

基于靶区与危及器官重叠度的自动治疗计划设计

潘兴晨^{1,2}, 汪冬¹, 胡丽琴¹

1. 中国科学院合肥物质科学研究院, 安徽 合肥 230031; 2. 中国科学技术大学研究生院科学岛分院, 安徽 合肥 230026

【摘要】目的:根据前列腺癌患者的解剖结构建立微分剂量体积直方图(DVH)数学模型来预测危及器官(OAR)子块的DVH, 通过精准预测OAR的DVH并自动设计计划来提高治疗计划的质量和效率。**方法:**从17例前列腺癌计划中随机选择9例作为训练集, 其余为测试集。将靶区外扩到覆盖OAR范围并将外扩区域中的OAR依次分隔成层厚3 mm的子块, 根据偏正态高斯函数建立子块微分DVH的精确模型, 分析靶区和OAR的重叠度与子块微分DVH关系。利用建立在Pinnacle³上的脚本程序获取测试集8例患者OAR各子块, 并通过预测各OAR微分DVH来指导计划。**结果:**靶区与OAR重叠度越小, 微分DVH的变化规律越明显。与原手工计划相比, 自动计划的均匀性指数和适形度指数稍优于原手工计划($t=-1.871, 3.742; P<0.05$)。自动计划靶区的 $V_{100\%}$ 降低, $V_{95\%}$ 提高, 差异均无统计学意义($P>0.05$)。自动计划的膀胱 V_{70}, V_{60}, V_{50} ($t=-2.471, -3.439, -2.376; P<0.05$)以及 V_{40} ($P>0.05$)降低。自动计划的直肠 V_{70}, V_{60}, V_{50} 以及 V_{40} ($t=-2.540, -3.416, -2.666, -2.777; P<0.05$)降低。相关性分析中, 自动计划与原手工计划的膀胱 V_{70}, V_{60}, V_{50} 和 V_{40} 的差异值与重叠度呈负或正相关(相关系数 $=-0.357, -0.976, -0.857, 0.381; P=0.385, 0.000, 0.007, 0.352$), V_{70} 和 V_{40} 的差异值与重叠度无统计学意义。**结论:**基于靶区与OAR重叠度的精确DVH预测模型的前列腺癌自动治疗计划设计使得靶区剂量提高, OAR照射剂量降低。

【关键词】前列腺癌; 重叠度; 自动计划; 危及器官; 剂量体积直方图

【中图分类号】R811.1; R730.55

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2021)10-1203-06

Automatic treatment planning based on the degree of overlap between OAR and PTV

PAN Xingchen^{1,2}, WANG Dong¹, HU Liqin¹

1. Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China; 2. Science Island Branch, Graduate School of University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

Abstract: Objective To establish a mathematical model of differential dose-volume histogram (DVH) according to the anatomical structure of prostate cancer patients for predicting the DVH of organs-at-risk (OAR) sub-blocks, and to improve the quality and efficiency of treatment plan by the accurate prediction of the DVH of OAR and automatic treatment planning. **Methods** Nine of 17 prostate cancer patients were randomly selected as training set and the rest as test set. Planning target volume (PTV) was expanded to cover OAR, and the OAR in the expanded area was successively separated into sub-blocks with a thickness of 3 mm. According to the skewed normal Gaussian function, a precise mathematical model of sub-block differential DVH was established for analyzing the relationship between the degree of overlap between OAR and PTV and sub-block differential DVH. The script program based on Pinnacle³ was used to obtain the OAR sub-blocks of 8 patients in test set, and each OAR differential DVH was predicted to guide the plan. **Results** The smaller the degree of overlap between OAR and PTV was, the more obvious the variation of differential DVH was. The homogeneity index and conformity index of automatic plan were superior to those of original plan ($t=-1.871, 3.742; P<0.05$). The $V_{100\%}$ of PTV in automatic plan was decreased, while $V_{95\%}$ was increased, but the differences were not statistically significant ($P>0.05$). Compared with those in original plan, the V_{70}, V_{60}, V_{50} ($t=-2.471, -3.439, -2.376; P<0.05$) and V_{40} ($P>0.05$) of the bladder in automatic plan were lower; and the V_{70}, V_{60}, V_{50} and V_{40} ($t=-2.540, -3.416, -2.666, -2.777; P<0.05$) of the rectum were also decreased. The correlation analysis showed that the differences of the V_{70}, V_{60}, V_{50} and V_{40} of the bladder between automatic plan and original plan were negatively or positively correlated with the degree of overlap (correlation coefficient $=-0.357, -0.976, -0.857, 0.381; P=0.385, 0.000, 0.007, 0.352$), but there was no statistical significance between the differences of V_{70} and V_{40} and the degree

