器安装于机器人手臂,实现360°旋转及超过1200个入射角的非共面、多中心照射;(2)结合影像引导与肿瘤追踪功能,对运动靶区进行实时动态的三维剂量雕刻;(3)配备InCise多叶准直器,优化射野适形度与剂量分布^[10]。与传统放疗不同的是,射波刀无需严格的体位固定,保障患者的舒适性。

1.2 前列腺癌治疗中的技术优势

1.2.1 运动管理 前列腺位置易受膀胱、直肠充盈状态及呼吸运动影响而发生移动^[11]。射波刀Synchrony呼吸追踪系统可实时监测并补偿器官运动,显著缩小计划靶区(PTV)外放边界。Kon等^[12]系统比较俯卧位与仰卧位的剂量学差异,发现俯卧位可提高靶区适形度指数,显著降低直肠与膀胱的中低剂量区体积,并缩短治疗时间,为体位优化提供依据。

1.2.2 危及器官剂量限制 射波刀通过非等中心、多射束照射实现高度适形的剂量分布,以及通过正kV级X射线影像引导与实时位置校正,其治疗精度可控制在1mm以内,从而显著降低对直肠、膀胱和股骨头等危及器官的照射剂量,减少放射性毒副作用可有效降低直肠、膀胱的受照剂量^[13]。水凝胶垫片作为辅助技术,可通过注射增加前列腺与直肠间距,进一步降低直肠毒性风险^[14]。临床研究证实,射波刀治疗可实现直肠 $V_{50}<5\%$ 、膀胱 $V_{50}<10\%$ 等严格的剂量限制目标,从而将 ≥ 2 级直肠毒性控制在10%以下^[15-16]。

1.2.3 剂量验证与质量保证 射波刀配备完备的剂量验证体系,包括模体计划验证、在体剂量监测及射束输出稳定性检测。治疗中,kV级X射线实时采集影像并与数字重建影像配准,动态修正靶区位置,确保剂量投递准确性。基于金标的实时追踪技术可达亚毫米级定位精度,为高剂量分割治疗提供可靠的质量保证^[13]。

1.2.4 靶区勾画 射波刀的高精度治疗依赖于精确的靶区定义。这种个体化的外扩策略结合多模态影像融合技术,可实现对肿瘤负荷区域的精准识别和剂量提升^[17-18]。射波刀的非共面照射能力使靶区勾画可以更加贴合实际解剖结构,避免因射束角度限制而被迫扩大靶区。

2 射波刀在前列腺癌治疗中的临床应用

2.1 射波刀治疗前列腺癌的适应症

射波刀不仅适用于局限性前列腺癌根治性治疗,在寡转移及转移性疾病的综合管理中展现出广阔的应用前景。对于局限性前列腺癌:(1)低危、中危、部分高危和极高危患者;(2)无法耐受手术或拒绝手术的患者;(3)需要保留性功能的患者,以上推荐等级B,证据等级2a。对于寡转移的患者:(1)区域或非区域淋巴结、骨、内脏转移灶患者;(2)低肿瘤负荷的转移性前列腺癌(M₁期)患者,以上推荐级别B,证据等级2a^[19]。

2.2 射波刀治疗前列腺癌的治疗方案研究

2.2.1 低中危前列腺癌的SBRT治疗 低中危前列腺癌患者需要在肿瘤控制与治疗毒性之间寻求最佳平衡,射波刀凭借高精度、非侵入性和超短疗程,已成为一种理想的根治性治疗选择。采用35 Gy或36.25 Gy分5次照射的方案已获多项研究支持,例如,Borzillo等^[15]报道5年无生化复发生存率为95.7%, ≥ 2 级泌尿系统和胃肠道毒性均不超过10%。Milecki等^[20]发现即使前列腺体积 $>60\text{ cm}^3$,其两年生活质量变化(Health-Related Quality of Life, HRQOL)也无显著临床差异。Nakamura等^[21]中位随访53个月,2年生化无复发生存率达100%,毒性可控。因此,以上研究表明,射波刀五分割方案对低中危前列腺癌高效安全,对大体积前列腺同样适用。关于预后因素,Miszczyk等^[22]指出前列腺影像报告和数据系统(Prostate Imaging Reporting and Data System, PI-RADS)评分为5分、目标病灶的最大轴向尺寸、垂直尺寸及其乘积面积均与转移风险显著相关。Ratnakumaran等^[23]发现基线国际前列腺症状评分(International Prostate Symptom Score, IPSS)和治疗后急性期泌尿毒性是晚期泌尿系统毒性的显著预测因素。

2.2.2 中危前列腺癌的SBRT治疗 中危前列腺癌具有异质性,部分患者升级风险较高,治疗目标在于通过安全的剂量强化实现长期生化控制。射波刀凭借实时影像引导与动态追踪能力,可最大限度保护危及器官,在提升疗效的同时维持良好的功能结局。德国HYPOSTAT多中心II期试验采用35 Gy/5次方案治疗12~15个月未见 ≥ 2 级胃肠道毒性,累计 ≥ 2 级泌尿毒性发生率为8.4%,中位前列腺特异性抗原(Prostate-Specific Antigen, PSA)降至1.18 ng/mL,证实射波刀在中危患者中的安全性与有效性^[16]。射波刀亦可作为外照射后推量手段以提高局部控制率。Pasquier等^[24]采用两阶段方案:先予46 Gy/23次三维

适形或调强放疗,再以射波刀或直线加速器行18 Gy/3次SBRT推量,结果显示,5年生化无复发生存率达87.4%, ≥ 2 级泌尿和胃肠道毒性累积发生率分别为1.4%和9.3%,低于传统近距离放疗推量的毒性水平。后续长期随访进一步证实,该方案8年总生存率为89.1%,10年毒性反应较低,表明外照射联合射波刀SBRT推量在长期随访中兼具良好的疗效与安全性^[25]。

2.2.3 中高危前列腺癌的SBRT治疗 中高危前列腺癌需兼顾局部强化与系统控制。射波刀作为多模式综合治疗的关键组成部分,可与短期雄激素剥夺治疗联合(Androgen Deprivation Therapy, ADT),或用于全盆腔放疗后局部推量,其技术优势在于能够对影像可见的肿瘤负荷区域进行精准剂量提升,提高局部控制率。临床研究证实多种治疗策略的有效性与安全性,Schröder等^[26]对比发现,射波刀五分割(35.00~36.25 Gy/5次)与C臂加速器七分割(42.7 Gy/7次)方案均安全有效,但五分割胃肠道安全性更优。Zhao等^[27]采用射波刀SBRT(36.25 Gy/5次)联合个体化ADT,5年生化无进展生存率 $>85\%$,毒性轻微。多项研究探索同步推量策略,一项II期试验对病灶同步推量至47.5 Gy/5次, ≥ 2 级急性泌尿/胃肠道毒性分别为25%和30%,仅1例出现3级泌尿毒性^[17]。Kim等^[28]采用盆腔外照射放疗(45 Gy/25次)联合射波刀SBRT推量(21 Gy/3次),结果发现,中危组8年生化控制率达100%,高危组77.8%,无 ≥ 3 级毒性。另一项针对前列腺内优势病灶推量至47.5 Gy的研究,中位随访56个月无晚期 ≥ 2 级胃肠道毒性,证实射波刀精准剂量雕刻的可行性^[18]。关于ADT联合治疗,Shah等^[29]发现尽管ADT导致睾酮急剧下降、扩展版前列腺癌综合指数-26项版本(EPIC-26)激素与性功能评分显著降低,但71%的患者在治疗后1年内睾酮恢复至正常水平,生活质量随之恢复,提示在射波刀治疗中应将睾酮作为生活质量生物标志物,优化患者全程管理。

