

放射肿瘤学专题

· 放射技术 ·

## 补偿膜下空腔对放疗计划系统计算浅层剂量的影响\*

孔栋, 孔旭东, 惠琳, 魏贤顶, 赵于天, 杨波<sup>△</sup>

214062 江苏 无锡, 江南大学附属医院 肿瘤放疗科

**[摘要]** **目的:** 基于蒙特卡罗方法研究补偿膜下空腔对放疗计划系统计算浅层组织剂量的影响, 为放疗定位及计划制定和评估提供参考与依据。**方法:** 在 Eclipse 和 XIO 中分别构建上覆不含或含有不同大小空腔的 1 cm 厚水膜的 30 cm × 30 cm × 30 cm 水模体, 上表面位于源轴距并垂直于射野中心轴, 分别采用各向异性分析算法和超级迭加算法计算不同补偿膜时水模体中心轴和浅层 x 轴上剂量分布; 用 Geant4 构建加速器模型和相同水模体及水膜, 并计算相同位置剂量分布; 以 Geant4 结果为基准评估空腔对 Eclipse 和 XIO 的影响。**结果:** 补偿膜下有空腔时 Eclipse 和 XIO 会高估空腔下浅层剂量; 空腔厚度不大于 0.5 cm 时, 影响约 2%, 厚度增加影响迅速增加; 空腔面积较小, Eclipse 和 XIO 会高估对应区域剂量, 随面积增加, 对应区域所受影响减小, 影响较大区域外移; 空腔的影响主要在 0.5 cm 深度内, 随深度增加影响迅速减小。**结论:** 补偿膜下空腔会使 Eclipse 和 XIO 高估浅层剂量, 定位时应将空腔厚度控制在 0.5 cm 以内, 面积越小越好; 空腔较大建议重新定位。

**[关键词]** 补偿膜; 空腔; Geant4; 治疗计划系统; 浅层剂量

**[中图分类号]** R730.55 **[文献标志码]** A doi:10.3969/j.issn.1674-0904.2021.01.011

**引文格式:** Kong D, Kong XD, Hui L, *et al.* Effect of cavity under bolus on shallow dose calculated by radiotherapy planning system[J]. J Cancer Control Treat, 2021, 34(1): 64-69. [孔栋, 孔旭东, 惠琳, 等. 补偿膜下空腔对放疗计划系统计算浅层剂量的影响[J]. 肿瘤预防与治疗, 2021, 34(1): 64-69.]

## Effect of Cavity under Bolus on Shallow Dose Calculated by Radiotherapy Planning System

Kong Dong, Kong Xudong, Hui Lin, Wei Xianding, Zhao Yutian, Yang Bo

Department of Radiation Oncology, Affiliated Hospital of Jiangnan University, Wuxi 214062, Jiangsu, China

Corresponding author: Yang Bo, E-mail: wuxiyangbo@163.com

This study was supported by grants from Wuxi Municipal Health Commission (No. FZXK004, No. Q201917 and No. ZM012).

**[Abstract]** **Objective:** To study the effect of cavity under bolus on the shallow dose base on Monte Carlo methods. **Methods:** A 30 cm × 30 cm × 30 cm water phantom was constructed with a water film (with or without different cavities) of 1 cm thick adjacent to the upper surface of it in the Eclipse and XIO Treatment Planning Systems, respectively. The upper surface of the water phantom was located at source-axis distance and was perpendicular to the central axis of the field. Doses of central axis and x-axis of different models were calculated with analytical anisotropic algorithm and superposition algorithm, respectively. The accelerator model and the same water phantom with bolus models were constructed in Geant4, doses of same positions were also calculated with it. Based on the Geant4 results, the effects of different cavities on dose calculation with Eclipse and XIO were evaluated. **Results:** Eclipse and XIO would overestimate the shallow dose for cavity under bolus. If the thickness of cavity was not greater than 0.5 cm, the calculation by Eclipse and XIO was affected by about 2%; as the thickness increased, the effect on them raised rapidly. If the area of a cavity was small, Eclipse and XIO would overestimate the dose of the area; as the area increased, the effect on central region decreased; the region which was badly affected gradually moved out until the edge of the field. The effect of cavities on Eclipse and XIO mainly occurred in the region not deeper