【收稿日期】2021-05-06

【基金项目】安徽省科技重大专项(18030801135); 中国科协青年人才托举工程(2017QNRC001)

【作者简介】潘兴晨, 硕士研究生, 研究方向: 放疗计划的自动计划, E-mail: xcppp@mail.ustc.edu.cn

【通信作者】汪冬, 助理研究员, 研究方向: 放疗计划优化、智能计划, E-mail: 547977312@qq.com

of overlap. **Conclusion** The automatic treatment plan for prostate cancer designed using the precise DVH prediction model based on the degree of overlap between OAR and PTV increases target dose and decreases OAR irradiation dose.

Keywords: prostate cancer; degree of overlap; automatic planning; organs-at-risk; dose-volume histogram

前言

癌症是全球范围内的主要公共卫生问题,已逐渐成为威胁人类生命的最大杀手。调强放疗(Intensity-Modulated Radiotherapy, IMRT)是国内外各放疗中心的标准治疗技术。IMRT计划质量很大程度上依赖于物理师的经验和所花费的时间,严重影响患者的治疗效果,不同物理师制定的放疗计划有差异^[1]。同时放疗技术发展是不均衡的,具体表现为国内外不均衡、城乡不均衡、基层与高级医院的不均衡^[2-3]。放疗计划设计者常常根据临床协议的危及器官(Organs-at-Risk, OAR)剂量限值目标不断地尝试和修改获得较优计划^[4-6]。使用放疗自动计划能让不发达地区或低水平医院制定高质量计划,降低高水平医院制定计划的时间,有效缓解放疗资源特别是人力资源的不平衡性。目前国内外有多家研究机构进行关于IMRT自动计划的研究:Wu等^[7]引入重叠体积直方图(Overlap Volume Histogram, OVH)来描述靶区与OAR的相对位置,通过比较新患者和数据库中患者的OVH来指导自动计划;Zhu等^[8]利用主成分分析方法确定OAR的剂量体积直方图(Dose-Volume Histogram, DVH)和OVH的主成分,同时运用支持向量回归方法建立DVH与OVH主成分之间的数学模型来指导自动计划;Moore等^[9]根据OAR的OVH与其平均剂量之间关系的经验公式来引导计划的自动计划;Skarpmann等^[10]利用DVH的概率诠释,将DVH曲线上各个点的纵坐标定义为剂量高于某值的概率,通过预测剂量分布的概率密度来达到预测DVH的目的,从而引导自动计划;Yuan等^[11]挑选了68例头颈部肿瘤患者,其中35例靶区与单侧腮腺有较大重叠,其余33例则没有重叠,对上述两种情形分别建立了腮腺剂量与解剖结构之间的数学模型(单侧腮腺和双侧腮腺模型),进而引导自动计划。基于放疗计划的现状和我国发展不均衡的问题,本研究提出基于靶区与OAR重叠度的DVH预测自动计划设计,以期望改善现状。对靶区与OAR重叠度进行研究,建立基于靶区与OAR重叠度的精确微分DVH预测模型,并发展脚本式自动计划流程,最后在前列腺癌病例上进行测试与应用评估。通过精准预测OAR的DVH并自动设计计划来提高治疗计划的质量和效率。

1 材料和方法

1.1 前列腺癌放疗计划数据集

随机选取17例前列腺恶性肿瘤患者,年龄为35~75岁。放疗靶区PTV分别在CTV前后、左右、头尾方向各外放0.5~1.0 cm,以保护直肠;OAR包括膀胱、直肠、股骨头等,靶区和OAR均由放疗科经验丰富的主治医师勾画和并由一名医师进行审核。运用ADAC Pinnacle³计划系统进行5野均分的IMRT计划设计,采用直接机器参数优化,最小子野面积和最小机器单元分别为5 cm²和5 MU。