2.2.4 高危前列腺癌的SBRT治疗 射波刀SBRT作为补量治疗,在高危前列腺癌的综合治疗方案中展现出良好的安全性与初步疗效。Kim等^[30]在全盆腔放疗后采用射波刀进行三分割补量(18~21 Gy),并联合长期ADT,结果显示该方案对极高危患者毒性可接受,无 ≥ 3 级毒性发生,泌尿症状多在4个月内恢复至基线。Van Dams等^[31]采用35~40 Gy/5次方案联合短期ADT,4年无生化复发生存率为81.7%,无远处转移生存率为89.1%,3级毒性发生率低。上述研究验证射波刀在极高危患者中的安全性与可行性,提示21 Gy补量方案可能更具剂量学优势,为后续III期试验设计提供依据,进一步支持射波刀在实现高危前列腺癌剂量提升和疗程缩短中的关键作用。

2.2.5 复发性前列腺癌的SBRT治疗 对于局部复发的前列腺癌,若患者既往接受过根治性手术或放疗,射波刀的影像引导与高精度特性使其成为再次照射的有力选择,可在保证安全的前提下对复发灶进行再程照射,以缓解症状或延长生存。Francolini等^[32]采用30 Gy/5次方案,患者中位无生化复发生存期为40.4个月,无 ≥ 2 级不良事件发生,毒性主要为轻中度。Allali等^[33]采用36 Gy/6次或30 Gy/5次方案,2年局部无复发生存率为93.6%,毒性反应主要为1~2级。Koh等^[34]对淋巴结复发灶采用27.5~35.0 Gy/5次受累野照射,2年局部控制率为93%,仅见低级别胃肠道反应。Majewski等^[35]采用中位剂量33.75 Gy/5次挽救治疗,1年生化应答率为91%,3年生化控制率与总生存率分别为41%和87%。Francolini等^[36]进一步指出,Gleason评分 >7 分和联合ADT是影响预后的重要因素,为临床选择再照射患者提供参考。Kearney等^[37]发现¹⁸F-氟环素PET/CT可在PSA较低时早期识别出射波刀SBRT后的可挽救性复发,为早期干预提供影像学依据。综上所述,射波刀作为前列腺癌局部复发后的挽救治疗手段,在长期有效性和安全性方面表现良好,尤其适用于需要高精度照射以保护周围正常组织的复杂病例。

2.2.6 前列腺癌转移灶的SBRT 在前列腺癌寡转移灶的治疗中,射波刀SBRT展现出良好的局部控制率与安全性。Xu等^[38]采用中位33.6 Gy/5次方案,2年局部控制率为96%,完全缓解率为63%,2年总生存率为87%,无 ≥ 3 级毒性。沈泽天等^[39]报道疾病有效率为85%,疾病控制率95%,1年生存率85%,多数患者PSA显著下降,不良反应轻微。傅华等^[40]发现治疗后原发灶及骨转移灶均得到有效控制,PSA降至正常,症状完全缓解。Van Werkhoven等^[41]将射波刀与轨道CT结合形成在线适应性SBRT,腹盆寡转移1年及3年局部控制率分别为96%和80%。因此,射波刀为前列腺癌伴转移的患者提供一种高效和安全的局部治疗选择。

2.2.7 前列腺癌SBRT的风险管理 在治疗决策层面,Gaudian等^[42]指出补充盆腔淋巴结照射是导致晚期淋巴细胞减少症的关键因素,提示应严格把握盆腔照射指征。Galienne等^[43]研究发现有经尿道前列腺切除术史的患者接受射波刀SBRT后,发生 ≥ 2 级晚期泌尿毒性风险显著增高,需进行个体化剂量管理。

关于长期生活质量,Shah等^[44]报道射波刀治疗后2年累积血精症发生率仅5.6%,且多数可自行缓解。Sholkapper等^[45]首次前瞻性研究射精功能,发现2年时85%患者仍保留射精能力,但射精量减少和射精不适较为常见,提示需关注基线性功能状态。在风险预测方面,Ito等^[46]首次明确前列腺中叶突出

(Intraprostatic Protrusion, IPP)≥0.8 cm是急性尿潴留的独立预测因子,≥1.4 cm时紧急导尿风险极高,为临床风险分层提供实用工具。

表1总结了射波刀SBRT在前列腺癌治疗上的临床研究。

表1 射波刀SBRT在前列腺癌治疗上的临床研究
Table 1 Summary of clinical studies on CyberKnife SBRT in prostate cancer

参考文献	年龄/岁	例数	前列腺癌类型(例)	处方剂量	靶区	危及器官	研究结果	其他
文献[6]	中位:74 (范围:69~86)	110	局限性 低危:28 中危:61 高危:21	36.25 Gy/5次 37.50 Gy/5次	CTV:前列腺(部分病例包括至少1 cm精囊) PTV:CTV外扩3 mm	直肠,膀胱,尿道,肠道,阴茎球,肛管	中位随访时间36个月 ≤2级急性GU毒性:47.3% ≤2级急性直肠毒性:9.0% ≤2级晚期毒性:22.7% 3年bRFS:96.4%(低危),98.7.5%(中危),71.4%(高危),3年OS:94.5%	-
文献[8]	中位:70 (范围:47~86)	213	局限性 低危:47 中危:56 高危:110	35.00 Gy/5次 36.25 Gy/5次	CTV:前列腺和近端精囊(高危病例包括精囊肿瘤区) PTV:CTV外扩3~5 mm(低中危),CTV外扩5 mm(高危)	直肠,膀胱,尿道,肠道,阴茎球,股骨头,睾丸	中位随访时间64个月 5年bRFS:100%(低危),87.5%(中危),80.0%(高危) Gleason评分:92.5%(≤6分),84.2%(≤7分),66.7%(≥8分) 5年OS:97.9%(低危),96.4%(中危),88.6%(高危) 5年DSS:99.1%	-
文献[9]	-	43	局限性 低危:10 中危:29 高危:4	36.25 Gy/5次	CTV:前列腺(部分病例包括精囊) PTV:CTV外扩3~5 mm	-	中位随访时间73.6个月 8年BCF-FS:92.0% 8年OS:73.1% 中位PSA下降率:-0.301 ng/mL/月(1年),-0.191 ng/mL/月(2年),-0.115 ng/mL/月(3年) 无3级急性及晚期毒性反应	-
文献[15]	平均:70 (范围:46~88)	122	局限性 低危:53 中危:69	35.00 Gy/5次 36.25 Gy/5次	CTV:前列腺(中危包括2 cm近端精囊) PTV:CTV外扩5 mm,向后扩3 mm	直肠,膀胱,阴茎球,股骨头,肠管,睾丸,神经血管束	5年DFS:92.9%(1年),92.9%(2年),92.3%(5年) 5年bRFS:100%(1年),100%(2年),95.7%(5年) 2级GU毒性:10%(急性期),2%(迟发期) 2级直肠毒性:8%(急性期),1%(晚期) 2级毒性:3%(35 Gy),20%(36.25 Gy) 无3级急性及晚期毒性反应	-
文献[20]	范围:51~80	530	局限性 低危:254 中危:276	35.00 Gy/5次 36.25 Gy/5次	CTV:前列腺和近端精囊 PTV:CTV外扩5 mm,向后扩3 mm	直肠,膀胱,阴茎球,双侧股骨头	随访时间24个月 前列腺体积≤60 cm ³ 组与>60 cm ³ 组在HRQOL上无临床意义的差异	-
文献[21]	中位:70 (范围:69~86)	25	局限性 低危:4 中危:21	35.00 Gy/5次	CTV:前列腺(背侧外扩1 mm,其他方向外扩3 mm)和近端区域(约距前列腺1 cm) PTV:CTV外扩2 mm	直肠,膀胱,尿道,股骨头	中位随访时间53个月 2级急性GU毒性:20%(急性),8%(晚期) 无3级急性及晚期毒性反应 2年bRFS:100%	-
文献[22]	范围:61~74	152	局限性 低危:81 中危:71	36.25 Gy/5次	CTV:前列腺和1 cm近端精囊 PTV:CTV外扩5 mm,向后扩3 mm	-	PI-RADS为5分和目标病灶大小是早期局限性前列腺癌患者在接受射波刀后发生远处转移的重要预后因素	-
文献[16]	中位:72 (范围:60~87)	85	局限性 中危:85	35.00 Gy/5次	GTV:前列腺和近端精囊 CTV:GTV外扩1~2 mm PTV:CTV外扩3 mm,背侧扩1 mm	直肠,膀胱,尿道,神经血管束,阴茎球部,小肠,股骨头以及皮肤(5 mm厚层)	随访时间12~15个月 ≥2级GU毒性:8.4% 中位PSA值由7.97 ng/mL降至1.18 ng/mL 无≥2级GI毒性	-

