

放射性¹²⁵I 粒子植入与外放疗治疗 颈椎转移瘤剂量学对比分析

曹倩倩¹, 姜玉华¹, 李玉亮², 杨瑞杰³, 刘路³, 张喜乐³, 王俊杰³

(1. 山东大学第二医院肿瘤防治中心, 山东 济南 250033; 2. 山东大学第二医院介入医学科, 山东 济南 250033;
3. 北京大学第三医院放疗科, 北京 100191)

摘要:目的 对比放射性¹²⁵I 粒子植入与不同外放疗技术治疗颈椎转移瘤的靶区及危及器官剂量分布, 为临床治疗方式选择提供依据。方法 随机选取 10 例颈椎转移瘤患者, 三维适形放射治疗(3D-CRT) 计划为单前野加双侧斜后野, 调强适形放射治疗(IMRT) 为 5 野等分, 选用 2 弧容积旋转调强放疗(VMAT)。将 Oncentra 治疗计划系统中的图像传输到粒子计划系统, 制定近距离放疗(LDR) 术前模拟计划。结果 脊髓剂量相同时, LDR 的 D90 和 D95 生物等效剂量(BED) 分别为(184.15 ± 25.84) Gy、(161.45 ± 26.35) Gy。VMAT、IMRT、3D-CRT 对应的靶区 D₉₅ BED 2 Gy/f 时分别为:(120.52 ± 10.66) Gy、(119.19 ± 10.91) Gy、(96.24 ± 28.65) Gy; 3 Gy/f 时分别为:(122.19 ± 7.54) Gy、(122.37 ± 8.19) Gy、(95.94 ± 24.70) Gy。靶区各参数与 LDR 相比, 均服从正态分布, 配对 t 检验差异具有统计学意义(P=0.00)。VMAT、IMRT 与 LDR 比较, 黏膜 V₅ 差异无统计学意义(P=0.16, 0.34), 只有 3D-CRT 高于 LDR(P=0.00)。黏膜 V₃₀、D_{mean} LDR 均低于 3 种外放疗技术(P=0.00)。其余甲状腺、腮腺、下颌骨各参数, LDR 最低, 差异具有统计学意义(P=0.00)。结论 3D-CRT、IMRT、VMAT 单次 2 Gy 及 3 Gy 分割方案与 LDR 相比, 脊髓剂量相同时, LDR 的靶区剂量更高, 同时有效地保护周围危及器官。对于放疗后复发的颈椎椎体转移瘤, LDR 具有剂量学优势。

关键词: ¹²⁵I 粒子; 颈椎肿瘤; 剂量学; 外放疗; 近距离治疗

中图分类号: R738.1 文献标志码: A

A dosimetric analysis of cervical metastases between radioactive ¹²⁵I seeds implantation and external beam radiation therapy

CAO Qianqian¹, JIANG Yuhua¹, LI Yuliang², YANG Ruijie³, LIU Lu³, ZHANG Xile³, WANG Junjie³

(1. Cancer Center, Second Hospital of Shandong University, Jinan 250033, China;

2. Interventional Medical Center, Second Hospital of Shandong University, Jinan 250033;

3. Department of Radiation Oncology, Peking University Third Hospital, Beijing 100191, China)

Abstract: Objective To compare the gross tumor volume (GTV) and dose distributions for organs at risk (OAR) between external beam radiation therapy (EBRT) and low-dose rate (LDR) brachytherapy in the treatment of cervical vertebral metastases, in order to provide the basis for clinical treatment. **Methods** A total of 10 patients were randomly selected. Three-dimensional conformal radiotherapy (3D-CRT) planning was a single forth one with two oblique radiation fields. Intensity modulated radiotherapy (IMRT) planning included five equal radiation fields, and 2-arc volumetric-modulated arc radiotherapy (VMAT) was adopted. The images from Oncentra treatment planning system (TPS) were delivered to Prowess TPS to formulate LDR brachytherapy pre-operative simulation plan. **Results** For the same dose of spinal cord, the biologically effective dose (BED) of D90 and D95 of LDR were (184.15 ± 25.84) Gy and (161.45 ± 26.35) Gy. When the fraction scheme was 2 Gy/f, the D₉₅ BED of VMAT, IMRT and 3D-CRT were (120.52 ± 10.66) Gy, (119.19 ± 10.91) Gy and (96.24 ± 28.65) Gy. When the fraction scheme was 3 Gy/f, the

