

• 实验研究 Experimental research •

^{125}I 粒子植入后不同粒子活度和肿瘤缩小速度对靶区剂量学参数的影响

于慧敏, 赵金鑫, 董建涛, 底学敏, 高 贞, 王 娟, 张宏涛

【摘要】 目的 探讨在相同处方剂量下 ^{125}I 粒子植入后不同粒子活度及肿瘤缩小速度对靶区剂量学参数的影响。**方法** 应用计算机三维治疗计划系统(3D-TPS)勾画模拟出边长为 6 cm 正方体肿瘤, 处方剂量(PD)为 100 Gy, 选取的 ^{125}I 粒子活度为 0.4、0.8 mCi。假设粒子植入术后肿瘤向心性缩小、粒子均匀向心性集中无脱落或游走, 肿瘤体积每月以不同速度(0%、5%、10%、15%、20%、25%、30%、35%、40%、45%、50%)缩小, 根据粒子不同活度分为 A1~K1 组(0.4 mCi)、A2~K2 组(0.8 mCi)。根据 ^{125}I 粒子衰变规律, 采用 TPS 模拟 A1~K1 组和 A2~K2 组术后 1、2、3、4、5、6 个月验证计划得出每组术后不同时间相对应的两种不同活度 90%靶体积所接受剂量(D_{90})以及 100%、150%、90%处方剂量所覆盖体积占靶体积百分比(V_{100} 、 V_{150} 、 V_{90})和平均剂量(D_{mean})。通过比较不同活度粒子植入肿瘤后 D_{90} 、 V_{100} 、 V_{150} 、 V_{90} 、 D_{mean} 差异, 分析不同活度粒子植入肿瘤后肿瘤靶区以 0~50% 速度缩小的剂量学影响。**结果** 肿瘤靶区每月缩小速度 $\leq 30\%$ 时, 0.4、0.8 mCi 组术后 1~6 个月 D_{90} 无明显差异; 每月缩小速度 $> 30\%$ 时, 0.8 mCi 组 D_{90} 高于 0.4 mCi 组; 每月缩小速度 $< 25\%$ 时, 0.4 mCi 组 V_{90} 高于 0.8 mCi 组, 第 5~6 个月两组 V_{90} 变化趋于一致; 每月缩小速度 $\geq 30\%$ 时, 0.8 mCi 组 V_{90} 高于 0.4 mCi 组, 且随着缩小速度增加, 两组差别越大; V_{100} 结果与 V_{90} 结果一致; 每月缩小速度 $< 35\%$ 时, 0.4 mCi 组 V_{150} 高于 0.8 mCi 组; 每月缩小速度 $\geq 35\%$ 时, 0.8 mCi 组 V_{150} 高于 0.4 mCi 组, 且随着缩小速度增加, 两组差别越大; 每月缩小速度 $< 25\%$ 时, 0.4 mCi 组 D_{mean} 高于 0.8 mCi 组; 每月缩小速度 $\geq 25\%$ 时, 0.8 mCi 组 D_{mean} 高于 0.4 mCi 组, 且随着缩小速度增加, 两组差别越大。**结论** 处方剂量相同情况下, 肿瘤靶区每月缩小速度 $< 30\%$ 时 ^{125}I 粒子活度对 D_{90} 影响不大, 低活度组 V_{90} 、 V_{100} 、 V_{150} 和 D_{mean} 均高于高活度组, 靶区均匀性相对较好; 肿瘤靶区每月缩小速度 $> 35\%$ 时, 高活度组 D_{90} 、 V_{90} 、 V_{100} 、 V_{150} 和 D_{mean} 均高于低活度组, 且高剂量区持续时间长。随着靶区每月缩小速度增大, 这种差异更加明显。

【关键词】 ^{125}I 粒子; 动态剂量; 靶体积; 缩小速度; 活度

中图分类号: R73 文献标志码: A 文章编号: 1008-794X(2025)-003-0272-06

The effect of different particle activities and tumor shrinkage speed on the dosimetric parameters of the target area after ^{125}I particle implantation YU Huimin, ZHAO Jinxin, DONG Jiantao, DI Xuemin, GAO Zhen, WANG Juan, ZHANG Hongtao. Division I, Department of Oncology, Hebei Provincial People's Hospital, Shijiazhuang, Hebei Province 050051, China