续表 1

参考文献	年龄/岁	例数	前列腺癌类型(例)	处方剂量	靶区	危及器官	研究结果	其他
文献[24]	中位:71 (范围:60~87)	76	局限性 中危:76	18.00 Gy/3次	CTV:前列腺 PTV:CTV外扩5 mm	直肠,膀胱, 尿道,股骨头	中位随访时间62个月 2级GU毒性:1.4% 2级GI毒性:9.3% 5年bRFS:87.4% 5年RFS:86.2% PSA平均变化值(标准差):-1.20 ng/mL/月 (0.79)(3个月),-1.30 ng/mL/年(1.05)(5年)	三维适形 或调强放 疗后的推 量治疗
文献[25]	中位:71 (范围:45-84)	76	局限性 中危:76	18.00 Gy/3次	CTV:前列腺 PTV:CTV外扩5 mm	直肠,膀胱, 尿道,股骨头	中位随访时间88个月 2级GU毒性:1.4% 2级GI毒性:11.0% 8年OS:89.1% 8年RFS:76.9%	三维适形 或调强放 疗后的推 量治疗
文献[23]	中位:69 (范围:65~73)	390	局限性 低危:33 中危:357	36.25 Gy/5次	CTV:前列腺(中危包 括1 cm近端精囊) PTV:CTV外扩4~5 mm,向后扩3~5 mm	直肠,膀胱, 膀胱三角区	发生≥2级急性泌尿毒性是晚期毒性的 预测因素(OR:3.15), 更高的基线IPSS评分是2年时发生≥2级 尿毒性的最强预测因素(OR:1.11)	-
文献[26]	中位: 71.8 (范围: 52~85)	120	局限性 低危:10 中危:85 高危:25	35.00~36.25 Gy/ 5次	CTV:前列腺和1 cm 近端精囊 PTV:CTV外扩5 mm, 向后扩3 mm	直肠,膀胱, 尿道,肠道	中位随访时间13个月 ≥2级急性GU毒性:21.1%(5分割),30%(7分割) ≥2级急性GI毒性:2.5%(5分割),15%(7分割) ≥2级晚期GU毒性:17.4%(5分割),6.6%(7分割) ≥2级晚期GI毒性:1.4%(5分割),13.3%(7分割) 1年DFS:98.8%(5分割),94.3%(7分割)	-
文献[27]	中位:76 (范围: 54~87)	133	局限性 低危:10 中危:52 高危:45 极高危: 26	36.25 Gy/5次	CTV:前列腺(部分中 危精囊基底部分1 cm, 高危极高危包括精囊 基底部分2 cm) PTV:CTV外扩5 mm, 向后扩3 mm	直肠,膀胱,尿 道,肠道,股骨 头,阴茎球底 部	中位随访时间57.7个月 5年OS:93.0% 5年bRFS:83.6% 急性GU毒性:1.5%(2级),0.8%(3级) 急性GI毒性:0.8%(2级),无3级 晚期GU毒性:2.3%((2级),0.8%(3级) 无晚期2级以上GI毒性	-
文献[17]	中位:76 (范围: 54~87)	20	局限性 中危:4 高危:16	36.25 Gy/5次	CTV:前列腺(部分病 例包含部分精囊) PTV:CTV外扩5 mm, 向后扩3 mm	直肠,膀胱,尿 道,阴茎球,股 骨头,肠道	中位随访时间30个月 急性GU毒性:25%(2级),5%(3级) 急性GI毒性:30%(2级),无3级 晚期GU毒性:16.7%(2级),无3级 无晚期2级以上GI毒性	病灶同步 推量最高 至47.5Gy/ 5次
文献[28]	-	42	局限性 中危:31 高危:11	21.00 Gy/3次	-	-	中位随访时间84.2个月 中位PSA下降率:-0.605 ng/mL/月(1年), -0.229 ng/mL/月(2年),-0.166 ng/mL/月(3年), -0.094 ng/mL/月(4年) 8年bPFS:100.0%(中危),77.8%(高危) 8年OS:83.7%	与外照射 联合的推 量治疗
文献[18]	中位:75 (范围: 62~80)	8	局限性 中高危:8	36.25 Gy/5次	CTV:前列腺和2/3近 端精囊 PTV:CTV外扩5 mm, 向后扩3 mm	直肠,膀胱,尿 道,阴茎球,股 骨头,肠道	中位随访时间56个月 ≥2级急性GU毒性:37.5% ≥2级急性GI毒性:37.5% ≥2级晚期GU毒性:12.5% 无≥2级晚期GI毒性 bRFS:100.0%	与SABR 联合的同 步整合 推量
文献[29]	中位:72 (范围: 55~89)	122	局限性 低危:10 中危:63 高危:49	35.00~36.25 Gy/5次	CTV:前列腺和 近端精囊 PTV:CTV外扩5 mm, 向后扩3 mm	直肠,膀胱,尿 道,阴茎球,股 骨头,肠道	中位随访时间12个月 中位TR时间内:4个月 1年TR率:71% ADT后,激素和性功能评分显著下降	联合短期 ADT