1.2 建立微分DVH的精确数学模型

1.2.1 OAR分割成子块 随机选择数据集中9例作为训练集,其余作为测试集。以膀胱为例,将PTV外扩到覆盖OAR范围内,依次分割成层厚3 mm的子块($A_i, i=0, 1, 2, 3, \dots$, 其中 A_0 为PTV与膀胱重叠部分),见图1;直肠等其它OAR作同样处理。使用Pinnacle脚本^[12]编码后导出各OAR所有子块 A_i 的微分DVH。

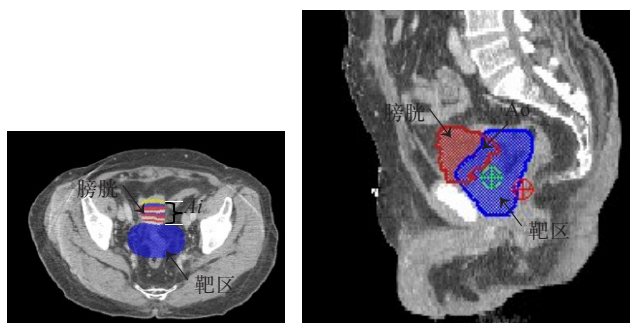


图1 膀胱的子块分割图

Fig.1 Sub-block segmentation of the bladder

1.2.2 建立数学模型拟合子块 A_i 微分DVH 由于每个 A_i 的微分DVH均呈现偏正态分布^[12-14],本研究拟用如下偏正态高斯函数拟合各 A_i 的 D_i (D_i 表示子块的微分DVH):

$$\Phi(p_1, p_2, p_3, a) = \frac{a}{\pi p_2} \exp\left(-\frac{(D - p_1)^2}{2p_2^2}\right) \int_{-\infty}^{p_3(D - p_1)/p_2} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt \quad (1)$$

其中, D 为 A_i 的剂量; p_1 为 D_i 的中心剂量; p_2 为 D_i 曲线半高宽; p_3 与 D_i 曲线的尾部形状有关; a 为拟合系数。以OAR中膀胱为例,图2为膀胱和靶区的重叠度示意图。图3为使用该函数拟合9例患者 $T_i(i=1, 2, \dots$

8、9)膀胱子块 $A_i(i=1、2、3、4)$ 的 D_i 分布,其中黑色的点表示原始计划数据,蓝线表示拟合曲线。

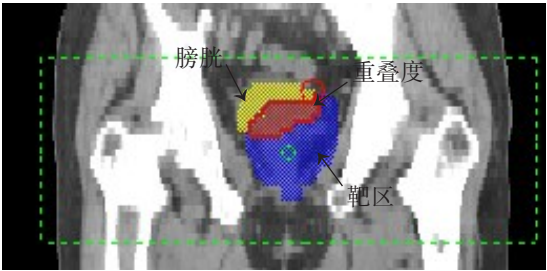


图2 膀胱和靶区的重叠度
Fig.2 Degree of overlap between the bladder and planning target volume (PTV)

1.2.3 OAR与靶区的重叠度分析 图3中的膀胱 A_i 的微分DVH拟合结果显示:随着离靶区越来越远,膀胱子块的微分DVH的高度是逐渐降低的,与临床实践相符,即距离靶区越远的膀胱区域受到的辐照剂量越低。但是病人 $T_6、T_7、T_8、T_9$ 结果异常。结合表1,从靶区与OAR之间的重叠度来分析以上规律。 T_1 的重叠度为0.36%,与其他病人相比,重叠度非常小,DVH的高度下降很明显; $T_2、T_3、T_4$ 和 T_5 的重叠度分别为3.66%、4.48%、6.55%和9.60%,此时由于靶区与膀胱重叠度较小,靶区的高剂量区对膀胱的剂量分布影响较小,规律正常;对于 $T_6、T_7、T_8$ 和 T_9 的重叠度分别为11.10%、14.31%、20.00%和23.82%,此时靶区与膀