Corresponding author: ZHANG Hongtao, E-mail: sunnyximo@163.com

【Abstract】 Objective To discuss the effect of different particle activities and tumor shrinkage speed on the dosimetric parameters of the target area at the same prescription dose after ^{125}I particle implantation. **Methods** A 6cm-sized cube tumor model was outlined by using a computerized three-dimensional treatment planning system (3D-TPS) with a prescription dose (PD) of 100 Gy, and ^{125}I particle activities of 0.4 mCi and 0.8 mCi were selected. Assuming that the tumor shrinks centripetally after seed implantation and that the ^{125}I particles were uniformly and centripetally concentrated without

DOI: 10.3969/j.issn.1008-794X.2025.03.008

基金项目: 河北省医学科学研究课题计划资助(20230338)

作者单位: 050051 河北石家庄 河北省人民医院肿瘤一科(于慧敏、赵金鑫、底学敏、高 贞、王 娟、张宏涛), 胃肠外科(董建涛)

通信作者: 张宏涛 E-mail: sunnyximo@163.com

shedding or wandering, the tumor volume shrank at different rates every month after implantation (0, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 35%, 40%, 45% and 50%), according to the different activities of ^{125}I particles, the experiments were divided into A1-K1 group (0.4 mCi) and A2-K2 group (0.8 mCi). Based on the ^{125}I particle decay law, the validation program (using TPS simulation of the A1-K1 group and A2-K2 group at postoperative 1, 2, 3, 4, 5 and 6 months) obtained the dose received by 90% of the target volume (D_{90}) in the two groups with different ^{125}I particle activities at different postoperative time points, the percentages of the target volume covered by the 100%, 150% and 90% prescription dose (V_{100} , V_{150} , V_{90}), and the mean dose (D_{mean}). By comparing the differences in D_{90} , V_{100} , V_{150} , V_{90} and D_{mean} after tumor implantation of ^{125}I particles with different activities, the dosimetric impact of the tumor target area shrinking at a rate of 0~50% after implantation of ^{125}I particles with different activities into tumor tissues was analyzed.

Results When the monthly shrinkage rate of the tumor target area was $\leq 30\%$, there was no obvious difference in D_{90} between the 0.4 mCi group and 0.8 mCi group in 1~6 months after surgery. When the monthly shrinkage rate of the tumor target area was $>30\%$, the D_{90} of 0.8 mCi group was higher than that of 0.4 mCi group; when the monthly shrinkage rate of the tumor target area was $<25\%$, the V_{90} of 0.4 mCi group was higher than that of 0.8 mCi group, and the changes of V_{90} of the two groups tended to be the same in the 5th~6th month after surgery. When the monthly shrinkage rate of the tumor target area was $\geq 30\%$, the V_{90} of 0.8 mCi group was higher than that of 0.4 mCi group, and with the increasing of shrinkage rate, the difference between the two groups become more and more significant, the results of V_{100} were consistent with those of V_{90} . When the monthly shrinkage rate of tumor target area $<35\%$, V_{150} of 0.4 mCi group was higher than that of 0.8 mCi group, when the monthly shrinkage rate of tumor target area $\geq 35\%$, V_{150} of 0.8 mCi group was higher than that of 0.4 mCi group, and with the increasing of shrinkage rate, the difference between the two groups become more and more prominent. When the monthly shrinkage rate of tumor target area $<25\%$, D_{mean} of 0.4 mCi group was higher than that of 0.8 mCi group, when the monthly shrinkage rate of tumor target area $\geq 25\%$, D_{mean} of 0.8 mCi group was higher than that of 0.4 mCi group, and with the increasing of shrinkage rate, the difference between the two groups become more and more obvious.

Conclusion With the same prescription dose, when the tumor target area shrinks at a rate of $<30\%$ per month, the activity of ^{125}I particles has little effect on D_{90} , and all V_{90} , V_{100} , V_{150} and D_{mean} in the low activity group are higher than those in the high activity group, meanwhile the homogeneity of the target area is relatively good; when the monthly shrinkage rate of tumor target area $\geq 35\%$, all D_{90} , V_{90} , V_{100} , V_{150} and D_{mean} in the high activity group are higher than those in the low activity group, and the duration of the presence of high-dose area is long. This difference becomes more obvious with the increasing of the monthly shrinkage rate of the target area.