续表1

参考文献	年龄/岁	例数	前列腺癌类型(例)	处方剂量	靶区	危及器官	研究结果	其他
文献[30]	-	26	局限性 高危:26	18.00 Gy/3次 21.00 Gy/3次	-	-	中位随访时间35个月 ≤2级急性GU毒性:61% ≤2级急性GI毒性:4% ≤2级晚期GU毒性:12% ≤2级晚期GI毒性:8% 无3级以上毒性3年bRFS:88.1% 3年cPFS:92.3%	全盆腔放射治疗后的推量治疗
文献[31]	中位:72.3(范围:55~89)	344	局限性 高危:344	35.00~40.0 Gy/ 5次	-	直肠,膀胱,肠道	中位随访时间49.5个月 ≥2级急性GU毒性:18.0% ≥2级急性GI毒性:5.0% ≥2级晚期GU毒性:17.6% ≥2级晚期GI毒性:6.4% ≥3级晚期GU毒性:2.3% ≥3级晚期GI毒性:0.9% 4年bRFS:81.7% 3年DMFS:89.1%	-
文献[32]	-	101	复发性	30.00 Gy/5次	GTV:可见的复发灶 CTV:GTV外扩2 mm PTV:CTV外扩3 mm,向后扩1 mm	膀胱,直肠,尿道	中位随访时间:57.8个月 ≥2级急性GU毒性:5.0% ≥2级晚期GU毒性:9.0% ≥2级晚期GI毒性:2.0% 中位bRFS:40.4个月 中位OS:83.3个月	-
文献[33]	中位:75(范围:59-89)	41	局部复发性	30.00 Gy/5次 35.00 Gy/5次 36.00 Gy/5次	CTV:前列腺体积和部分精囊(部分病例包含全部精囊) PTV:CTV外扩3 mm(金标植入不良扩5 mm)	直肠壁,膀胱壁,股骨头	中位随访时间:35个月 GU毒性:66%(1~2级),3.3%(3级) GI毒性:30%(1~2级),无3级 2年bRFS:72.9% 2年LRFS:93.6% 2年LLRFS:85.2% 2年MFS:91.5%	-
文献[34]	中位:75	67	淋巴结寡 复发性前列腺癌	27.50~35.00 Gy/ 5次	包含大体淋巴结病灶的淋巴结区域及其紧邻的淋巴结区域	小肠,结肠/直肠	中位随访时间50个月 LC:98%(1年),93%(2年) PFS:78%(1年),50%(2年) OS:99%(1年),96%(2年) ≥2级急性GI毒性:20.0% ≥2级晚期GI毒性:3.0% 无3级毒性	-
文献[35]	中位:68	32	局部复发性	33.75 Gy/5次 36.25 Gy/5次	GTV:可见的复发灶 CTV:GTV外扩小于3 mm或无外扩 PTV:CTV外扩3 mm	直肠,膀胱,肠道,阴茎球部	中位随访时间41个月 ≥2级急性GU毒性:19.0% ≥2级急性GI毒性:6.0% ≥2级晚期GU毒性:31.0% ≥2级晚期GI毒性:12.5% ≥3级毒性:6.0% BR:91%(1年),56%(2年),31%(3年) BC:56%(1年),52%(2年),41%(3年) OS:93%(1年),87%(2年),87%(3年)	-
文献[36]	-	50	局部复发性	30.00 Gy/5次	GTV:可见的复发灶 CTV:GTV外扩2 mm PTV:CTV外扩3 mm,向后扩1 mm	直肠,膀胱	中位随访时间48.2个月 ≤2级晚期直肠毒性:6% ≤2级晚期膀胱毒性:26% 3级急性及慢性膀胱毒性:2% bRFS:中位43个月 2年MFS:82% LC:90%	-

续表1

参考文献	年龄/岁	例数	前列腺癌类型(例)	处方剂量	靶区	危及器官	研究结果	其他
文献[37]	-	50	局部复发性	35.00~36.25 Gy/5次	-	-	¹⁸ F-氟环素 PET/CT 扫描结果 总体阳性率:67% 最常见复发部位:盆腔/主动脉旁淋巴结(40%),前列腺(22%),骨(6%) 寡转移复发:39%	-
文献[38]	中位:68 (范围:51~88)	75	寡转移性	16.00~45.00 Gy/4~8次	GTV:可见的转移灶 PTV:GTV侧向及前后方向外扩2~6 mm, 头脚方向外扩2~8 mm	-	中位随访时间:23.2个月 LC:90%(6个月),97.5%(1年),96.0%(2年) CR:63.0%,PR:10.2%,SD:21.3%,PD:5.6% bPFS:74.6%(6个月),53.3%(1年),47.9%(2年) PFS:77.5%(6个月),50.8%(1年),47.2%(2年) OS:97.0%(6个月),88.8%(1年),87.0%(2年)	-
文献[39]	中位:62 (范围:40~93)	20	肝转移:20	30.00~50.00 Gy/4~5次	GTV:可见的肝转移灶 PTV:GTV外扩5 mm	肝	中位随访时间17个月 ORR:85.0%(CR:40.0%+PR:45.0%) DCR:95.0%,PD:5.0% OS:85.5%(1年),15.0%(2年)	-
文献[40]	79岁	1	骨转移	36.25 Gy/5次 21.00 Gy/3次	GTV:可见的转移灶 PGTV:GTV外扩3 mm PTV:PGTV外扩2~3 mm	膀胱,结肠	随访时间3个月 治疗1个月后PSA从51.18 μg/L降至7.62 μg/L 排尿困难及腰部疼痛症状消失 治疗后L1病变消失,右侧髋骨病变好转	-
文献[41]	中位:70.1	52	寡转移性:52	45.00 Gy/5次	GTV:可见的转移灶 PTV:GTV外扩3 mm	肠道,脊髓,胃	中位随访时间38.5个月 LC:96.0%(1年),80.0%(3年) OS:4.1年(中位),71.6%(3年) DFS:61.5%(1年),17.7%(3年) ≥2级晚期毒性:3.9%,3级晚期毒性:2.0%	-
文献[12]	-	17	-	36.25 Gy/5次	CTV:前列腺(1例患者包含精囊) PTV:CTV外扩3 mm, 后扩2 mm	直肠,膀胱,尿道	俯卧位相较于仰卧位:PTV nCI更优 直肠:V _{90%} 、V _{80%} 、V _{75%} 、V _{50%} 更低 膀胱:V _{50%} 更低 治疗时间更短:(20.9±1.7) min vs (19.8±1.3) min dCAX更大:(151.1±33.6) mm vs (233.2±8.8) mm	-
文献[14]	中位:77 (范围:55~86)	20	局限性:20	36.25 Gy/5次	GTV:前列腺和近端精囊 CTV:GTV外扩3 mm, 向后扩1 mm PTV:CTV外扩2 mm	直肠,膀胱,尿道,股骨头	直肠剂量显著降低,允许更高靶区剂量 同时保护直肠/膀胱	-
文献[42]	中位:77	226	局限性 低危:16 中危:128 高危:81 复发性:1	36.25 Gy/5次	CTV:前列腺和近端精囊 PTV:CTV外扩5 mm, 后扩3 mm	盆腔淋巴结,骨髓,肠道	随访时间24个月 SBRT单药组:基线ALC为1.7 k/mL,3个月降至1.4 k/mL,24个月内38%出现淋巴减少(均为1~2级),无3/4级SBRT+PNI组: ALC 3个月下降57%(0.6 k/μL),82%出现淋巴减少,其中12%为3级,无4级	SBRT单药:36.25 Gy/5次 SBRT+PNI: (19.5 Gy/3次)+ VMAT (37.5~45.0 Gy/15~25次)
文献[43]	中位:73 (范围:54~91)	141	局限性 低危:45 中危:89 高危:7	36.25 Gy/5次	CTV:前列腺和近端精囊 PTV:CTV外扩5 mm, 后扩3 mm	直肠,膀胱,尿道,阴茎球,股骨头,肠道	中位随访时间48个月 ≥2级晚期GU毒性:20.6%(5年) ≥2级晚期GI毒性:0.7%(5年) 5年bPFS:72.1% 5年cBR:7.3% 5年OS:82.3% 3例慢性血尿	尿道切除 前列腺病史