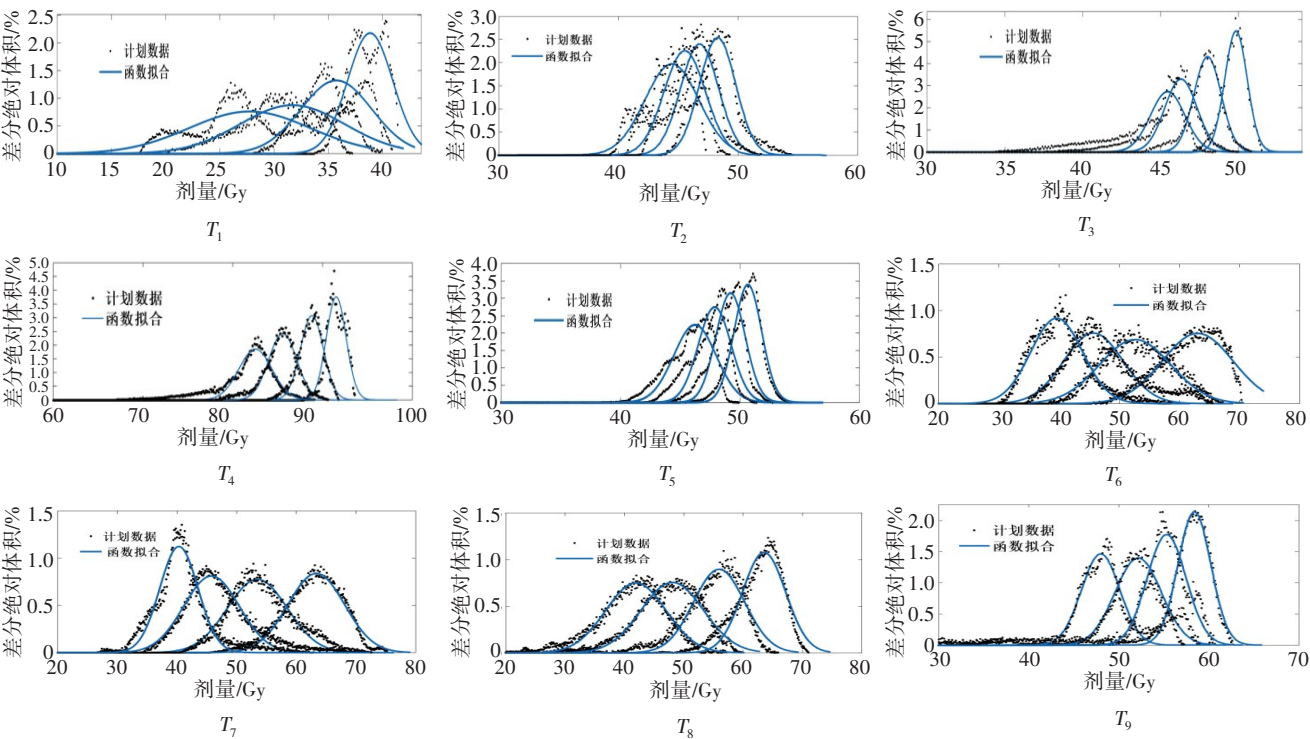


图3 9例病人膀胱子块 $A_i(i=1、2、3、4)$ 拟合
Fig.3 Fitting of bladder sub-blocks $A_i(i=1, 2, 3, 4)$ in 9 patients

胱重叠度较大,在维持靶区的高剂量的同时,高剂量区会对膀胱的剂量分布有较大影响。直肠等其他OAR也有类似情况。

1.3 基于微分DVH预测模型的自动计划设计

利用初步建立的每个OAR所有 A_i 的微分DVH初始数学模型,应用式(1)得到预测训练集9例病人OAR各 A_i 的DVH,并将得到OAR的DVH与原临床计划病人OAR的DVH进行比较,若预测DVH优于临床DVH,则采用预测子块DVH指导重新设计治疗计划,通过分析相关参数,获得数学模型的自动计划设计^[15-16]。

应用Pinnacle³上的脚本程序处理测试集中的8

例病人影像,得到膀胱、直肠等OAR各 A_i 的微分DVH。应用编写的Matlab程序获取数据,结合各 A_i 微分DVH精确模型预测膀胱、直肠等OAR的子块DVH,并从中选取优于临床DVH的处方剂量点作为OAR逆向优化的目标函数^[17],进而得到自动计划。本研究的自动计划流程见图4。

1.4 自动计划结果评估方案

1.4.1 评价标准选取 比较分析两种治疗计划的差异^[18-19],主要从几个方面考虑:适形度指数(CI)、均匀性指数(HI)、冷热剂量点、等剂量线、DVH曲线、临床上关注的剂量体积参数包括靶区 $PTV_{100\%}$ (100%剂量线包绕的靶区体积)以及膀胱等的 $V_{70}、V_{60}、V_{50}、V_{40}$