【Key words】 ^{125}I particle; dynamic dose; target volume; shrinkage rate; activity

放射性 ^{125}I 粒子因其独特的生物学效应越来越广泛地应用于治疗全身难治复发的中晚期恶性肿瘤,是术后放化疗后等常规治疗失败的重要补充手段^[1-4]。国内多名权威专家提出粒子植入剂量学研究在目前乃至今后仍是核心问题,对不同肿瘤剂量相关研究是保证未来粒子治疗健康正确发展的前提^[5]。粒子活度与肿瘤体积变化被公认为影响剂量学变化最重要因素^[6],而两者如何影响实际剂量目前尚无理论基础。鉴于临床病例观察肿瘤缩小速度与粒子活度变化对剂量学参数的影响较为困难,本研究应用计算机三维治疗计划系统(three-dimensional treatment planning system, 3D-TPS)

模拟分析不同活度粒子在不同缩小速度下肿瘤靶区剂量学参数变化,从肿瘤体积变化导致剂量学上改变阐述活度对剂量学的影响。

1 材料与方法

1.1 实验材料

6711-99 型放射性 ^{125}I 粒子(北京智博高科生物技术公司);粒子外壳用钛合金密封,直径 0.8 mm,长度 4.5 mm, γ 射线能量 27~35 keV,半衰期 59.6 d,铅半价层 0.025 mm,组织半价层 20 mm,放射性活度 1.48×10^7 Bq(0.4 mCi)、 2.96×10^7 Bq(0.8 mCi);Prowess 3D Version 3.02 型计算机 3D-TPS(美国

SSGI 公司);Powerlook1000 型激光扫描仪(中国台湾世缘资讯公司)。

1.2 研究方法

使用 3D-TPS 勾画模拟边长为 6 cm 正方体肿瘤,调整计算点阵网格密度至 128×128 ,调出¹²⁵I 粒子,选择粒子活度为 0.4、0.8 mCi,按照周边密集、中心稀疏布源原则,进针方向与模板和粒子插植平面垂直。用 TPS 制定出肿瘤¹²⁵I 粒子植入计划,当 90%靶体积吸收剂量(D_{90})最为接近处方剂量 100 Gy 时停止布源。假设¹²⁵I 粒子植入术后肿瘤向心性缩小、粒子均匀向心性集中无脱落或游走,肿瘤体积以不同速度缩小,根据 0.4、0.8 mCi 粒子活度及肿瘤每月较上月缩小速度分组,肿瘤体积较上月无缩小为 A1、A2 组,分别缩小 5%为 B1、B2 组,分别缩小 10%为 C1、C2 组,分别缩小 15%为 D1、D2 组、分别缩小 20%为 E1、E2 组,分别缩小 25%为 F1、F2 组,分别缩小 30%为 G1、G2 组,分别缩小 35%为 H1、H2 组,分别缩小 40%为 I1、I2 组,分别缩小 45%为

J1、J2 组,分别缩小 50%为 K1、K2 组。根据¹²⁵I 粒子衰变规律,计算肿瘤粒子植入术后 1、2、3、4、5、6 个月时 A1~K1 组和 A2~K2 组粒子活度,通过 TPS 得出 A1~K1 组和 A2~K2 组相应肿瘤缩小速度时 D_{90} 、 D_{mean} 、 V_{100} 、 V_{150} 、 V_{90} 。

1.3 观察指标

观察 A1~K1 组、A2~K2 组粒子术后 1~6 月肿瘤缩小速度相同时剂量及体积参数变化,分析不同活度粒子植入肿瘤后肿瘤以 0~50%速度缩小时剂量学差异。

2 结果

两组不同时段¹²⁵I 粒子活度衰变情况见表 1。术后 1~6 个月 0.4 mCi 组、0.8 mCi 组肿瘤缩小与肿瘤靶区剂量学参数变化见表 2、表 3。A1~K1 组和 A2~K2 组每月较上月肿瘤缩小速度 D_{90} 变化见图 1。

表 1 两组不同时段¹²⁵I 粒子活度衰变情况

组别	处方剂量(Gy)	粒子数(粒)	¹²⁵ I 粒子植入后粒子活度(mCi)					
			术后 1 月	术后 2 月	术后 3 月	术后 4 月	术后 5 月	术后 6 月
0.4 mCi 组	100	180	0.28	0.20	0.14	0.10	0.07	0.05
0.8 mCi 组	100	80	0.57	0.40	0.28	0.20	0.14	0.10