续表1

参考文献	年龄/岁	例数	前列腺癌类型(例)	处方剂量	靶区	危及器官	研究结果	其他
文献[44]	中位:65 (范围:47~70)	227	局限性 低危:45 中危:177 高危:5	35.00 Gy/5次 36.25 Gy/5次	CTV:前列腺和近端精囊 PTV:CTV外扩5 mm,后扩3 mm	射精管,精囊	中位随访时间≥24个月 2年血精发生率:5.6% 血精中位发生时间:治疗后9个月 血精特征: 2年内自行缓解为93% 70%的患者使用5-α还原酶抑制剂治疗 中位持续时间为3个月 中位随访时间24个月 射精功能:2年无射精率:15% 射精能力在治疗后下降,24个月时85%仍能射精 ES-8评分在治疗后1个月显著下降,之后趋于稳定 射精量与不适: 射精量在治疗后显著减少,射精不适在1个月和9个月达高峰 中位随访时间25个月 AUR:20%(2级) 需紧急导尿:2%(2-C级) IPP是唯一独立预测因子: 2级AUR:OR=7.25 2-C级AUR:OR显著 IPP截断值: 预测2级AUR:≥0.8 cm 预测需导尿的2-C级AUR:≥1.4 cm 2级急性胃肠毒性:7% 无≥3级急性毒性 2年bRFS:99.0% 2年OS:99.1%	-
文献[45]	中位:65	231	局限性 低危:47 中危:179 高危:5	35.00 Gy/5次 36.25 Gy/5次	CTV:前列腺和近端精囊 PTV:CTV外扩5 mm,后扩3 mm	包括神经血管束	射精功能:2年无射精率:15% 射精能力在治疗后下降,24个月时85%仍能射精 ES-8评分在治疗后1个月显著下降,之后趋于稳定 射精量与不适: 射精量在治疗后显著减少,射精不适在1个月和9个月达高峰 中位随访时间25个月 AUR:20%(2级) 需紧急导尿:2%(2-C级) IPP是唯一独立预测因子: 2级AUR:OR=7.25 2-C级AUR:OR显著 IPP截断值: 预测2级AUR:≥0.8 cm 预测需导尿的2-C级AUR:≥1.4 cm 2级急性胃肠毒性:7% 无≥3级急性毒性 2年bRFS:99.0% 2年OS:99.1%	-
文献[46]	中位:71 (范围:49~82)	210	局限性 低危:15 中危:116 高危:79	36.25 Gy/5次	CTV:前列腺(中高危包括1 cm近端精囊) PTV:CTV外扩2 mm	直肠,膀胱,尿道,股骨头	中位随访时间≥24个月 2年血精发生率:5.6% 血精中位发生时间:治疗后9个月 血精特征: 2年内自行缓解为93% 70%的患者使用5-α还原酶抑制剂治疗 中位持续时间为3个月 中位随访时间24个月 射精功能:2年无射精率:15% 射精能力在治疗后下降,24个月时85%仍能射精 ES-8评分在治疗后1个月显著下降,之后趋于稳定 射精量与不适: 射精量在治疗后显著减少,射精不适在1个月和9个月达高峰 中位随访时间25个月 AUR:20%(2级) 需紧急导尿:2%(2-C级) IPP是唯一独立预测因子: 2级AUR:OR=7.25 2-C级AUR:OR显著 IPP截断值: 预测2级AUR:≥0.8 cm 预测需导尿的2-C级AUR:≥1.4 cm 2级急性胃肠毒性:7% 无≥3级急性毒性 2年bRFS:99.0% 2年OS:99.1%	-

GU:泌尿生殖系统;bRFS:生化无复发生存期;OS:总生存期;DSS:疾病特异性生存期;BCF-FS:生化临床无失败生存期;DFS:疾病无进展生存期;GI:胃肠道系统;RFS:无疾病复发生存期;TR:睾酮恢复;cPFS:临床无进展生存期;DMFS:无远处转移生存期;LRFS:无局部复发生存期;LRRFS:无局部区域复发生存期;MFS:无转移生存期;LC:局部控制;BR:生化复发;BC:生化控制;CR:完全缓解;PR:部分缓解;SD:疾病稳定;PD:疾病进展;PFS:无进展生存期;ORR:客观缓解率;DCR:疾病控制率;V_{90%}:接受≥90%处方剂量的体积百分比;V_{80%}:接受≥80%处方剂量的体积百分比;V_{75%}:接受≥75%处方剂量的体积百分比;V_{50%}:接受≥50%处方剂量的体积百分比;dCAX:中心轴深度;ALC:绝对淋巴细胞计数;PNI:盆腔淋巴结照射;cBR:生化复发累积发生率;ES-8:射精量表;AUR:急性尿潴留;VMAT:容积旋转调强放射治疗;SABR:立体定向消融放疗

3 射波刀与其他治疗方法的对比

3.1 射波刀与其他外照射放疗的对比

射波刀作为外照射放疗平台之一,与其他技术存在差异。与容积旋转调强放射治疗(VMAT)相比,Ito等^[47]发现射波刀急性期IPSS峰值更低,2级急性泌尿毒性发生率有更低趋势,治疗后生活质量更优。Serra等^[48]对比射波刀与无均整滤过器模式的容积旋转调强放射治疗(Volumetric Modulated Arc Therapy with Flattening Filter Free Beams, VMAT-FFF),两者靶区覆盖相似,但VMAT-FFF在膀胱和肠道低剂量区保护更佳,而射波刀靶区内剂

量峰值更高,适合高剂量聚焦病例。Borowicz等^[49]比较射波刀、调强放射治疗(IMRT)和VMAT,结果发现射波刀适形度指数最佳,但均匀性较差,直肠保护最优,高剂量直肠体积显著小于IMRT和VMAT,但高剂量膀胱体积大于后两者。Ratnakumaran等^[50]发现射波刀虽计划剂量更高,但因精准投照技术,毒性控制更优,尤其通过减小后缘边界实现更好的直肠保护。Gagliardo等^[51]对比射波刀、VMAT-FFF和螺旋断层放疗-Radixact®系统(Helical Tomotherapy-Radixact®System, HT-Radixact),射波刀剂量适形度最优,适合复杂解剖病例,射波刀与VMAT-FFF在危

及器官保护方面略优于HT-Radixact,但治疗时间最长。Serra等^[52]研究表明,射波刀在PTV覆盖率方面最佳,通过非等中心照射和实时追踪实现高度适形剂量分布。总结上述研究可知,射波刀在前列腺癌SBRT中具有高适形度与精准剂量聚焦优势,尤其在直肠保护和降低急性泌尿毒性方面表现突出,但剂量均匀性较低、治疗时间较长,更适合需高精度雕刻的复杂病例。