D_{95} BED 3 Gy/f of VMAT, IMRT and 3D-CRT were (122.19 ± 7.54) Gy, (122.37 ± 8.19) Gy and (95.94 ± 24.70) Gy. All parameters complied with the normal distribution, $P=0.00$ after paired t test. There was no statistical difference in V_5 of the mucosa among VMAT, IMRT and LDR ($P=0.16, 0.34$), and V_5 of the mucosa of 3D-CRT was higher than that in LDR ($P=0.00$). The V_{30} and D_{mean} of LDR were less than those of 3D-CRT, VMAT and IMRT, statistically ($P=0.00$). Other parameters of the thyroid gland, parotid gland and mandible were significantly different between LDR and 3D-CRT, VMAT and IMRT ($P=0.00$). **Conclusion** When the fraction schemes were 2 Gy/f and 3 Gy/f, 3D-CRT, IMRT and VMAT had lower GTV doses than LDR, which could protect the OARs at the same time. Therefore, as to the cervical vertebral metastases after EBRT, LDR is a good choice for salvage treatment.

Key words: ^{125}I seeds; Cervical tumor; Dosimetry; External Beam Radiation Therapy; Brachytherapy

颈椎转移瘤占脊柱转移瘤的8%~15%,包括枕颈区、下颈椎及胸颈结合区,椎体的发病率明显高于椎板及椎弓根^[1]。非手术治疗方法包括放疗、化疗及双磷酸盐类药物化疗。放疗剂量目前没有明确规定,常用的分割方案为单次2~24 Gy,无论单次还是多次分割方案,在总缓解、完全缓解、疼痛改善及神经功能保有率上无差异^[2]。但外放疗受脊髓耐受剂量约束,对于需要高剂量放疗或复发后需要再程放疗的脊柱肿瘤患者,靶区剂量受限制。放射性 ^{125}I 粒子植入治疗脊柱肿瘤能保证靶区高剂量的同时保护危及器官,对于放疗后复发的患者是可供选择的的治疗方法。

国外有报道用于脊髓压迫患者术中治疗,给出了脊髓受照剂量及临床疗效,无其他危及器官剂量分析^[3]。国内研究多集中在脊柱转移瘤粒子植入术后生存分析与疼痛及神经功能改善,给出了靶区 D_{90} 剂量但无危及器官剂量学分析^[4-6]。现有的椎体转移瘤剂量学研究以外放疗为主,缺乏与放射性 ^{125}I 粒子剂量学比较。因而,本研究对比了不同分割方案、不同放疗技术治疗颈椎椎体转移瘤靶区及危及器官的剂量分布,为临床治疗方式的选择提供依据。

1 资料与方法

1.1 资料

1.1.1 一般资料 2012年12月~2013年12月北京大学第三医院肿瘤治疗中心10例颈椎椎体转移瘤患者。男5例,女5例,53~75岁(中位61.5岁)。10例患者10个病灶,累及 ≤ 3 个连续椎体,无脊柱不稳^[7]。病灶位置C3~C7椎体。所有患者未接受过手术及外放疗,均完成粒子及外放疗计划设计,原发病灶病理类型肺癌5例,乳腺癌3例,肝癌2例。肿瘤体积(gross tumor volume, GTV) $10.6 \sim 63.4 \text{ cm}^3$,平均(29.1 ± 11.6) cm^3 。所有患者均签署知情同意书。