表1 训练集中的膀胱与靶区的重叠度

Tab.1 Degree of overlap between the bladder and PTV in training set

病人	膀胱在靶区内的体积/cm ³	靶区总体积/cm ³	重叠度/%
T ₁	6.14	1 693.00	0.36
T ₂	50.59	1 389.00	3.66
T ₃	45.30	1 012.30	4.48
T ₄	15.28	233.10	6.55
T ₅	101.71	1 059.80	9.60
T ₆	18.67	168.20	11.10
T ₇	23.35	163.15	14.31
T ₈	26.69	133.87	20.00
T ₉	63.56	266.79	23.82

(其中V₇₀代表70 Gy剂量线对应的膀胱体积,其余类似)。CI和HI的计算公式如下:

$$CI = \frac{V_{PTV,REF}}{V_{PTV}} \times \frac{V_{PTV,REF}}{V_{REF}}$$

(2)

$$HI = \frac{D_{2\%} - D_{98\%}}{D_{50\%}}$$

(3)

其中,V_{PTV,REF}为处方剂量线所对应的靶区体积;V_{PTV}为靶区体积;V_{REF}为处方剂量线所对应的总体积;D_{2%}是2%靶区体积受照的剂量;D_{50%}为50%靶区体积受照的剂量;D_{98%}是98%靶区体积受照的剂量。

1.4.2 统计学分析 上述所用到的自动计划数据与原手工计划数据用均数±标准差表示,采用SPSS 25.0

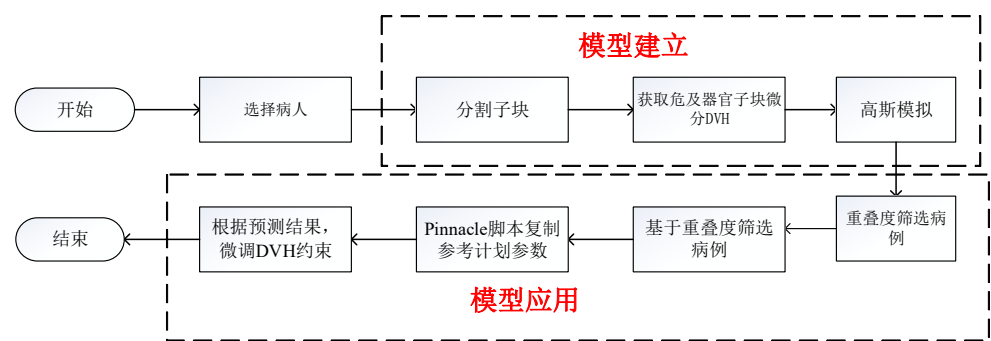


图4 基于OAR和靶区重叠度的自动治疗计划设计

Fig.4 Automatic treatment planning based on the degree of overlap between organs-at-risk (OAR) and PTV

统计学分析软件对两组计划数据进行配对*t*检验,*P*<0.05说明差异有统计学意义。对两组计划指标数据的差值与放疗计划的重叠度做相关性分析,两组数据均为连续变量,采用SPSS 25.0统计学分析软件对两组数据进行Spearman相关系数分析^[20],*P*<0.05说明两者之间的相关关系有统计学意义。

2 结果与讨论

对测试集进行与训练集相同的前期处理操作,包括靶区外扩、获取OAR子块,然后通过脚本预测DVH,制定计划并根据子块DVH预测结果修改约束。测试集中的病例按照膀胱与靶区的重叠度大小排列如表2。

自动计划和原手工计划中的等剂量线均能包绕要求的靶区(图5);图6为自动计划与原手工计划的DVH。图5和图6是同一病例。与原手工计划的剂量分布图相比,自动计划的靶区剂量均匀性和适形度都能达到临床处方要求,并优于原手工计划。自动计划的HI稍优于原手工计划的HI,分别为0.11±0.03和0.12±0.03,两组间的差异具有统计学意义(*t*=-1.871, *P*=0.014);自动计划的CI也稍优于原手工计划的CI,分别为0.84±0.29和0.83±0.27,两组间的差异具有统计学意义(*t*=3.742, *P*=0.007)。自动计划靶区的V_{100%}

