

DOI: 10.3969/j.issn.1005-8982.2019.08.007
文章编号: 1005-8982 (2019) 08-0036-05

综述

X-sight 椎体追踪技术在射波刀中的应用

王境生, 袁智勇, 董洋, 陈华明, 于旭耀, 李丰彤, 宋勇春

[天津医科大学肿瘤医院(国家肿瘤临床医学研究中心)放疗科, 天津 300060]

摘要: 射波刀立体定向放疗能使肿瘤靶区得到最大的照射剂量, 而对周围正常组织损伤较少, 具有高精度、大剂量、分割次数少及无创伤等优点。X-sight 追踪作为颈部肿瘤和椎体转移瘤、胸部肿瘤、腹部肿瘤及盆腔肿瘤的治疗方法得到广泛应用, 其安全性和精准性非常高。

关键词: 肿瘤, 继发原发性; 立体定向放射治疗/放射疗法; 设备安全性

中图分类号: R445.4

文献标识码: A

Application of X-sight vertebral tracking technology in cyberknife

Jing-sheng Wang, Zhi-yong Yuan, Yang Dong, Hua-ming Chen, Xu-yao Yu,
Feng-tong Li, Yong-chun Song

[Department of Radiotherapy, Tianjin Medical University Cancer Institute and Hospital (National Clinical Research Centre for Cancer), Tianjin 300060, China]

Abstract: Cyberknife stereotactic radiotherapy can maximize the radiation dose to the tumor target area with little damage to the surrounding normal tissues. It has the advantages including high precision, high dose, less segmentation times and no trauma. X-sights are widely used in treatment of cervical and vertebral metastases, chest tumors, abdominal tumors and pelvic tumors with high safety and accuracy.

Keywords: neoplasms, second primary; stereotactic radiotherapy/radiotherapy; equipment safety

射波刀系统主要由 LINAC 加速器系统 (6MV 的 X 射线)、影像系统、机械臂系统 (6 个机械臂关节、1200 束射线方向)、同步呼吸追踪系统、治疗床、介面控制器及调制器控制器等组成^[1-3]。射波刀实时影像追踪方式根据追踪部位的不同, 可分为 6D-skull (颅骨) 追踪、X-sight (椎体) 追踪、金标 fiducial (标志点) 追踪、Synchrony 同步呼吸追踪及 X-sight lung (肺) 追踪五种方式^[4-6]。射波刀立体定向放疗给肿瘤部位准确、均匀的剂量, 周围正常组织剂量很小, 因此可在正常组织损伤很小的情况下根治恶性肿瘤, 达到提高患者生活质量, 延长生存期的目的^[7-8]。

1 射波刀 X-sight 追踪方法的原理

脊柱椎体包括颈椎 (C₁ ~ C₇)、胸椎 (T₁ ~ T₁₂)、

腰椎 (L₁ ~ L₅)、骶骨及尾骨。X-sight 追踪方式主要用于追踪脊柱椎体及周围的肿瘤。射波刀 X-sight 追踪方式采用对比实时曝光产生的图像和数字重建影像, 生成 9 个 × 9 个图像共 81 个矩阵骨质密度变化的方式产生患者六维方向上需校准的数值。通过机械臂校准这些数值, 实现射波刀 X-sight 追踪方式中总误差 ≤ 0.95 mm^[9-10]。X-sight 追踪方式因为无需植入金标、无创伤, 被全球各地的射波刀中心广泛采用。见图 1。