3.2 射波刀与近距离放疗、手术治疗的对比

射波刀为低中危前列腺癌患者提供一种非侵入性选择,其生化控制率与近距离放疗相当,毒性较低。与手术相比,射波刀避免手术创伤及尿失禁风险,功能保护方面,射波刀治疗后仅IPSS刺激性症状

短暂加重,最大尿流率等客观指标保持稳定,优于近距离放疗组出现的多项排尿参数下降^[53]。由此可知,射波刀等外照射技术在控制早期泌尿毒性方面具有优势,尤其适用于治疗前已存在中重度排尿症状的患者^[54]。

3.3 射波刀与粒子治疗的比较

Huang等^[55]对比碳离子放疗与射波刀,两者在治疗局限性前列腺癌时展现出互补的剂量学优势:碳离子放疗均匀性指数更优、靶区覆盖率高,膀胱直肠平均剂量更低;而射波刀适形度指数更优、靶区内高剂量区域更显著,膀胱直肠最大剂量更低。因此,射波刀更适合需要高精度适形和局部剂量提升的病例。表2是射波刀与其他治疗方法的对比。

表2 射波刀与其他治疗方法的对比

Table 2 Comparison of CyberKnife with other treatment modalities

对比类别	具体技术/方法	射波刀的主要特点与优势	与其他方法相比的考量
与其他外照射放疗	VMAT/IMRT/螺旋断层放疗	优势:(1)适形度最佳,剂量分布最匹配靶区形状,适合复杂病例;(2)直肠保护优,高剂量照射体积小,急性泌尿毒性更低;(3)可实现精准剂量聚焦与非等中心照射。 特点:急性期IPSS评分更低,患者生活质量更优。	(1)靶区内剂量均匀性较差;(2)治疗时间更长;(3)特定研究中,高剂量区的膀胱体积可能大于其他技术。
	VMAT-FFF(无均整模式)	优势:靶区内剂量峰值更高,适合需要高剂量聚焦的病例。	VMAT-FFF在膀胱和肠道的低剂量区保护方面表现更优。
与近距离放疗/手术	低剂量率近距离放疗/根治性手术	优势:(1)非侵入性,避免手术创伤和尿失禁风险;(2)生化控制率与近距离放疗相近;(3)功能保护好,尤其对术前已有排尿症状者,能更好地维持排尿功能。	射波刀在控制早期泌尿毒性方面有优势,而近距离放疗后可能出现多项排尿参数下降。
与粒子治疗	碳离子放疗	优势:(1)适形度指数更优;(2)靶区内高剂量区域更显著,适合需要局部剂量提升的病例;(3)膀胱和直肠的最大点剂量更低。	碳离子放疗因布拉格峰特性,其靶区覆盖率、均匀性指数更优,且膀胱、直肠等危及器官的平均剂量更低。两者具有互补性。

4 总结与未来展望

射波刀凭借卓越的影像引导、动态跟踪与剂量塑形能力,已成为前列腺癌安全、有效且便利的放疗选择,其适用范围涵盖局限性、复发性和寡转移性前列腺癌,标准方案常采用36.25 Gy/5次的大分割模式,也可采用35 Gy/5次或18~21 Gy/3次推量方案。靶区定义中,CTV包括前列腺及部分精囊(中高危患者),PTV通常外扩3~5 mm,直肠侧仅外扩1~3 mm以保护危及器官(直肠、膀胱、尿道等),通过严格的剂量体积限制来控制毒性风险。临床数据显示,低中危患者3年无生化复发生存率>90%,高危患者约70%~88%,5年总生存率达88%~95%,毒性可控,1~2级急性泌尿毒性发生率20%~50%,胃肠道反应<10%,晚期严重毒性罕见,5次疗程患者耐受性好,尤其适

合老年或合并症群体。射波刀优势:(1)与VMAT相比:急性泌尿毒性更低、生活质量更优、适形性更佳、直肠保护突出;(2)与近距离放疗相比:非侵入性选择、排尿功能保护更优;(3)与手术相比:避免创伤和尿失禁风险;(4)与碳离子治疗相比:靶区适形性和局部剂量提升更优。射波刀不足:(1)与VMAT相比:剂量均匀性稍差、膀胱高剂量体积较大、治疗时间较长;(2)与碳离子治疗相比:后者在危及器官平均剂量控制上占优。

新一代射波刀在剂量塑形和追踪精度上的提升有望进一步优化治疗表现,在放疗计划自动化优化这一关键领域,深度强化学习等人工智能技术已在前列腺癌放疗计划自动化优化中展现潜力,未来可通过构建专业评估器、并行化训练等方式提高效率

率^[56-58]。射波刀与其他影像学平台的联合应用也在探索中,后续研究应关注新一代设备的剂量学与临床疗效提升,积累长期随访数据以评估远期疗效和晚期毒性,并探索射波刀联合其他治疗模式以进一步提高中高危患者疗效^[59-62]。