1.1.2 设备 CT定位图像由飞利浦大孔径CT模

拟机采集,扫描条件120 kV,100 mAs,层厚1.5 mm。扫描时患者仰卧位,低温热塑头颈肩网固定。研究用放射治疗机采用瑞典医科达公司AXESSE直线加速器,Agility准直器,80对叶片动态多叶准直器技术(multileaf collimator, MLC),等中心处投影宽度为5 mm,外放疗计划选用医科达公司Oncontra治疗计划系统,剂量算法为Collapsed Cone(GPU)。选用放射性 ^{125}I 粒子为6711型,活度0.5 mCi。近距离治疗模拟计划采用北京飞天兆业科技有限公司的Prowess计划系统。

1.2 方法

1.2.1 靶区及危及器官勾画 GTV为影像学上可见病灶。所有扫描层面均匀画脊髓,其余危及器官所有扫描层面均匀画^[8]。对于并行器官,应画全器官。串行器官应画全,或保持统一标准,如颈部脊髓勾画到T1。

1.2.2 外放疗治疗计划设计 采用三维适形放射治疗(three-dimensional conformal radiotherapy, 3D-CRT)、调强适形放射治疗(intensity modulated radiotherapy, IMRT)、容积旋转调强放疗(volumetric-modulated arc radiotherapy, VMAT)3种外放疗技术,剂量分割方案为2 Gy/f、3 Gy/f。脊髓2 Gy/f常规分割时等效剂量(equivalent dose in 2 Gy/f, EQD2)为45 Gy时,不同分割方案绝对剂量分别为45 Gy、37.5 Gy。①3D-CRT:采用单前野和双侧斜后野组合的布野方式,射野角度的选择原则是尽量减少穿过脊髓,双侧后斜野添加楔形角修整剂量线。GTV最高剂量不超过处方剂量的10%;②IMRT:射野的个数为5,射野方向等角均分,分别为 0° 、 72° 、 144° 、 216° 和 288° 。设置逆向优化参数,GTV设置最低剂量(105%处方剂量),最高剂量(107%处方剂量),并且给予较大的权重。脊髓设置最高剂量,根据脊髓距离GTV距离的远近设置不同的最高剂量限制,并且设置较GTV稍低的权重;③VMAT:考虑到研究病例非偏中心,因此研究中采取双全弧旋转照射方式, 360° 范围内共计90个剂量控

制点,设置与IMRT相同的逆向优化参数及3个同样的剂量跌落区。

1.2.3 粒子模拟计划设计 将 Oncentra 计划系统中含有靶区及危及器官信息的图像传输到 Prowess 计划系统,制定术前模拟计划。脊髓 EQD2 = 45 Gy 时,对应低剂量率近距离放疗(low-dose rate brachytherapy, LDR) 脊髓绝对剂量为 73.2 Gy。选用放射性¹²⁵I 粒子 0.5 mCi, GTV 隔层植入,间隔 1.0 cm 平行布针。粒子距离脊髓边界 ≥ 1.0 cm。通过调整植入针位置及粒子数目,达到脊髓 D_{2%} 为 73.2 Gy,同时靶区剂量最高。

1.2.4 评价指标 并行器官如腮腺、下颌骨,选择 D_{mean} 和 V_D(接受绝对剂量 D 的体积所占总体积百分比), D_{median} 意义不大。串行器官如脊髓选用 D_{2%}。因而, GTV 评价指标包括: D_{2%}、D_{90%}、D_{98%}、D_{95%} 和 D_{mean}。黏膜、甲状腺、腮腺、下颌骨: V₅、V₃₀、D_{mean}^[9]。

1.3 统计学处理 采用 SPSS 18.0 PASW 软件,所

有数据分别行正态性检验,符合正态分布时,对于靶区及危及器官各评价指标,分别对脊髓 EQD2 = 45 Gy 的 3 种不同外放疗技术 3D-CRT、IMRT、VMAT 及 2 Gy/f、3 Gy/f 剂量分割方案与 LDR 行配对 t 检验。P < 0.05 为差异具有统计学意义。