2 射波刀 X-sight 追踪方法的安全性和精准性

徐慧军等^[11]利用 CT 分别扫描装有胶片的头颈部、肺部和仿真人模体, 将影像数据传输至 Multi Plan

收稿日期: 2018-10-26

[通信作者] 袁智勇, E-mail: zhiyong0524@163.com; Tel: 18622221199

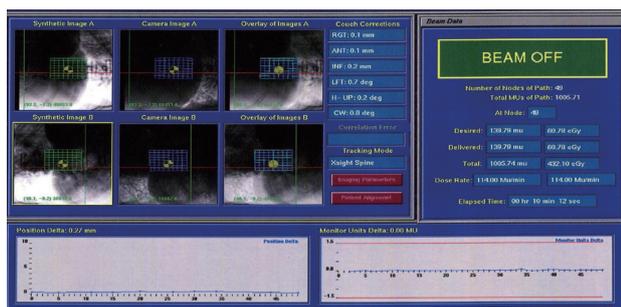


图 1 X-sight 追踪方法在射波刀的治疗中的应用

治疗计划系统中。设计颈椎、胸椎、腰椎、尾椎及股骨追踪的模体等中心计划, 70% 剂量曲线给 420 cGy。模体置于治疗床上, 使用 X-sight 追踪方式, 执行模体计划。扫描照射后的胶片, 利用端到端测试软件分析照射精度, 结果显示颈椎追踪的精度为 0.54 和 0.68 mm, 胸椎为 0.50 和 0.65 mm, 腰椎、骶椎、髌骨及股骨分别为 0.70、1.99、2.21 和 2.05 mm。对于 3 种静态模体, 颈椎、胸椎及腰椎的追踪精度均达到亚毫米, 骶椎、髌骨及股骨精度为 (2.00 ± 0.21) mm, 射波刀 X-sight 追踪脊柱的精度非常高, 提供准确的图像引导定位, 且及时在线发现和纠正患者治疗体位移动, 实现立体定向放疗领域内提倡高精度、大剂量、分割次数少及无创伤等优点。

3 射波刀 X-sight 追踪方法在全身肿瘤治疗中的应用

在颈部肿瘤和椎体转移瘤的临床应用: 脊柱转移是恶性肿瘤骨转移的常见部位, 脊柱转移患者常常伴有背部疼痛及感觉、运动障碍, 其是恶性肿瘤患者生活质量下降的主要因素之一。椎体转移瘤立体定向放射治疗可给予靶区适形的高剂量; 同时形成陡峭的剂量梯度, 有利于保护周围正常组织, 特别是脊髓。与常规放射治疗相比较, 立体定向放射治疗提高肿瘤局部控制率并有利于缓解症状, 成为椎体转移瘤术后辅助治疗及根治性治疗新的治疗模式。文献表明基于放射生物、物理及临床方面的相关研究, 多分次立体定向放射治疗在临床中具有一定的优势。张余飞等^[12]观察 25 例先前照射过的复发头颈部鳞癌患者接受射波刀治疗, 体部立体定向放疗 (stereotactic body radiation therapy, SBRT) 的处方剂量是 25 ~ 36 Gy/5 ~ 6 f, 评估 SBRT 治疗先前接受过放射治疗的复发头颈部鳞癌患者的有效性与安全性。评价指标包括肿瘤缓解率、局部控制率、无进展生存期、

生存质量改善率、急性及晚期毒性反应。射波刀治疗 3 个月后近期有效率 [完全缓解 (complete response, CR) + 部分缓解 (partial response, PR)] 为 68%, 中位无病生存期为 10.3 个月, 1 年生存率为 48%; 治疗过程中及治疗后无 4、5 级不良反应发生。对于先前接受过放射治疗的复发头颈部鳞癌患者, 射波刀治疗复发头颈部肿瘤近期疗效明确, 且不良反应较轻。刘志冰等^[13]对 2009 年 3 月 1 日—2011 年 12 月 24 日行射波刀立体定向放射外科治疗脊柱转移瘤患者发现, 治疗肿瘤病灶 38 处。其中颈椎 4 处, 胸椎 21 处, 腰椎 9 处, 骶椎 4 处, 有放疗史患者 9 例。比较治疗前后的疼痛缓解等情况, 定期随访疗效及毒副作用。在随访 12.5 个月 (1 ~ 25 个月) 后, 生存 18 例, 90% 患者疼痛治疗有效, 随访期间内未见放射性脊髓病的发生。射波刀立体定向放射外科治疗脊柱转移瘤安全有效。