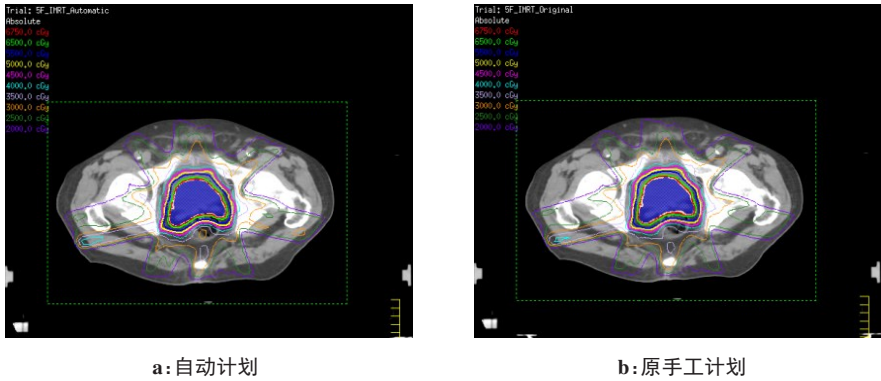
表2 测试集中膀胱与靶区的重叠度

Tab.2 Degree of overlap between the bladder and PTV in test set

病人	膀胱在靶区内体积/cm ³	膀胱的总体积/cm ³	重叠度/%
B ₁	17.27	268.27	6.43
B ₂	18.63	242.31	7.69
B ₃	19.59	186.82	10.45
B ₄	28.07	203.86	13.77
B ₅	58.56	360.46	16.25
B ₆	26.88	134.09	20.04
B ₇	79.97	299.77	26.68
B ₈	84.12	242.31	34.72

稍差于原手工计划靶区的V_{100%},自动计划靶区的V_{95%}稍优于原手工计划靶区的V_{95%},但是两个指标的组间差异无统计学意义(*t*=-0.539, 0.289; *P*=0.606, 0.781)。靶区V_{100%}、V_{95%}、HI和CI的统计学结果见表3。

如表4所示,与原手工计划相比,自动计划的膀胱V₇₀、V₆₀、V₅₀以及V₄₀分别下降5.8%、4.1%、4.0%、6.9%,除膀胱V₄₀比较无统计学意义外(*t*=-2.193; *P*=0.064),膀胱的其它指标V₇₀、V₆₀、V₅₀的比较均具有统计学意义(*t*=-2.471、-3.439、-2.376; *P*=0.043、0.011、0.049)。自动



a: 自动计划
b: 原手工计划

图 5 两组计划的等剂量曲线

Fig.5 Isodose curves between automatic plan and original plan

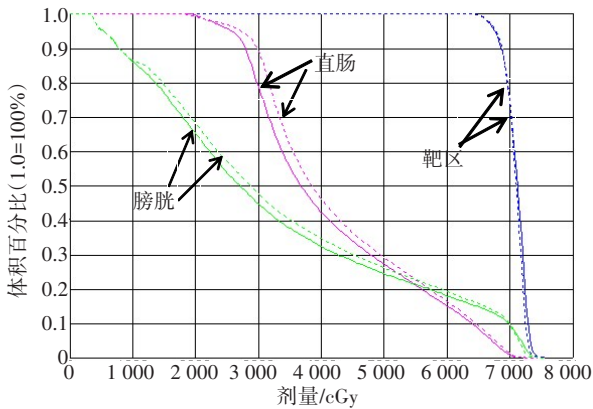


图 6 自动计划(细实线)与原手工计划(细虚线)的 DVH

Fig.6 Dose–volume histogram of automatic plan (thin solid line) and original plan (thin dotted line)

表 3 自动计划和原手工计划的靶区剂量学参数比较($\bar{x} \pm s$)

Tab.3 Dosimetric comparison of PTV between automatic plan and original plan (*Mean±SD*)

参数	自动计划	原手工计划	t 值	P 值
HI	0.11±0.03	0.12±0.03	-1.871	0.014
CI	0.84±0.29	0.83±0.27	3.742	0.007
V _{100%} /%	95.49±0.53	95.64±0.70	-0.539	0.606
V _{95%} /%	99.50±0.32	99.48±0.32	0.289	0.781

计划的直肠 V₇₀、V₆₀、V₅₀ 以及 V₄₀ 分别下降 11.0%、4.5%、2.5%、7.1% ($t=-2.540$ 、 -3.416 、 -2.666 、 -2.777 ; $P=0.039$ 、 0.011 、 0.032 、 0.027), 差异具有统计学意义, 其中直肠的 V₇₀ 较原手工计划相比明显下降。