2 结果

2.1 不同放疗技术、不同分割方案对应靶区剂量对比 见图 1,表 1~2。10 例患者均成功完成了 LDR 及外放疗计划设计,符合实验设计要求。脊髓 EQD2 = 45 Gy 时,LDR 能够做到靶区高度适形,同时很好地保护周围危及器官,GTV 各评价指标剂量均高于 3 种外放疗技术(P = 0.00)。脊髓剂量相同时,2 Gy/f、3 Gy/f 3 种外放疗技术 VMAT、IMRT 和 3D-CRT 靶区各参数与 LDR 相比,均服从正态分布,配对 t 检验,差异具有统计学意义(P = 0.00)。

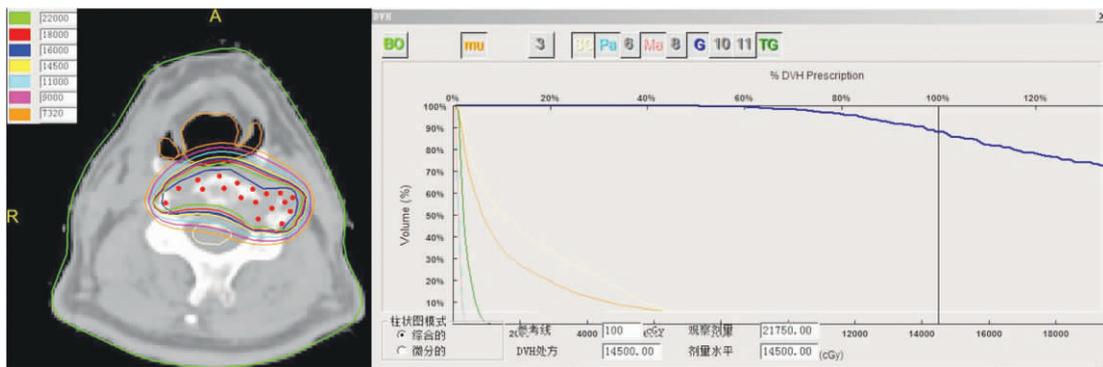


图 1 脊髓 EQD2 = 45 Gy 时,放射性¹²⁵I 粒子植入对应的靶区和危及器官剂量分布与 DVH 图
Fig. 1 The dose distribution and DVH of GTV and OARS when EQD2 = 45 Gy

表 1 颈髓 EQD2 = 45 Gy 时 2 Gy/f VMAT、IMRT、3D-CRT 与 LDR GTV 参数

BED(Gy)	VMAT	IMRT	3D-CRT	LDR
D _{2%}	131.54 ± 11.24**	128.82 ± 11.53 ^{△△}	116.50 ± 28.87 ^{###}	219.35 ± 0.57
D _{90%}	121.61 ± 10.79**	120.65 ± 10.95 ^{△△}	98.45 ± 29.08 ^{###}	184.15 ± 25.84
D _{95%}	120.52 ± 10.66**	119.19 ± 10.91 ^{△△}	96.24 ± 28.65 ^{###}	161.45 ± 26.35
D _{98%}	119.83 ± 11.27**	116.53 ± 11.05 ^{△△}	93.88 ± 28.17 ^{###}	137.71 ± 23.86
D _{mean}	124.68 ± 11.23**	124.71 ± 11.28 ^{△△}	104.90 ± 29.32 ^{###}	210.13 ± 5.63

**P < 0.01 vs LDR; ^{△△}P < 0.01 vs LDR; ^{###}P < 0.01 vs LDR。

表 2 颈髓 EQD2 = 45 Gy 时 3 Gy/f VMAT、IMRT、3D-CRT 与 LDR GTV 参数

BED(Gy)	VMAT	IMRT	3D-CRT	LDR
D _{2%}	129.87 ± 7.82**	130.77 ± 8.72 ^{△△}	108.79 ± 24.62 ^{###}	219.35 ± 0.57
D _{90%}	123.07 ± 7.52**	123.51 ± 8.31 ^{△△}	97.88 ± 25.11 ^{###}	184.15 ± 25.84
D _{95%}	122.19 ± 7.54**	122.37 ± 8.19 ^{△△}	95.94 ± 24.70 ^{###}	161.45 ± 26.35
D _{98%}	120.97 ± 7.73**	120.59 ± 8.51 ^{△△}	94.06 ± 24.49 ^{###}	137.71 ± 23.86
D _{mean}	125.92 ± 7.48**	126.85 ± 8.61 ^{△△}	102.96 ± 25.13 ^{###}	210.13 ± 5.63