表 2 术后 1~6 个月 0.4 mci 组肿瘤缩小与肿瘤靶区剂量学参数变化($\bar{x} \pm s$)

肿瘤缩小(%)	术后 1~6 个月剂量学参数				
	D_{90} (Gy)	V_{90} (Gy)	V_{100} (Gy)	V_{150} (Gy)	D_{mean} (Gy)
0	37.64 ± 23.43	30.92 ± 34.18	26.57 ± 31.90	12.20 ± 19.37	80.87 ± 50.60
5	41.76 ± 23.47	33.37 ± 34.83	28.85 ± 32.58	13.52 ± 20.51	85.97 ± 51.22
10	41.79 ± 19.15	37.17 ± 32.17	31.70 ± 30.16	15.43 ± 19.35	90.90 ± 46.88
15	48.71 ± 22.73	38.67 ± 33.97	31.13 ± 31.14	11.88 ± 15.33	92.07 ± 41.52
20	54.80 ± 58.38	46.55 ± 31.95	39.42 ± 30.82	17.48 ± 24.16	105.13 ± 43.71
25	57.81 ± 25.49	57.07 ± 27.81	49.87 ± 28.95	21.80 ± 22.11	115.65 ± 41.82
30	64.53 ± 22.50	66.00 ± 23.57	58.22 ± 25.46	27.15 ± 21.49	127.40 ± 39.18
35	71.06 ± 21.25	74.08 ± 17.84	67.85 ± 18.69	36.22 ± 16.79	147.09 ± 40.04
40	81.37 ± 20.95	82.30 ± 12.80	77.08 ± 14.71	51.00 ± 16.23	167.29 ± 32.53
45	89.78 ± 16.81	88.42 ± 6.92	84.42 ± 8.28	60.02 ± 14.13	201.50 ± 18.44
50	101.39 ± 12.96	94.47 ± 1.81	90.03 ± 4.46	69.05 ± 5.06	226.67 ± 7.93

表 3 术后 1~6 个月 0.8 mci 组肿瘤缩小与肿瘤靶区剂量学参数变化(Gy, $\bar{x} \pm s$)

肿瘤缩小(%)	术后 1~6 个月剂量学参数				
	D_{90}	V_{90}	V_{100}	V_{150}	D_{mean}
0	35.95 ± 22.39	22.13 ± 29.35	18.02 ± 25.34	6.05 ± 7.51	69.31 ± 43.17
5	42.40 ± 22.50	24.61 ± 31.11	20.00 ± 26.79	6.82 ± 7.88	75.08 ± 43.53
10	46.86 ± 21.58	26.80 ± 29.69	20.92 ± 24.13	6.57 ± 5.00	82.25 ± 35.76
15	51.12 ± 18.55	28.25 ± 27.21	21.78 ± 21.30	7.50 ± 4.31	88.36 ± 30.36
20	55.54 ± 18.94	39.03 ± 29.70	30.13 ± 25.89	9.57 ± 6.35	98.53 ± 32.52
25	65.37 ± 17.84	57.22 ± 29.21	48.00 ± 26.43	14.98 ± 6.74	119.44 ± 30.07
30	76.43 ± 16.83	73.73 ± 19.15	63.55 ± 21.17	22.02 ± 8.49	139.00 ± 24.39
35	89.55 ± 24.86	90.17 ± 8.96	84.78 ± 11.16	55.22 ± 13.63	179.89 ± 16.17
40	108.20 ± 15.88	94.98 ± 5.65	92.18 ± 6.52	65.02 ± 13.08	216.90 ± 19.20
45	116.52 ± 18.42	96.58 ± 4.50	94.77 ± 5.61	71.48 ± 16.72	241.89 ± 50.90
50	125.99 ± 15.12	98.82 ± 1.00	96.78 ± 3.14	76.32 ± 10.15	259.76 ± 37.75