3.1 早期肺癌和纵隔淋巴结转移瘤

X-sight 追踪方法在治疗早期中央型肺癌、老年早期肺癌患者、恶性肿瘤纵隔淋巴结转移患者都有广泛的应用。根据肿瘤位置及分期不同, 给予不同的剂量分割模式, 射波刀立体定向放疗可较好的应用于早期中央型肺癌的治疗。王宝虎等^[14]回顾性分析天津市肿瘤医院射波刀中心 2006 年 11 月—2010 年 12 月 17 例分期为 $T_1/T_2N_0M_0$ 的中央型非小细胞肺癌患者, 其中 6 例患者采用 X-sight 追踪方法, 11 例患者采用呼吸同步金标追踪技术。根据肿瘤位置及分期, 给予不同的分割剂量, 中位处方剂量 56 Gy (48 ~ 60 Gy), 中位分割次数 5 次 (3 ~ 10 次), 中位治疗体积 46.2 ml (13.8 ~ 92.2 ml)。治疗后 3 个月疗效评价: 9 例病变完全缓解, 7 例部分缓解, 1 例稳定, 治疗反应率 94.1%; 中位随访期 19.5 个月 (4 ~ 64 个月), 中位生存时间 43 个月, 1 和 2 年的局控率、无进展生存及总生存分别为 100%、87.5%、80.8%, 以及 67.3%、82.4%、68.4%。随访期内未见呼吸困难、疲劳、肺不张等不良反应, 其中 3 级不良反应 1 例, 未见 4 ~ 5 级不良反应。宋勇春等^[15]回顾性分析天津医科大学附属肿瘤医院放疗科 2006 年 11 月—2010 年 9 月 34 例不能手术的老年早期肺癌患者 ($T_1N_0M_0$ 20 例, $T_2N_0M_0$ 14 例), 中位年龄 78 岁 (70 ~ 88 岁)。16 例患者采用 X-Sight 椎体追踪技术, 18 例患者采用肿瘤内植入 1、2 枚金标的呼吸同步追踪技术。处方剂量

45 ~ 60 Gy, 中位剂量 60 Gy, 分 3 ~ 6 次给予。结果: 25 例病变 CR (73.5%), 9 例 PR (26.5%)。中位随访期 29 个月 (11 ~ 59 个月), 原发肿瘤局部控制率为 97.1%, 1、2、3 年无进展生存率分别为 85.3%、81.6% 和 70.0%, 总生存率分别为 97.1%、86.6% 和 80.0%。31 例患者 (91.1%) 出现治疗后的轻度乏力, 15 例患者 (44.1%) 发生 I、II 级放射性肺炎, 未发现 \geq III 级的不良反应。1 例患者 (2.9%) 在经胸腔穿刺植入金标后发生严重气胸, 经胸腔闭式引流后缓解。射波刀立体定向放射治疗技术疗效确切、不良反应轻, 其是无法手术的老年早期肺癌患者的较好选择。WANG 等^[16] 评估在 2006 年 10 月—2015 年 5 月在天津市肿瘤医院射波刀中心接受射波刀 X-sight 追踪方法治疗的 85 例纵隔淋巴结转移患者。主要观察是纵隔淋巴结的肿瘤局部控制率 (tumor control probability, TCP)。次要观察是症状缓解时间, SBRT 后总体存活期 (overall survival, OS) 和常见不良反应事件评价标准 (cancer institute common terminology criteria for adverse events v4.0, CTCAE v4.0) 的毒性副反应。1 年和 5 年的局部控制率分别为 97% 和 77%。在 53 例有症状患者中, 症状缓解 47 例 (89%), 中位数为 5 d (3 ~ 30 d)。所有患者中位 OS 为 27.2 个月。单因素和多因素分析显示, 原发肿瘤与射波刀的较短诊断间隔以及较大的纵隔淋巴结体积与 OS 相关。CTCAE v4.0 \geq 3 级毒副反应 6 例 (7%), 5 级毒副反应 3 例 (均具有纵隔淋巴结 7 站放疗史)。SBRT 是一种安全有效的治疗方式, 适用于来自不同肿瘤的纵隔淋巴结转移的患者, 但接受纵隔淋巴结第 7 站放疗的患者除外。王娟等^[17] 分析射波刀治疗 39 例恶性肿瘤纵隔淋巴结转移患者的临床资料, 其中 31 例患者采用 X-sight 追踪方法, 8 例患者采用呼吸同步追踪技术。病灶共计 49 个, 直径 1.5 ~ 4.3 cm。治疗剂量 12 ~ 60 Gy, 分割 1 ~ 10 次。治疗后随访 3 ~ 67 个月 (中位数 20 个月), 胸闷、气短等症状缓解率 83.3%。49 个病灶 CR、PR、疾病稳定分别为 29、15 和 5 个, 有效率为 90%。1、2 年局控率为 100% 和 91%, 1、2 年生存率分别为 84.6% 和 68.3%。急性期无反应者 25 例, 1、2 级和 3、4 级放疗反应分别为 11 和 3 例。既往行胸部放疗、隆突下及食管食管沟病灶、放疗前后 1 个月行化疗者放疗不良反应发生率较高 ($P < 0.05$), 反应组食管 5 ml 平均照射剂量 30.62 Gy 高于无反应组 15.5 Gy。射波刀为纵隔淋巴结转移者提供安全有效的