**P < 0.01 vs LDR; ^{△△}P < 0.01 vs LDR; ^{###}P < 0.01 vs LDR。

2.2 不同放疗技术、不同分割方案危及器官剂量对比 见表3~4。脊髓EQD2=45 Gy时,VMAT、IMRT与LDR相比,黏膜V₅差异不具有统计学意义(P=0.16,0.34),只有3D-CRT高于LDR(P=0.00),LDR黏膜V₃₀、D_{mean}均低于3种外放疗技术(P=0.00)。其余甲状腺、腮腺、下颌骨的各项参数,

不同分割方案的VMAT、IMRT和3D-CRT均高于LDR,差异具有统计学意义(P=0.00)。表3,4列出了不同分割方案3种外放疗技术及LDR对应危及器官剂量分布,所有剂量均为EQD2。数据均服从正态分布,因而采用配对t检验。

表3 脊髓EQD2=45 Gy,2 Gy/f VMAT、IMRT、3D-CRT和LDR危及器官剂量分布

评价指标	VMAT	IMRT	3D-CRT	LDR
黏膜				
V ₅ (%)	47.56 ± 29.88	44.94 ± 30.33	63.18 ± 29.57 ^{##}	48.78 ± 34.96
V ₃₀ (%)	24.26 ± 15.23 ^{**}	24.39 ± 16.93 ^{△△}	50.83 ± 29.37 ^{##}	9.92 ± 9.12
D _{mean} (Gy)	17.15 ± 8.71 ^{**}	17.18 ± 8.50 ^{△△}	27.49 ± 12.15 ^{##}	10.76 ± 7.49
甲状腺				
V ₅ (%)	39.21 ± 39.32 ^{**}	37.60 ± 38.97 ^{△△}	42.50 ± 40.33 ^{##}	16.39 ± 33.96
V ₃₀ (%)	3.49 ± 5.11 ^{**}	4.94 ± 5.87 ^{△△}	30.21 ± 35.07 ^{##}	2.16 ± 6.60
D _{mean} (Gy)	9.04 ± 9.32 ^{**}	8.66 ± 9.14 ^{△△}	14.81 ± 14.93 ^{##}	3.64 ± 6.44
腮腺				
V ₅ (%)	55.28 ± 47.42 ^{**}	55.10 ± 47.37 ^{△△}	27.22 ± 39.50 ^{##}	11.45 ± 27.06
V ₃₀ (%)	2.58 ± 8.13 ^{**}	3.93 ± 12.40 ^{△△}	2.84 ± 7.88 ^{##}	1.04 ± 4.44
D _{mean} (Gy)	10.59 ± 9.62 ^{**}	10.71 ± 10.06 ^{△△}	5.15 ± 7.31 ^{##}	2.23 ± 4.52
下颌骨				
V ₅ (%)	53.92 ± 39.94 ^{**}	53.28 ± 39.36 ^{△△}	57.27 ± 39.94 ^{##}	7.25 ± 16.18
V ₃₀ (%)	0.59 ± 1.80 ^{**}	0.73 ± 2.18 ^{△△}	3.08 ± 5.89 ^{##}	0.20 ± 0.89
D _{mean} (Gy)	8.14 ± 5.91 ^{**}	7.86 ± 5.80 ^{△△}	11.83 ± 8.30 ^{##}	1.59 ± 2.01