【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] 陈赞, 赵改书, 李成, 等. 前列腺癌主要治疗方法及不良反应的比较[J]. 中国老年保健医学, 2019, 17(3): 99-100.
Chen Y, Zhao GS, Li C, et al. Comparison of main treatment methods and adverse reactions for prostate cancer[J]. Chinese Journal of Geriatric Care, 2019, 17(3): 99-100.
- [3] Yekedüz E, Utkan G, Kanesvaran R, et al. Expanding armamentarium in advanced prostate cancer management: are all novel antiandrogens the same?[J]. Prostate Int, 2021, 9(1): 1-5.
- [4] Murgić J, Fröbe A, Kiang Chua ML. Recent advances in radiotherapy modalities for prostate cancer[J]. Acta Clin Croat, 2022, 61(S3): 57-64.
- [5] 郭召. 立体定向放射治疗设备的技术现状及发展趋势[J]. 中国医疗设备, 2024, 39(9): 144-149.
Guo Z. Technical status and development trend of stereotactic radiotherapy equipment[J]. China Medical Devices, 2024, 39(9): 144-149.
- [6] Nguyen P, Harzée L, Retif P, et al. Prospective validation of stringent dose constraints for prostatic stereotactic radiation monotherapy: results of a single-arm phase II toxicity-oriented trial[J]. Strahlenther Onkol, 2021, 197(11): 1001-1009.
- [7] Aghdam N, Pepin A, Carrasquilla M, et al. Self-reported burden in elderly patients with localized prostate cancer treated with stereotactic body radiation therapy (SBRT)[J]. Front Oncol, 2020, 9: 1528.
- [8] Vuolukka K, Auvinen P, Tlainen E, et al. Stereotactic body radiotherapy for localized prostate cancer-5-year efficacy results[J]. Radiat Oncol, 2020, 15(1): 173.
- [9] Kim HJ. Clinical outcome of stereotactic body radiotherapy for localized prostate cancer: long-term results[J]. Int J Radiat Res, 2020, 18: 383-388.
- [10] 叶淑华, 林伟, 石鑫, 等. M6型射波刀的基本原理与平板探测器故障维修一例[J]. 医疗装备, 2023, 36(9): 85-87.
Ye SH, Lin W, Shi X, et al. Basic principles of the CyberKnife M6 and a case study of flat-panel detector failure maintenance[J]. Medical Equipment, 2023, 36(9): 85-87.
- [11] 麻亚茹. 膀胱和肠道准备对前列腺癌放疗精准实施和受照剂量的影响[D]. 广州: 南方医科大学, 2025.
Ma YR. Influence of bladder and bowel preparation on the precise delivery and radiation dose in prostate cancer radiotherapy [D]. Guangzhou: Southern Medical University, 2025.
- [12] Kon M, Okamoto H, Nakamura S, et al. Planning study: prone *versus* supine position for stereotactic body radiotherapy in prostate by CyberKnife[J]. J Radiat Res, 2023, 64(1): 186-194.
- [13] 胡立宏, 程瑞, 张倩, 等. 射波刀技术现状与发展及其临床应用[J]. 医疗卫生装备, 2015, 36(3): 110-112.
Hu LH, Cheng R, Zhang Q, et al. Present situation, development and clinical application of CyberKnife [J]. Chinese Medical Equipment Journal, 2015, 36(3): 110-112.
- [14] Manabe Y, Hashimoto S, Mukouyama H, et al. Stereotactic body radiotherapy using a hydrogel spacer for localized prostate cancer: a dosimetric comparison between tomotherapy with the newly-developed tumor-tracking system and CyberKnife[J]. J Appl Clin Med Phys, 2021, 22(10): 66-72.
- [15] Borzillo V, Scipilliti E, Pezzulla D, et al. Stereotactic body radiotherapy with CyberKnife® System for low-and intermediate-risk prostate cancer: clinical outcomes and toxicities of CyPro Trial[J]. Front Oncol, 2023, 13: 1270498.
- [16] Krug D, Imhoff D, Haidenberger A, et al. Robotic stereotactic body radiotherapy for localized prostate cancer: final analysis of the German HYPOSTAT trial[J]. Strahlenther Onkol, 2023, 199(6): 565-573.
- [17] Yasar B, Suh YE, Chapman E, et al. Simultaneous focal boost with stereotactic radiation therapy for localized intermediate- to high-risk prostate cancer: primary outcomes of the SPARC phase 2 trial[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2024, 120(1): 49-58.
- [18] Nicholls L, Suh YE, Chapman E, et al. Stereotactic radiotherapy with focal boost for intermediate and high-risk prostate cancer: initial results of the SPARC trial[J]. Clin Transl Radiat Oncol, 2020, 25: 88-93.
- [19] 中华医学会放射肿瘤治疗学分会, 中国核学会近距离与智慧放疗分会, 上海医学会肿瘤放射治疗分会, 等. 射波刀治疗前列腺癌专家共识[J]. 中华转移性肿瘤杂志, 2025, 8(2): 150-157.
Chinese Society for Therapeutic Radiation Oncology, Brachytherapy and Intelligent Radiosurgery Division of Chinese Nuclear Society, Tumor Radiotherapy Branch of Shanghai Medical Association, et al. Expert consensus on the treatment of prostate cancer by CyberKnife [J]. Chinese Journal of Metastatic Cancer, 2025, 8(2): 150-157.
- [20] Milecki P, Adamska A, Rucinska A, et al. Large prostate volume does not negatively impact health-related quality of life in patients with prostate cancer treated with ultrahypofractionated stereotactic body radiotherapy[J]. J Pers Med, 2023, 13(2): 233.
- [21] Nakamura R, Hirata T, Suzuki O, et al. Stereotactic body radiotherapy using CyberKnife® for localized low-and intermediate-risk prostate cancer: initial report on a phase I/II trial[J]. Anticancer Res, 2020, 40(4): 2053-2057.
- [22] Miszczyk M, Rembak-szynkiewicz J, Magrowski Ł, et al. The prognostic value of PI-RADS score in CyberKnife ultrahypofractionated radiotherapy for localized prostate cancer [J]. Cancers (Basel), 2022, 14(7): 1613.
- [23] Ratnakumar R, Brand DH, Sasitharan A, et al. Exploring factors associated with late urinary toxicity after prostate stereotactic body radiotherapy: findings from the PACE-B study[J]. Eur Urol, 2026, 89(1): 71-79.
- [24] Pasquier D, Peiffert D, Nickers P, et al. A multicenter phase 2 study of hypofractionated stereostatic boost in intermediate risk prostate carcinoma: a 5-year analysis of the CKNO-PRO trial[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2020, 106(1): 116-123.
- [25] Pasquier D, Nickers P, Peiffert D, et al. A multicenter phase 2 study of ultrahypofractionated stereotactic boost after external beam radiotherapy in intermediate-risk prostate carcinoma: a very long-term analysis of the CKNO-PRO trial[J]. Eur Urol Open Sci, 2023, 54: 80-87.
- [26] Schröder C, Mose L, Mathier E, et al. Five fractions *versus* seven fractions SBRT for intermediate- and high-risk prostate cancer: a propensity score matched pair analysis[J]. Cancers (Basel), 2023, 15(24): 5815.
- [27] Zhao XZ, Ye YS, Yu HY, et al. Five-year outcomes of stereotactic body radiation therapy (SBRT) for prostate cancer: the largest experience in China[J]. J Cancer Res Clin Oncol, 2021, 147(12): 3557-3564.
- [28] Kim HJ. Long-term outcome of whole pelvis radiotherapy and stereotactic body radiotherapy boost for intermediate and high risk prostate cancer[J]. Int J Radiat Res, 2022, 20: 37-41.
- [29] Shah S, Pepin A, Forsthoefel M, et al. Testosterone as a biomarker for quality of life (QOL) following androgen deprivation therapy (ADT) and stereotactic body radiotherapy (SBRT)[J]. Cureus, 2023, 15(8): e44440.
- [30] Kim YJ, Ahn H, Kim CS, et al. Phase I/IIa trial of androgen deprivation therapy, external beam radiotherapy, and stereotactic body radiotherapy boost for high-risk prostate cancer (ADEBAR)[J]. Radiat Oncol, 2020, 15(1): 234.
- [31] Van Dams R, Jiang NY, Fuller DB, et al. Stereotactic body radiotherapy for High-Risk localized carcinoma of the prostate (SHARP) consortium: analysis of 344 prospectively treated patients[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2021, 110(3): 731-737.
- [32] Francolini G, Carnevale MG, Di cataldo V, et al. Stereotactic reirradiation with Cyberknife® for locally recurrent prostate cancer, long-term toxicity and clinical outcomes from a monocentric cohort [J]. Radiol Med, 2023, 128(12): 1580-1588.
- [33] Allali S, Loap P, Bibault JE, et al. Salvage stereotactic reirradiation for intraprostatic cancer recurrence: a large retrospective study [J]. Prostate, 2023, 83(8): 743-750.
- [34] Koh MJ, Pilkington P, Koh MJ, et al. Safety and early efficacy of involved-field SBRT for nodal oligo-recurrent prostate cancer [J]. Front Oncol, 2024, 14: 1434504.