治疗手段。

3.2 腹部肿瘤

X-sight 追踪方法在治疗治疗腹膜后肿瘤、肾上腺转移癌、局部晚期无进展期胰腺癌及肝门区肝癌的都有广泛的应用。射波刀是腹膜后肿瘤安全有效的局部治疗手段之一。庄洪卿等^[18] 对 28 例腹膜后肿瘤患者行射波刀治疗, 70% ~ 84% (中位数 78%) 等剂量线覆盖计划靶体积, 照射剂量 2 000 ~ 6 000 cGy (中位数 4 500 cGy), 生物等效剂量 3 750 ~ 10 080 cGy (中位 7 680 cGy, $\alpha/\beta=10$), 分割次数 2 ~ 10 次 (中位数 5 次)。3 例患者为调强或适形放疗加量, 1 例为再程放疗, 其余为单纯射波刀治疗。27 例患者采用 X-sight 追踪方法, 1 例患者采用呼吸同步追踪技术。KaplanMeier 法计算生存率并进行 Log-rank 检验。CR、PR、稳定和进展率分别为 43%、36%、18% 和 4%, 有效率为 96%。随访时间满 1、2、3 年者分别为 17、9 和 7 例。1、2、3 年局部控制率分别为 92%、86% 和 86%, 总生存率分别为 60%、49% 和 49%。局部无进展生存和总生存相似 (中位 9.5 和 12.0 个月)。腹膜后单发病灶且疗效评价缓解者局部无进展生存与全身无进展生存期也相似 (中位 17 和 11 个月) \geq 2 级急性反应中乏力、厌食、恶心、呕吐和肠炎分别为 9、9、7、2 和 2 例, 远期反应仅 1 例出现 1 级肠狭窄。陆军等^[19] 对 2012 年 11 月—2017 年 6 月 96 例射波刀治疗的晚期胰腺癌患者, 采用 PET/CT 或增强 CT 定位, X-sight 脊柱追踪照射, 有梗阻性黄疸患者先行胆汁引流, 缓解胆道梗阻有效后再行射波刀治疗。利用统计软件 SPSS 13.0 采用 Cox Regression 分析性别、年龄、KPS 卡氏评分、肿瘤分期、糖类抗原 CA199、放疗剂量、是否化疗及合并其他治疗等因素对生存期的影响; 采用 Kaplan-Meier 法进行生存率分析, 并对远期并发症情况进行分析。结果显示, 87.5% 的患者症状改善, 平均生存时间为 10.5 个月、中位生存时间为 8 个月。肿瘤分期、糖类抗原 CA199 阳性是影响患者生存的主要因素。性别、年龄、KPS 评分、放疗剂量、是否化疗及合并其他治疗等因素无差异。射波刀是晚期胰腺癌有效的姑息治疗手段, 可缓解局部症状, 但对患者的生存期延长有限, 远期并发症可危及生命。赵宪芝等^[20] 分析 2006 ~ 2013 年 42 例射波刀治疗肾上腺转移癌患者, 以治疗后 1 个月复查观察近期疗效。采用世界卫生组织实体肿瘤的疗效评价标准 RECIST 1.1 标准进行评价, 采用后期放射损伤分级