**P<0.01 vs LDR; △△P<0.01 vs LDR; ##P<0.01 vs LDR。

表4 脊髓EQD2=45 Gy,3 Gy/f VMAT、IMRT、3D-CRT和LDR危及器官剂量分布

评价指标	VMAT	IMRT	3D-CRT	LDR
黏膜				
V ₅ (%)	48.84 ± 29.91	48.39 ± 30.63	61.63 ± 29.57 ^{##}	48.78 ± 34.96
V ₃₀ (%)	7.43 ± 8.24 ^{**}	7.73 ± 8.05 ^{△△}	49.48 ± 27.76 ^{##}	9.92 ± 9.12
D _{mean} (Gy)	15.5 ± 6.38 ^{**}	15.44 ± 6.31 ^{△△}	22.28 ± 9.12 ^{##}	10.76 ± 7.49
甲状腺				
V ₅ (%)	38.13 ± 39.12 ^{**}	37.01 ± 38.89 ^{△△}	41.96 ± 40.13 ^{##}	16.39 ± 33.96
V ₃₀ (%)	1.26 ± 1.72 ^{**}	2.44 ± 3.70 ^{△△}	27.08 ± 32.36 ^{##}	2.16 ± 6.60
D _{mean} (Gy)	8.04 ± 6.96 ^{**}	7.76 ± 6.84 ^{△△}	13.33 ± 11.20 ^{##}	3.64 ± 6.44
腮腺				
V ₅ (%)	55.28 ± 47.42 ^{**}	54.95 ± 47.42 ^{△△}	26.69 ± 39.23 ^{##}	11.45 ± 27.06
V ₃₀ (%)	1.44 ± 3.70 ^{**}	1.94 ± 6.13 ^{△△}	2.51 ± 7.08 ^{##}	1.04 ± 4.44
D _{mean} (Gy)	9.88 ± 7.20 ^{**}	10.13 ± 7.57 ^{△△}	4.83 ± 5.48 ^{##}	2.23 ± 4.52
下颌骨				
V ₅ (%)	52.48 ± 38.81 ^{**}	52.71 ± 39.01 ^{△△}	56.92 ± 39.88 ^{##}	7.25 ± 16.18
V ₃₀ (%)	0.15 ± 0.46 ^{**}	0.17 ± 0.55 ^{△△}	1.48 ± 4.54 ^{##}	0.20 ± 0.89
D _{mean} (Gy)	7.22 ± 4.37 ^{**}	7.19 ± 4.32 ^{△△}	10.64 ± 6.22 ^{##}	1.59 ± 2.01

**P<0.01 vs LDR; △△P<0.01 vs LDR; ##P<0.01 vs LDR。

3 讨论

脊柱是骨转移最常见的转移部位,其中颈椎转移占8%~15%^[9-10]。颈椎解剖结构复杂,多数患者

伴有疼痛及神经压迫症状,其中胸颈结合区相比其他区域更容易发生脊髓压迫及神经功能障碍^[11-12]。有症状的脊柱转移瘤采用的放疗方法为AP-PA或PA野,分割方案从单次8 Gy到40 Gy/20f不等,所有分割方案在短期缓解率上无差异^[9]。虽然外放

疗能够获得较好的肿瘤缓解率,但对于放疗后复发的患者,受脊髓耐受剂量的限制,再程放疗的靶区剂量受到制约,因而就需要对周围危及器官保护更好的治疗方法。近几年,放射性¹²⁵I粒子应用于脊柱转移瘤陆续报道,国外只有小样本生存分析,并且均为术中植入放射性¹²⁵I粒子,国内相关研究也仅仅局限于临床疗效,无相关剂量学研究,对于放射性¹²⁵I粒子近距离治疗对靶区及危及器官的剂量学优势仍处于空白,因而本研究就目前常用的三种外放疗技术及分割方案与CT引导下放射性¹²⁵I粒子组织间植入治疗颈椎椎体转移瘤进行了分析。

本研究选用了临床常用及文献报道最多的外放疗分割方案,即单次剂量分别2 Gy、3 Gy多次分割方案,针对3D-CRT、IMRT及VMAT3种不同的外放疗技术,分别给出了靶区及危及器官剂量分布。张喜乐等^[13]对比了颈椎原发恶性肿瘤IMRT与VMAT靶区及危及器官剂量分布,与本文研究结果相一致。IMRT与VMAT的适形性指数(conformal index, CI)优于3D-CRT。IMRT射野数目越多,CI指数越高,与IMRT相比,2弧VMAT的CI指数优于IMRT。IMRT5野、7野、9野时,随着射野数目增加,CI越高。其中以5野对脊髓的保护更好。IMRT与VMAT_{2arc}在靶区所有剂量曲线及对危及器官的保护上无明显差异,并且VMAT_{2arc}对脊髓保护优于VMAT_{1arc}^[11]。