3 讨论

本研究利用基于重叠度的自动计划设计来实现前列腺肿瘤的自动计划, 实验结果表明自动计划与原手工计划的等剂量曲线均能较好地包绕靶区, 靶区剂量的均匀性和适形度均在临床接受范围内, OAR 的剂量也在临床接受的范围内。但是与原手工

表 4 自动计划和原手工计划的 OAR 剂量学参数比较($\bar{x} \pm s$)

Tab.4 Dosimetric comparison of OAR between automatic plan and original plan (*Mean±SD*)

OAR	参数	自动计划	原手工计划	t 值	P 值
膀胱	V ₇₀	9.51±4.49	10.10±4.29	-2.471	0.043
	V ₆₀	25.81±9.25	26.90±8.96	-3.439	0.011
	V ₅₀	38.52±11.20	40.13±11.19	-2.376	0.049
	V ₄₀	51.63±16.34	55.45±17.70	-2.193	0.064
直肠	V ₇₀	2.19±2.46	2.46±2.66	-2.540	0.039
	V ₆₀	24.92±6.11	26.10±5.72	-3.416	0.011
	V ₅₀	41.82±10.00	42.88±9.50	-2.666	0.032
	V ₄₀	61.62±15.31	66.33±15.47	-2.777	0.027

计划相比, 对于膀胱的改善数值确是不一样, 膀胱剂量参数差异具体见表 5。

表 5 自动计划和原手工计划的膀胱剂量差异(%)

Tab.5 Differences in bladder dose between automatic plan and original plan (%)

剂量学指标	病人							
	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅	B ₆	B ₇	B ₈
V ₇₀	1.12	0.09	1.52	0.60	1.24	-0.24	-0.23	0.61
V ₆₀	2.61	1.47	1.60	1.35	1.10	0.59	0.26	-0.28
V ₅₀	5.83	1.64	2.21	1.87	0.08	1.04	0.48	-0.27
V ₄₀	15.79	2.42	2.91	1.69	3.30	1.83	2.46	0.17

根据 Spearman 相关系数分析所示, 自动计划和原手工计划的膀胱 V₇₀、V₆₀ 和 V₅₀ 的差异值与重叠度呈负相关(相关系数=-0.357、-0.976、-0.857; $P=0.385$ 、 0.000 、 0.007), 除了 V₇₀ 的差异值与重叠度无统计学意义外, V₆₀ 和 V₅₀ 的差异值与重叠度都有统计学意义, 与重叠度呈强负相关关系。自动计划和原手工计划的膀胱 V₄₀ 的差异值与重叠度呈弱正相关(相关系

数=0.381; $P=0.352$), 无统计学意义。

对于有统计学意义的膀胱 V_{60} 和 V_{50} 来说, 随着重叠度越来越大, 在维持靶区的高剂量的同时, 影响了OAR的剂量分布, 导致OAR的剂量参数所能改善的剂量数值越来越小。所以, 对于靶区与OAR重叠区域较大时, 计划优化参数的选取应当谨慎。直肠等OAR也有类似结论, 在此不再讨论。

4 结 论

在对前列腺癌症的病例研究中, 靶区与OAR的重叠度干扰了微分DVH的变化规律。以微分DVH为基础, 通过使用基于重叠度的自动计划设计, 可以在满足靶区高剂量的同时, 大幅度减少周围OAR(如膀胱和直肠)剂量区域中的照射剂量。由于患者靶区与OAR的重叠度不同, 导致最终对原手工计划所能改善的剂量数值是不一样的, 靶区与OAR重叠度越小, 利用提出来的自动计划算法对原手工计划改善的剂量数值就越大。对于重叠度较小的病例, 采用本文自动计划方法, 可以得到较好计划结果, 供用户参考。