标准 RTOG 或 EORTC 评价不良反应, 采用 Kaplan-Meier 法计算局部控制率 TCP、生存率 OS 和无进展生存率 (progression free survival, PFS)。20 例患者采用 X-sight 追踪方法, 22 例患者采用呼吸同步追踪技术。结果 42 例 47 个靶点纳入研究, 其中 14 个病灶达 CR, 13 个病灶达 PR, 总有效率为 57%。1、2 年样本数分别为 25 和 19 个靶点, 1 和 2 年 TCP、OS、PFS 率分别为 87% 和 60%、53%, 以及 41%、17%、8%。肿瘤靶区 $<2.5 \text{ cm}^3$ 、生物有效剂量 $>80 \text{ Gy}$ 、年龄 >60 岁均有助于提高局部 PFS 期。治疗后乏力、纳差、恶心、呕吐等胃肠道反应和骨髓抑制主要为 1、2 级反应, 只有 1 例出现 3 级胃肠道反应。SBRT 技术治疗肾上腺转移癌不良反应轻且局部控制效果好。邱鸣寒等^[21]分析 36 例 2009 ~ 2015 年天津医科大学肿瘤医院收治的接受射波刀 SBRT 的肝门区肝癌患者, 其中 16 例患者 (16 个病灶) 采用椎体追踪技术, 20 例患者 (21 个病灶) 采用金标呼吸同步追踪技术。36 例患者 (37 个病灶) 的肿瘤直径为 15 ~ 55 mm (中位数 30 mm), 通过增强 CT 和 / 或 MRI 评价肿瘤进展, Kaplan-Meier 法计算 TCP、OS 并 Logrank 检验和单因素分析。中位随访时间为 12.7 个月, 术后 1、2 年 TCP 率分别为 90% 和 76%, 术后 1 年 OS、PFS 分别为 63% 和 39%, 中位 OS、PFS 时间分别为 15.2 和 10.0 个月。3 级不良反应为 11%。

3.3 盆腔肿瘤

射波刀 X-sight 追踪方法是髂血管旁淋巴结转移性病变更安全、有效的局部治疗手段之一, 能够诱导症状迅速缓解, 而不良反应极低。WANG 等^[22]分析 2010 年 5 月—2016 年 5 月接受射波刀治疗的 22 例 (27 个靶点) 髂血管旁淋巴结转移性病变更患者肿瘤体积为 $0.88 \sim 125.66 \text{ cm}^3$ (中位数 18.87 cm^3), 处方剂量为 21 ~ 51 Gy (中位数 39 Gy), 分割次数为 3 ~ 8 次 (中位数 5 次), 生物等效剂量为 35.7 ~ 100 Gy (中位数 72.6 Gy), 64% ~ 82% (中位 72%) 等剂量线覆盖计划靶区。其中 18 例采用椎体追踪技术, 3 例患者采用金标呼吸同步追踪技术, 1 例行同步呼吸运动追踪。采用 CT 为基础评价有无进展, Kaplan-Meier 法计算生存率并进行 Log-rank χ^2 检验。随访时间为 8 ~ 97 个月 (中位 33 个月)。CR、PR、稳定、疾病进展率分别为 37%、48%、7.5% 和 7.5%, 有效率为 92.5%。局部无进展生存时间为 4 ~ 68 个月 (中位 21 个月)。1、2、3 年局部控制率均为 90.6%, 总生存

率分别为 78.8%、60.6% 和 43.4%。治疗不良反应主要为恶心、呕吐、乏力等胃肠道反应。射波刀治疗前接受过化疗有助于提高生存。所有伴有腰痛或下肢水肿的患者在治疗后均能使症状得到迅速缓解。

射波刀可给予靶区适形的高剂量, 同时形成陡峭的剂量梯度, 有利于保护周围正常组织, 特别是脊髓^[23-26]。与常规放射治疗相比较, 能提高肿瘤局部控制率并有利于缓解症状, 成为辅助治疗及根治性治疗新的治疗模式^[27-28]。射波刀 X-sight 追踪方法在头颈部肿瘤、胸部肿瘤、腹部肿瘤、盆腔肿瘤都具有广泛应用, 其是安全、有效的局部治疗手段之一。射波刀所具有的图像追踪方法, 特别 X-sight 椎体追踪技术的应用是成为保证射波刀的高精度、大剂量准确照射到肿瘤靶区部位成为关键步骤和关键技术所在^[29-32]。但是也存在肿瘤大小、曝光条件、距离椎体距离、椎体感兴趣区 (region of interest, ROI) 大小、X-sight 追踪方法 CT 中心的选择等方面的差异^[33-35]。ROI 大小和影像对比度系数的改变对脊柱追踪平移误差无影响, 但对脊柱追踪旋转误差有影响。除追踪范围的改变不会影响脊柱追踪的定位误差外, ROI 大小和影像对比度系数的改变均会导致脊柱追踪的定位误差不同程度的变化, 在射波刀治疗中应引起足够重视。另外, 研究都是回顾性分析, 将来可进行前瞻性研究, 进一步完善研究结果。