- [35] Majewski W, Miszczyk M, Graupner D, et al. Stereotactic body radiotherapy (SBRT) re-irradiation for local failures following radical prostatectomy and post-operative radiotherapy[J]. *Strahlenther Onkol*, 2024, 200(3): 230-238.
- [36] Francolini G, Loi M, Di Cataldo V, et al. Stereotactic re-irradiation in recurrent prostate cancer after previous postoperative or definitive radiotherapy: long-term results after a median follow-up of 4 years[J]. *Clin Oncol (R Coll Radiol)*, 2022, 34(1): 50-56.
- [37] Kearney T, Nagel L, Bourne M, et al. Timing and patterns of potentially salvageable recurrences following stereotactic body radiation therapy for clinically localized prostate cancer assessed by preferential amino acid uptake[J]. *Cureus*, 2025, 17(1): e77964.
- [38] Xu CY, Zhao XZ, Ju XP, et al. Short-term outcomes and clinical efficacy of stereotactic body radiation therapy (SBRT) for oligometastases of prostate cancer in China[J]. *Front Oncol*, 2022, 12: 879310.
- [39] 沈泽天, 周含, 季晓芹, 等. 射波刀立体定向放射治疗在前列腺癌肝转移中的应用[J]. *中华男科学杂志*, 2019, 25(4): 333-339.
Shen ZT, Zhou H, Ji XQ, et al. CyberKnife stereotactic body radiotherapy for liver metastases from prostate cancer[J]. *National Journal of Andrology*, 2019, 25(4): 333-339.
- [40] 傅华, 田种泽, 李莎, 等. 射波刀治疗前列腺癌合并骨转移疗效分析[J]. *局解手术学杂志*, 2018, 27(11): 843-845.
Fu H, Tian ZZ, Li S, et al. CyberKnife for treatment of bone metastases from prostate cancer[J]. *Journal of Regional Anatomy and Operative Surgery*, 2018, 27(11): 843-845.
- [41] Van Werkhoven LA, Milder MT, Hoogeman MS, et al. Results of a single-arm phase 2 clinical trial: online adaptive stereotactic body radiation therapy for abdominal-pelvic oligometastases[J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2025, 122(3): 729-738.
- [42] Gaudian K, Koh MJ, Koh MJ, et al. Late radiation-related lymphopenia after prostate stereotactic body radiation therapy plus or minus supplemental pelvic irradiation[J]. *Front Oncol*, 2024, 14: 1459732.
- [43] Galienne M, Risbourg S, Lacommerie T, et al. Extreme hypofractionated stereotactic radiotherapy for localized prostate cancer: efficacy and late urinary toxicity according to transurethral resection of the prostate history[J]. *Clin Transl Radiat Oncol*, 2024, 46: 100779.
- [44] Shah S, Sholklapper T, Creswell M, et al. Bothersome hematospermia following stereotactic body radiation therapy for prostate cancer[J]. *Front Oncol*, 2021, 11: 765171.
- [45] Sholklapper T, Creswell M, Cantalino J, et al. Ejaculatory function following stereotactic body radiation therapy for prostate cancer[J]. *J Sex Med*, 2022, 19(5): 771-780.
- [46] Ito M, Takahashi H, Suzuki J, et al. Intravesical prostatic protrusion as a predictor of acute urinary retention following stereotactic body radiation therapy for localised prostate cancer: a retrospective study[J]. *Oncologie*, 2025, 27(6): 909-917.
- [47] Ito M, Yoshioka Y, Takase Y, et al. Stereotactic body radiation therapy for prostate cancer: a study comparing 3-year genitourinary toxicity between CyberKnife and volumetric-modulated arc therapy by propensity score analysis[J]. *Radiat Oncol*, 2023, 18(1): 39.
- [48] Serra M, De Martino F, Savino F, et al. SBRT for localized prostate cancer: CyberKnife vs. VMAT-FFF, a dosimetric study [J]. *Life (Basel)*, 2022, 12(5): 711.
- [49] Borowicz DM, Skrobała A, Kruszyna-Mochalska M, et al. Does CyberKnife improve dose distribution versus IMRT and VMAT on a linear accelerator in low-risk prostate cancer?[J]. *Radiol Oncol*, 2022, 56(2): 259-266.
- [50] Ratnakumar R, Sasitharan A, Khan A, et al. Dosimetric comparison of CyberKnife and conventional linac prostate stereotactic body radiation therapy plans: analysis of the PACE-B study[J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2026, 125(1): 250-256.
- [51] Gagliardo G, Serra M, Ametrano G, et al. Evaluating dosimetric outcomes: a comparison of CyberKnife, VMAT FFF, and Helical tomotherapy radixact for treating localized prostate cancer[J]. *Radiol Med*, 2025, 130(10): 1680-1692.
- [52] Serra M, Ametrano G, Borzillo V, et al. Dosimetric comparison among CyberKnife, helical tomotherapy and VMAT for hypofractionated treatment in localized prostate cancer[J]. *Medicine (Baltimore)*, 2020, 99(50): e23574.
- [53] Nahaji I, Fröhlich G, Mavrogenis S, et al. Early effects of different irradiation techniques used in the treatment of prostate cancer on urination[J]. *Orv Hetil*, 2021, 162(33): 1328-1334.
- [54] Aghdam N, Pepin A, Buchberger D, et al. Stereotactic body radiation therapy (SBRT) for prostate cancer in men with a high baseline international prostate symptom score (IPSS \geq 15)[J]. *Front Oncol*, 2020, 10: 1060.
- [55] Huang HF, Gao XX, Li Q, et al. Dosimetric comparison between stereotactic body radiotherapy and carbon-ion radiation therapy for prostate cancer[J]. *Quant Imaging Med Surg*, 2023, 13(10): 6965-6978.
- [56] Li C, Guo Y, Lin X, et al. Deep reinforcement learning in radiation therapy planning optimization: a comprehensive review[J]. *Phys Med*, 2024, 125: 104498.
- [57] Yoganathan SA, Riyas M, Sukumaran R, et al. Ultra-hypofractionated prostate radiotherapy with online adaptive technique: a case report[J]. *Cureus*, 2024, 16(7): e64101.
- [58] Schipaanboord BW, Giżyńska MK, Rossi L, et al. Fully automated treatment planning for MLC-based robotic radiotherapy[J]. *Med Phys*, 2021, 48(8): 4139-4147.
- [59] Annagiri S, Hori YS, Persad AR, et al. Global growth and distribution of CyberKnife stereotactic radiosurgery: a bibliometric analysis[J]. *Neurosurg Pract*, 2025, 6(3): e000150.
- [60] Scholey J, Nano T, Singhrao K, et al. Linac- and CyberKnife-based MRI-only treatment planning of prostate SBRT using an optimized synthetic CT calibration curve[J]. *J Appl Clin Med Phys*, 2024, 25(9): e14411.
- [61] Francolini G, Bertini N, Di cataldo V, et al. Impact of stereotactic body radiotherapy after progression in castrate resistant prostate cancer patients undergoing first line abiraterone treatment. A subgroup analysis from ARTO trial (NCT03449719) [J]. *Prostate Cancer Prostatic Dis*, 2025, 28(4): 908-912.
- [62] Brand VJ, Milder MT, Christianen ME, et al. First-in-men online adaptive robotic stereotactic body radiation therapy: toward ultrahypofractionation for high-risk prostate cancer patients[J]. *Adv Radiat Oncol*, 2025, 10(2): 101701.

(编辑:陈丽霞)