本研究未考虑靶区体积、各OAR之间的照射剂量相互影响等因素, 在后续工作中会进一步分析不同病例、不同OAR、不同重叠度对结果的影响。

【参考文献】

- [1] ZAREPISHEH M, LONG T, LI N, et al. A DVH-guided IMRT optimization algorithm for automatic treatment planning and adaptive radiotherapy replanning[J]. Med Phys, 2014, 41(6): 061711.
- [2] 郎锦义, 王培, 吴大可, 等. 2015年中国大陆放疗基本情况调查研究[J]. 中华放射肿瘤学杂志, 2016, 25(6): 541-545.
LANG J Y, WANG P, WU D K, et al. Investigation and study on the basic situation of radiotherapy in mainland China in 2015[J]. Chinese Journal of Radiation Oncology, 2016, 25(6): 541-545.
- [3] SIGEL R L, MILLER K D, JEMAL A. Cancer statistics, 2017[J]. CA: a cancer journal for clinicians, 2017, 67(1): 7-30.
- [4] MOYNIHAN G P, BOWERS J H, FONSECA D J, et al. A knowledge-based approach to maintenance project planning[J]. Expert Syst, 2010, 19(2): 88-98.
- [5] TOL J P, DELANEY A R, DAHELE M, et al. Evaluation of a knowledge-based planning solution for head and neck cancer[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2015, 91(3): 612-620.
- [6] CASTRICONI R, FIORINO C, BROGGI S, et al. Comprehensive intra-institution stepping validation of knowledge-based models for automatic plan optimization[J]. Phys Med, 2019, 57: 231-237.
- [7] WU B B, RICCHETTI F, SANGUINETI G, et al. Patient geometry-driven information retrieval for IMRT treatment plan quality control[J]. Med Phys, 2009, 36(12): 5497-5505.
- [8] ZHU X, GE Y, LI T, et al. A planning quality evaluation tool for prostate adaptive IMRT based on machine learning[J]. Med Phys, 2011, 38(2): 719-726.
- [9] MOORE K L, BRAME R S, LOW D. Experience-based quality control of clinical intensity-modulated radiotherapy planning[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2011, 81(2): 545-551.
- [10] SKARPMAN MUNTER J, SJÖLUND J. Dose-volume histogram prediction using density estimation[J]. Phys Med Biol, 2015, 60(17): 6923-6936.
- [11] YUAN L, WU Q J, YIN F F, et al. Incorporating single-side sparing in models for predicting parotid dose sparing in head and neck IMRT[J]. Med Phys, 2014, 41(2): 28-33.
- [12] 周解平, 彭昭, 宋宇宸, 等. 基于危及器官DVH预测模型的前列腺癌自动计划研究[J]. 中华放射肿瘤学杂志, 2019, 28(7): 536-542.
ZHOU J P, PENG Z, SONG Y C, et al. The study of automatic treatment planning of prostate cancer based on DVH prediction models of organs at risk[J]. Chinese Journal of Radiation Oncology, 2019, 28(7): 536-542.
- [13] BASSO R M, LACHOS V H, CABRAL C R, et al. Robust mixture modeling based on scale mixtures of skew-normal distributions[J]. Comput Stat Data Anal, 2010, 54(12): 2926-2941.
- [14] WANG Y, HEIJMEN B J, PETIT S F. Prospective clinical validation of independent DVH prediction for plan QA in automatic treatment planning for prostate cancer patients[J]. Radiother Oncol, 2017, 125(3): 500-506.
- [15] WANG S, ZHENG D, ZHANG C, et al. Automatic planning on hippocampal avoidance whole-brain radiotherapy[J]. Med Dosim, 2017, 42(1): 63-68.
- [16] FOSTER C C, LEE A Y, FURTADO L V, et al. Incorporating FDG-PET-defined pelvic active bone marrow in the automatic treatment planning process of anal cancer patients undergoing chemoradiation[J]. Cancer Med, 2017, 6(11): 2497-2506.
- [17] HRINIVICH W T, HOOVER D A, SURRY K, et al. Simultaneous automatic segmentation of multiple needles using 3D ultrasound for high-dose-rate prostate brachytherapy[J]. Med Phys, 2017, 44(4): 1234.
- [18] CHANG X, LI K, HU W. SU-F-T-357: dosimetric comparison of automatic imrt planning and manual IMRT plan for head and neck cancer[J]. Med Phys, 2016, 43(6): 3545.
- [19] FUNG N T C, HUNG W M, SZE C K, et al. Automatic segmentation for adaptive planning in nasopharyngeal carcinoma IMRT: time, geometrical, and dosimetric analysis[J]. Med Dosim, 2020, 45(1): 60-65.
- [20] SAEBYE C K, KELLER J, BAAD-HANSEN T. Validation of the Danish version of the musculoskeletal tumour society score questionnaire[J]. World J Orthoped, 2019, 10(1): 26-35.

(编辑:谭斯允)