参 考 文 献

- [1] 胡斌彭, 振军. 射波刀追踪系技术研究进展 [J]. 中国医疗设备, 2017, 32(2): 100-103.
- [2] 关佳恒, 胡立宏, 王顺梁, 等. 射波刀治疗精度的验证与分析 [J]. 医疗装备, 2015, 8(10): 42-43.
- [3] DING C, SAW C B, TIMMERMAN R D, et al. Cyberknife stereotactic radiosurgery and radiation therapy treatment planning system[J]. Med Dosim, 2018, 43(2): 129-140.
- [4] AKINO Y, SUMIDA I, SHIOMI H, et al. Evaluation of the accuracy of the cyberKnife Synchrony™ respiratory tracking system using a plastic scintillator[J]. Med Phys, 2018, 45(8): 3506-3515.
- [5] 王境生, 李丰彤, 董洋, 等. 射波刀 5 种追踪方法的原理 [J]. 医疗卫生装备, 2013, 34(4): 130-132.
- [6] KHADIGE M, SALLERON J, MARCHESE V, et al. Cyberknife stereotactic radiation therapy for stage I lung cancer and pulmonary metastases: evaluation of local control at 24 months[J]. J Thorac Dis, 2018, 10(8): 4976-4984.
- [7] 蔡陈枫, 朱六玲, 徐胜, 等. 射波刀治疗系统的精确度评价 [J]. 医疗卫生装备, 2017, 38(6): 121-123.
- [8] ZHAO X, ZHU X, FEI J, et al. Short-term outcomes and clinical efficacy of stereotactic body radiation therapy (SBRT) in treatment