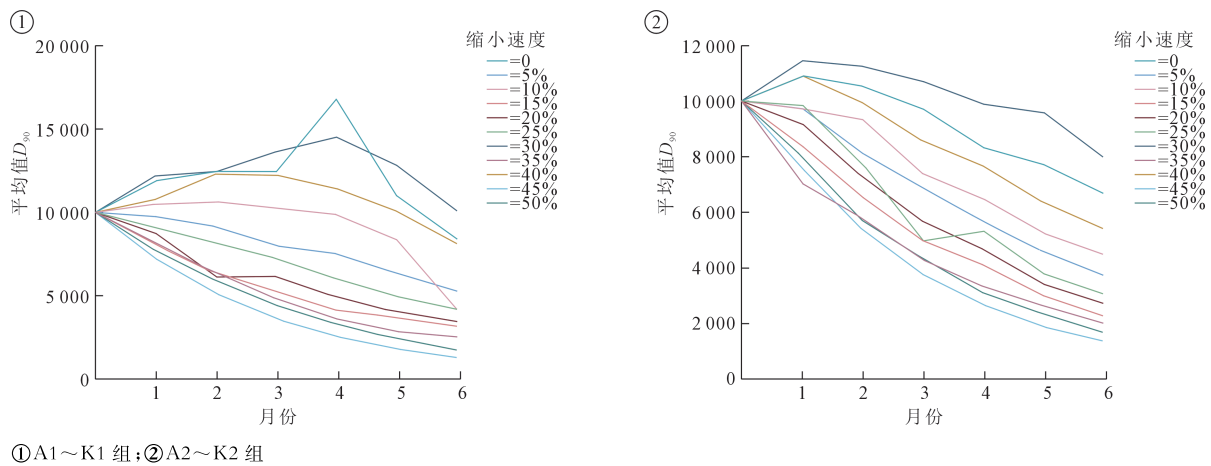


图 1 A1~K1 组和 A2~K2 组肿瘤每月较上月缩小速度 D_{90} 变化

3 讨论

随着近年 ^{125}I 粒子植入方法不断创新^[7]、穿刺技术进步^[8]、3D 导航技术应用^[9]及术后验证方法革新等^[10-11],放射性粒子植入技术适应证不断扩大并取得了一定疗效^[12-13]。然而作为该技术核心,如何准确进行剂量学评估问题越来越突出,临床迫切需要基于剂量学指标为标准的行业规范。 ^{125}I 粒子植入术后肿瘤体积、粒子位置及活度等不断变化,导致靶区与危及器官实际受照剂量持续发生动态变化。某时点剂量验证结果仅表示该时刻至粒子完全衰变,在肿瘤体积不变条件下肿瘤靶区及危及器官的预期吸收剂量,临床指导意义有限。王娟等^[14]根据临床经验提出粒子活度与肿瘤体积对剂量的影响,但尚缺少理论证据。本研究探讨肿瘤体积缩小速度与粒子活度如何影响靶区剂量分布,以期为粒子活度选择及剂量评估提供相关理论依据。

^{125}I 粒子植入术后剂量学精准性不仅取决于术前计划准确实施,更取决于术后剂量验证计划本身的质量和实施准确性。前者取决于粒子类型和活度,后者则是技术与经验的结合。随着磁导航、3D 模板等创新技术不断应用,计划实施准确性不断提高,但对于计划如何选择最佳粒子活度尚未达成共识。高活度粒子可减少粒子数及针道数,降低粒子位移变化所致剂量学影响,受到多数临床医师青睐^[15]。不同活度粒子均可通过优化使肿瘤靶区达到相同处方剂量,但存在靶区剂量不均匀及高剂量区范围持续时间不同的问题。张宏涛等^[16]通过 TPS 模拟实验证实靶区周边剂量相同、肿瘤体积不变情况下,不同活度粒子在植入术后同一时点肿瘤靶区吸收剂量相同,但高活度组粒子靶区内最高剂量点明