本研究中将所有靶区剂量归一到BED,危及器官选用EQD2。粒子的BED及EQD2相关公式参数选择来自英国放射生物学家Roger教授及前列腺癌相关研究文献,所有结果同时经过ABS剂量计算软件二次核实^[14-17]。目前临床上常用的外放疗BED计算模型为LQ模型,Brown报道对于单次1~5 Gy分割方案,LQ模型能够很好地预测早反应组织、大多数肿瘤以及晚反应组织的放射生物学效应^[18]。颈髓放射敏感性高于腰髓,低于胸椎脊髓,本研究综合各时期参考文献,将颈髓 α/β 比值定为3 Gy,实验中脊髓剂量节点取近似最大值 $D_{2\%}$ 为45 Gy^[19]。本研究结果显示,脊髓EQD2=45 Gy时,LDR靶区各评价指标均高于3种外放疗技术,这与LDR靶区边缘剂量跌落迅速密切相关,放射性¹²⁵I粒子的组织半价层仅1.7 cm,也保证了对危及器官的保护^[20-21]。黏膜 V_5 3D-CRT高于LDR,原因可能与LDR靶区边缘剂量跌落迅速有关。并且临床上更关注的是黏膜的高剂量区,LDR的 V_{30} 、 D_{mean} 均低于三种外放疗技术,因而能更好地保护黏膜。部分患者腮腺3D-CRT计划设计时避开了腮

腺,因而 V_5 明显低于VMAT及IMRT,但 V_{30} 差异不具有统计学意义。本研究的不足之处是例数较少,未严格区分不同受累椎体及病灶距离脊髓距离,在后续研究会进行进一步分析。

综上所述,颈椎椎体转移瘤VMAT、IMRT及3D-CRT均能达到靶区剂量覆盖要求,不同剂量分割方案VMAT与IMRT结果明显优于3D-CRT,所有外放疗分割方案与LDR相比,在脊髓剂量相同的情况下,LDR能获得更高的GTV,同时有效地保护危及器官。因而对于放疗后复发的椎体转移瘤患者,LDR在靶区剂量及危及器官保护上优于常规外放疗技术,是可供选择的治疗方法。

参考文献:

- [1] Mesfin A, Buchowski JM, Gokaslan ZL, et al. Management of metastatic cervical spine tumors [J]. J Am Acad Orthop Surg, 2015, 23(1): 38-46.
- [2] Chow E, Zeng L, Salvo N, et al. Update on the systematic review of palliative radiotherapy trials for bone metastases [J]. Clin Oncol-Uk, 2012, 24(2): 112-124.
- [3] Rogers CL, Theodore N, Dickman CA, et al. Surgery and permanent ¹²⁵I seed paraspinal brachytherapy for malignant tumors with spinal cord compression [J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2002, 54(2): 505-513.
- [4] Wang J, Yuan H, Ma Q, et al. Interstitial ¹²⁵I seeds implantation to treat spinal metastatic and primary paraspinal malignancies [J]. Med Oncol, 2010, 27(2): 319-326.
- [5] Cao QQ, Wang H, Meng N, et al. CT-guidance interstitial ¹²⁵Iodine seed brachytherapy as a salvage therapy for recurrent spinal primary tumors [J]. Radiat Oncol, 2014, 9: 301. doi: 10.1186/s13014-014-0301-8.
- [6] 柳晨, 王俊杰, 孟娜, 等. CT引导下放射性¹²⁵I粒子植入治疗脊柱转移性肿瘤的价值 [J]. 中国脊柱脊髓杂志, 2011, 21(3): 226-229.
LIU Chen, WANG Junjie, MENG Na, et al. CT-guide interstitial iodine-125 seed implantation for metastatic spine tumor [J]. Chinese Journal of Spine and Spinal Cord, 2011, 21(3): 226-229.
- [7] Huisman M, van der Velden JM, van Vulpen M, et al. Spinal instability as defined by the spinal instability neoplastic score is associated with radiotherapy failure in metastatic spinal disease [J]. Spine J, 2014, 14(12): 2835-2840.
- [8] Hodapp N. The ICRU report 83: prescribing, recording, and reporting photon-beam intensity-modulated radiation therapy (IMRT) [J]. Strahlenther Onkol, 2012 188(1): 97-99.
- [9] Mesfin A, Buchowski JM, Gokaslan ZL, et al. Manage-