- of adrenal gland metastases from lung cancer[J]. *Radiation Oncology*, 2018, 13(1): 205-210.
- [9] MANABE Y, MURAI T, OGINO H, et al. CyberKnife stereotactic radiosurgery and hypofractionated stereotactic radiotherapy as first-line treatments for imaging-diagnosed intracranial meningiomas[J]. *Neurol Med Chir*, 2017, 57(12): 627-633.
- [10] MEHTA N, ZAVITSANOS P J, MOLDOVAN K, et al. Local failure and vertebral body fracture risk using multifraction stereotactic body radiation therapy for spine metastases[J]. *Radiat Oncol*, 2018, 3(3): 245-251.
- [11] 徐慧军, 段学章, 朴俊杰, 等. 射波刀脊柱追踪精度检测与评估 [J]. *生物医学工程与临床*, 2016, 5(1): 26-29.
- [12] 张余飞, 温居一, 康静波, 等. SBRT 治疗复发头颈部肿瘤的临床初步应用探讨 [J]. *肿瘤学杂志*, 2016, 22(10): 827-831.
- [13] 刘志冰, 武新虎, 姜万荣, 等. 射波刀治疗脊柱转移瘤临床效果及安全性初步分析 [J]. *医学研究生学报*, 2013, 26(6): 601-604.
- [14] 王宝虎, 袁智勇, 庄洪卿, 等. 立体定向放射治疗早期中央型肺癌的疗效观察 [J]. *中国肿瘤临床*, 2015, 14(2): 100-102.
- [15] 宋勇春, 袁智勇, 李丰彤, 等. 射波刀治疗老年早期肺癌患者的初步临床疗效观察 [J]. *中国肿瘤临床*, 2012, 39(15): 1119-1122.
- [16] WANG H H, ZHAO N G, MENG M B, et al. Stereotactic radiation therapy for oligometastases or oligorecurrence within mediastinal lymph nodes[J]. *Oncotarget*, 2016, 7(14): 18135-18145.
- [17] 王娟, 袁智勇, 刘春雷, 等. Cyberknife 治疗纵隔转移淋巴结的临床分析 [J]. *中国肿瘤临床*, 2013, 5(4): 280-283.
- [18] 庄洪卿, 袁智勇, 王平. 射波刀治疗腹膜后肿瘤疗效观察 [J]. *中华放射肿瘤学杂志*, 2012, 21(5): 452-454.
- [19] 陆军, 张杨, 朱向辉, 等. 射波刀治疗晚期胰腺癌回顾性分析 [J]. *医疗卫生装备*, 2018, 39(10): 57-60.
- [20] 赵宪芝, 庄洪卿, 袁智勇, 等. 42 例肾上腺转移瘤射波刀治疗的临床观察 [J]. *中华放射肿瘤学杂志*, 2015, 24(3): 271-274.
- [21] 邱鸣寒, 孟茂斌, 庄洪卿, 等. 射波刀 SBRT 治疗肝门区肝癌临床疗效观察 [J]. *中华放射肿瘤学杂志*, 2018, 27(2): 177-180.
- [22] WANG Z, WANG J, ZHUANG H, et al. Stereotactic body radiation therapy induces fast tumor control and symptom relief in patients with iliac lymph node metastasis[J]. *Sci Rep*, 2016, 29(6): 379-386.
- [23] 孟玲玲, 邸玉鹏, 蔡博宁, 等. 早期周围型非小细胞肺癌立体定向放疗临床疗效分析 [J]. *解放军医学院学报*, 2016, 37(12): 1223-1227.
- [24] 杨昊, 马林. 多分次立体定向放射治疗在椎体转移瘤治疗中的作用及应用前景 [J]. *中国医学装备*, 2016, 13(5): 151-155.
- [25] CHAN M K, KWONG D L, LEE V W, et al. Feasibility study of robotic hypofractionated lung radiotherapy by individualized internal target volume and X-sight spine tracking: a preliminary dosimetric evaluation[J]. *J Cancer Res Ther*, 2015, 11(1): 150-157.
- [26] NAKAYANA M, NISHINURA H, MAYAHARA H, et al. Clinical log data analysis for assessing the accuracy of the cyberknife fiducial-free lung tumor tracking system[J]. *Pract Radiat Oncol*, 2018, 8(2): 63-70.
- [27] YANG Z Y, CHANG Y, LIU H Y, et al. Target margin design for real-time lung tumor tracking stereotactic body radiation therapy using cyberknife X-sight lung tracking system[J]. *Sci Rep*, 2017, 7(1): 118-126.
- [28] JERECZEK B A, ROJAS D P, ZERINI D, et al. Reirradiation for isolated local recurrence of prostate cancer: mono-institutional series of 64 patients treated with salvage stereotactic body radiotherapy (SBRT)[J]. *Br J Radiol*, 2018, 11(9): 44-48.
- [29] YUAN Z Y, MENG M B, LIU C L, et al. Stereotactic body radiation therapy using the cyberknife[®] system for patients with liver metastases[J]. *Onco Targets Ther*, 2014, 7(11): 915-923.
- [30] 赵瑞, 王震岳, 李莎, 等. 脊柱追踪相关参数对射波刀定位误差影响 [J]. *中华放射肿瘤学杂志*, 2016, 25(5): 504-507.
- [31] HOLMES OE1, GRATTON J, SZANTO J, et al. Reducing errors in prostate tracking with an improved fiducial implantation protocol for CyberKnife based stereotactic body radiotherapy (SBRT)[J]. *J Radiosurg SBRT*, 2018, 5(3): 217-227.
- [32] TOROK J, WEGNER R E, BURTON S A, et al. Stereotactic body radiation therapy for adrenal metastases: a retrospective review of a noninvasive therapeutic strategy[J]. *Future Oncol*, 2015, 7(1): 145-151.
- [33] HARADA Y, MIVAZAKI S. Cyberknife stereotactic radiosurgery for primary and metastatic cancer in the cervix[J]. *Cureus*, 2017, 9(12): 2002-2007.
- [34] RICOTTI R, SEREGNI M, CIARDO D, et al. Evaluation of target coverage and margins adequacy during cyberknife lung optimized treatment[J]. *Med Phys*, 2018, 45(4): 1360-1368.
- [35] MOON D H, WANG A Z, TEPPER J E. A prospective study of the safety and efficacy of liver stereotactic body radiotherapy in patients with and without prior liver-directed therapy[J]. *Radiother Oncol*, 2018, 126(3): 527-533.

(唐勇 编辑)