显高于低活度组,且高剂量区持续时间更长。以上结论是基于理想状态肿瘤靶区体积及粒子位置不变情况下得出。本研究通过探讨肿瘤靶区以不同缩小速度变化时高、低活度粒子对剂量学的影响发现,术后 1~6 个月靶区每月缩小速度 $\leq 30\%$ 时 0.4 mCi 组 D_{90} 与 0.8 mCi 组相比差异无统计学意义, $>30\%$ 时 0.8 mCi 组 D_{90} 高于 0.4 mCi 组, $<25\%$ 时 0.4 mCi 组 D_{mean} 高于 0.8 mCi 组, $\geq 25\%$ 时 0.8 mCi 组 D_{mean} 则高于 0.4 mCi 组,且随着缩小速度增加,两组差异越来越大;以处方剂量 100 Gy 为观察目标发现,肿瘤靶区每月缩小速度达到 50% 时 0.4 mCi 组 D_{90} 才开始高于处方剂量 100 Gy 并持续 4 个月,术后第 5 个月则又低于 100 Gy,而 0.8 mCi 组在肿瘤靶区每月缩小速度达 40% 时 D_{90} 就开始高于 100 Gy,并在缩小速度达到 50% 时 D_{90} 均明显高于处方剂量 100 Gy,进一步证实高活度组肿瘤靶区高剂量区越大、持续时间越长,靶区周边剂量跌落越慢,且随着肿瘤缩小速度增加,这种变化会更加明显。任婕等^[17]研究发现,靶区处方剂量相同时高、低活度粒子组间抑瘤率差异无统计学意义,但高活度组出现了放射性皮肤损伤。考虑其原因可能是高活度粒子周围形成高剂量区,对周围正常组织造成了损伤。对于紧邻危及器官甚至侵犯危及器官的肿瘤靶区,选用低活度粒子更适宜。

本研究还发现,肿瘤靶区每月缩小速度 $<25\%$ 时 0.4 mCi 组 D_{90} 与 0.8 mCi 组相比虽变化不大,但 V_{90} 高于 0.8 mCi 组,而术后第 5~6 个月两组 V_{90} 又开始重合;靶区每月缩小速度 $\geq 30\%$ 时 0.8 mCi 组 V_{90} 高于 0.4 mCi 组,且随着缩小速度增加两组差别越来越大, V_{100} 变化与 V_{90} 基本一致;靶区每月缩小速度 $<30\%$ 时术后 1~4 个月 V_{150} 0.4 mCi 组高于

0.8 mCi 组,术后 5~6 月两组相差不大;靶区每月缩小速度 $\geq 35\%$ 时 0.8 mCi 组 V_{150} 明显高于 0.4 mCi 组,且随着缩小速度增加,两组差别越来越大。靶区缩小速度较小时低活度组 1~4 个月 V_{90} 、 V_{100} 及 V_{150} 均大于高活度组,考虑与粒子数较多、紧邻粒子区域剂量较高、高剂量区互相融合有关。但由于低活度组 4 个月内活度迅速衰变,粒子周围高剂量区范围迅速缩小,这种剂量学优势仅能维持 4 个月。然而既往有研究以前列腺癌粒子植入时要求 $V_{150} < 60\%$ 为观察指标,发现肿瘤缩小速度达到 35% 时 0.8 mCi 组 V_{150} 开始高于 60%,而 0.4 mCi 组缩小速度需要达到 40%,且随着靶区缩小速度增加,0.8 mCi 组 V_{150} 高于 60% 持续时间更长^[18]。Wuu 等^[19] 研究前列腺癌粒子植入发现,粒子活度自 0.3 mCi 增至 0.7 mCi 时靶区外接受超过处方剂量的体积占靶体积百分比(EI)自 13.9% 增加至 20%;若考虑到靶区不断缩小,EI 差别可能会更大。赵静等^[20] 研究报道,肿瘤靶区靠近支气管、食管、心脏、血管等时均予以低活性粒子植入,以避免并发症发生。制定粒子植入治疗计划时,应充分考虑肿瘤放射敏感性,计算等效生物剂量,若预测肿瘤在粒子植入术后 4 个月内能明显缩小,且距离危及器官较近,可使用低活度粒子;若考虑肿瘤对放疗不敏感、侵袭性强、植入后短期内肿瘤不能缩小、肿瘤缩小后距离危及器官较远,则使用高活度粒子更适宜。

适宜的体积变化及活度选择是保证¹²⁵I 粒子疗效、避免并发症发生的关键。Bues 等^[21] 研究发现,¹²⁵I 粒子活度大于 0.35 mCi 时高活度粒子因分布误差更不易满足靶区剂量要求,且更易导致尿道高剂量范围,同时还发现前列腺癌体积较小时,选用低活度粒子更易获得较好 V_{100} 。低活度粒子由于可获得较好的剂量分布,高剂量区剂量跌落快,随着靶区缩小速度增加,这种优势更加明显,故行粒子植入术时低活度粒子应作为首选。但若肿瘤位于并联器官内、远离危及器官,从减少穿刺针道、降低穿刺相关并发症及经济方面考虑可选用高活度粒子。本研究数据由 TPS 计算得出,并未考虑组织差别对剂量的影响^[22],尚需大量临床数据进一步研究。

[参 考 文 献]

[1] Ke M, Zeng J, Chen Z, et al. Stent loaded with radioactive Iodine-125 seeds for adenoid cystic carcinoma of central airway: a case report of innovative brachytherapy[J]. Front

Oncol, 2023, 13: 837394.