- ment of metastatic cervical spine tumors [J]. *J Am Acad Orthop Surg*, 2015, 23(1): 38-46.
- [10] Ju DG, Zadnik PL, Groves ML, et al. Factors associated with improved outcomes following decompressive surgery for prostate cancer metastatic to the spine [J]. *Neurosurgery*, 2013, 73(4): 657-666.
- [11] Ramieri A, Domenicucci M, Ciappetta P, et al. Spine surgery in neurological lesions of the cervicothoracic junction: multicentric experience on 33 consecutive cases [J]. *Eur Spine J*, 2011, 20(1): 13-19.
- [12] Dalbayrak S, Yaman O, Yilmaz M, et al. Results of the transsternal approach to cervicothoracic junction lesions [J]. *Turk Neurosurg*, 2014, 24(5): 720-725.
- [13] 张喜乐, 杨瑞杰, 孟娜, 等. 一种新的混合旋转调强放射治疗技术治疗颈椎原发恶性肿瘤剂量学研究 [J]. *现代肿瘤学杂志*, 2014, 22(12): 2964-2969.
ZHANG Xile, YANG Ruijie, MENG Na, et al. Dosimetric study of a novel hybrid volumetric modulated arc therapy technique for primary cervical spine malignant tumors [J]. *Modern Oncology*, 2014, 22(12): 2964-2969.
- [14] Georg D, Hopfgartner J, Gøra J, et al. Dosimetric considerations to determine the optimal technique for localized prostate cancer among external photon, proton, or carbon-ion therapy and high-dose-rate or low-dose-rate brachytherapy [J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2014, 88(3): 715-722.
- [15] Holloway RP, Dale RG. Theoretical implications of incorporating relative biological effectiveness into radiobiological equivalence relationships [J]. *Br J Radiol*, 2013, 86(1022): 20120417. doi: 10.1259/bjr.20120417.
- [16] Skowronek J, Malicki J, Piotrowski T. Values of biologically equivalent doses in healthy tissues comparison of PDR and HDR brachytherapy techniques [J]. *Brachytherapy*, 2010, 9(2): 165-170.
- [17] Gay HA, Jin JY, Chang AJ, et al. Utility of normal tissue-to-tumor α/β ration when evaluating isodose of isoeffective radiation therapy treatment plans [J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2013, 85(1): 81-87.
- [18] Brown JM, Carlson DJ, Brenner DJ. The tumor radiobiology of SRS and SBRT: are more than the 5 Rs involved? [J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2014, 88(2): 254-262.
- [19] Kirkpatrick JP, van der Kogel AJ, Schultheiss TE. Radiation dose-volume effects in the spinal cord [J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2010, 76(3): 42-49.
- [20] 张颖, 林琦, 袁苑, 等. 3D 打印个体化模板联合 CT 引导¹²⁵I 粒子植入治疗胸壁转移瘤 1 例 [J]. *山东大学学报(医学版)*, 2016, 54(4): 94-96.
- [21] Yao L, Jiang Y, Jiang P, et al. CT-guided permanent ¹²⁵I seed interstitial brachytherapy for recurrent retroperitoneal lymph node metastases after external beam radiotherapy [J]. *Brachytherapy*, 2015, 14(5): 662-669.

(编辑: 刘霞)