[2] Liu Y, Zhang C, Song M, et al. Celiac plexus block combined with ¹²⁵I seeds for refractory epigastric pain from abdominal malignancies: a retrospective case-control study[J]. Abdom Radiol (NY), 2023, 48: 2157-2166.

[3] Chai J, Liu K, Xu B, et al. Biliary self-expandable metallic stent combined with Iodine-125 seeds in the treatment of malignant biliary obstruction (Bismuth type I or II)[J]. Surg Endosc, 2023, 37: 7729-7737.

[4] He X, Xu Y, Liu M, et al. Three-dimensional template combined with MR-guided Iodine-125 brachytherapy for recurrent brain metastases[J]. J Contemp Brachytherapy, 2023, 15: 174-183.

[5] 郭金和, 胡效坤, 滕皋军. 放射性粒子治疗技术行业存在的问题和发展方向[J]. 中华医学杂志, 2017, 97: 1444-1445.

[6] Al-Qaisieh B, Witteveen T, Carey B, et al. Correlation between pre-and postimplant dosimetry for Iodine-125 seed implants for localized prostate cancer[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2009, 75: 626-630.

[7] Xiang Y, Lu S, Li Y, et al. Iodine-125 seeds combined with biliary stent placement versus stent placement alone for unresectable malignant biliary obstruction: a meta-analysis of randomized controlled trials[J]. J Cancer, 2021, 12: 1334-1342.

[8] 李玉亮. 经上腔静脉途径¹²⁵I 放射性粒子组织间植入治疗纵隔淋巴结转移瘤[C]. 亚太肿瘤介入大会中国肿瘤介入大会暨介入放射学新技术推广和诊疗规范普及大会, 2011.

[9] 吴峰, 郭彦伟, 徐红卫, 等. 3D 个性化打印模板联合 CT 引导¹²⁵I 放射性粒子植入治疗颈部转移瘤的研究[J]. 介入放射学杂志, 2022, 31: 272-276.

[10] 胡天鹏, 沈婕, 邵梦麟, 等. 18F-FDG PET/CT 相关参数对肺癌患者¹²⁵I 粒子植入术后短期疗效的预测价值[J]. 介入放射学杂志, 2022, 31: 577-581.

[11] 白钧, 高贞, 闵学雅, 等. 肺癌¹²⁵I 粒子植入术后 SPECT/CT 计数值与剂量分布及疗效关系初探[J]. 介入放射学杂志, 2023, 32: 240-242.

[12] 杜可朴, 王猛, 李亚丹, 等. ¹²⁵I 粒子植入治疗合并气道狭窄的难治性甲状腺癌的临床疗效[J]. 介入放射学杂志, 2023, 32: 247-250.

[13] 曹国辉, 王泽阳, 徐克, 等. ¹²⁵I 粒子植入治疗肺转移瘤的局部疗效分析[J]. 介入放射学杂志, 2023, 32: 598-601.

[14] 王娟, 梁岩松, 张宏涛. 活度对腹盆腔肿瘤¹²⁵I 粒子局部治疗剂量学影响探讨[J]. 中华医学杂志, 2020, 100: 3204-3206.

[15] Beaulieu L, Archambault L, Aubin S, et al. The robustness of dose distributions to displacement and migration of ¹²⁵I permanent seed implants over a wide range of seed number, activity, and designs[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2004, 58: 1298-1308.

[16] 张宏涛, 于慧敏, 郭利涛, 等. 不同活度¹²⁵I 粒子植入后不同时间肿瘤吸收剂量对比[J]. 介入放射学杂志, 2016, 25: 243-246.

[17] 任婕, 张宏涛, 隋爱霞, 等. ¹²⁵I 粒子植入对荷人肉瘤裸鼠移植瘤的杀伤作用[C]. 第九届中国肿瘤微创治疗学术大会. 郑