**[收稿日期]** 2020-08-19 **[修回日期]** 2020-12-11

**[基金项目]** \* 无锡市医学发展学科(编号:A2017613); 无锡市卫生健康委科研青年项目(编号:Q201917); 无锡市卫生健康委转化医学项目(编号:ZM012)

**[通讯作者]** <sup>△</sup> 杨波, E-mail: wuxiyangbo@163.com

ness increased, the effect on them raised rapidly. If the area of a cavity was small, Eclipse and XIO would overestimate the dose of the area; as the area increased, the effect on central region decreased; the region which was badly affected gradually moved out until the edge of the field. The effect of cavities on Eclipse and XIO mainly occurred in the region not deeper

than 0.5 cm; as the depth increased, the effect decreased rapidly. Conclusion: Cavity under bolus would allow Eclipse and XIO to overestimate the shallow dose. When positioning, the thickness of the cavity should be controlled within 0.5cm, and the smaller the area is, the better. It is recommended to renew the localization if the cavity is large.

[Key words] Bolus; Cavity; Geant4; Treatment planning system; Shallow dose

作为肿瘤三大治疗手段之一,放射治疗已进入精确定位、精确计划、精确治疗的“三精”时代,靶区及危及器官剂量计算的准确性正是精确计划的最基本要求。对浅表肿瘤或侵犯浅表组织的肿瘤实施放疗时,为了克服 MV 级 X 射线剂量建成效应,使肿瘤区满足剂量要求,需要在体表添加补偿膜,补偿膜的临床应用及效果一直是放疗研究者关心的问题<sup>[1-2]</sup>。目前补偿膜临床应用常见的有两种方式,一种是制定计划时加“pretend”补偿膜<sup>[3]</sup>,另一种是定位时加补偿膜,将其作为患者 CT 的一部分制定计划。研究表明后一种方式与实际更加相符,所制定计划更贴合实际<sup>[4]</sup>。但在添加补偿膜时,补偿膜与体表之间会存在一些空腔并反映在定位 CT 上,研究表明空腔会影响放射治疗计划系统(treatment planning system, TPS)对其边缘剂量计算的准确性<sup>[5]</sup>,而补偿膜下空腔对体表剂量计算的影响将直接关系到肿瘤剂量的准确性,因此研究这些空腔对 TPS 计算浅层组织剂量影响有重要意义。蒙特卡罗方法作为剂量计算的金标准,为其他算法的比较提供了准确、公平的平台<sup>[6]</sup>,Geant4<sup>[7]</sup>作为一种开源的蒙特卡罗软件包在放疗中多有应用<sup>[8-11]</sup>。本文基于蒙特卡罗软件包 Geant4 对比了补偿膜下不同大小空腔对本单位两套 TPS——Eclipse (v8.6) 和 XIO (v4.8) 计算浅表组织剂量的影响,对补偿膜的应用和相关计划制定及评估有一定的指导意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

Eclipse 治疗计划系统(v8.6),XIO 治疗计划系统(v4.8),Visual Studio 2013,Geant4 蒙特卡罗软件包(v10\_02\_p02),瓦里安 2300CD 医用直线加速器,IBA 蓝水箱剂量测量系统,OriginPro 8。

### 1.2 TPS 结果获取

在 Eclipse 和 XIO 中构建层厚 0.1 cm、大小 30 cm × 30 cm × 30 cm 的水模体 CT,依研究目的,在水模体上表面分别设置三组替代补偿膜的大小 30 cm × 30 cm、厚 1 cm 的水膜,依次为对照组、厚度组和面积组(图 1)。对照组水膜紧贴水模体上表面;厚度组在水模体上表面中心处水膜下构建边长 2.0 cm 的正方形空腔,厚度依次为 0.2 cm、0.3 cm、0.5 cm、0.7 cm 和 0.9 cm;面积组在水模体上表面中心处水膜下构建厚度 0.9 cm 的正方形空腔,边长依次为 2.0 cm、4.0 cm、8.0 cm、10.0 cm、12.0 cm 和 15.0 cm。水模体和水膜 CT 值指定为 0,空腔 CT 值指定为 -1 000。水模体上表面位于加速器源轴距且与射线入射方向垂直,计算网格为 0.1 cm × 0.1 cm × 0.1 cm,射野面积为 10 cm × 10 cm,跳数 100 MU,分别采用各向异性分析算法(analytical anisotropic algorithm, AAA)和超级迭加算法(Superposition)计算模体中剂量分布。以 0.2 cm × 0.2 cm 分辨率分别导出通过射野中心轴的冠状面剂量分布。

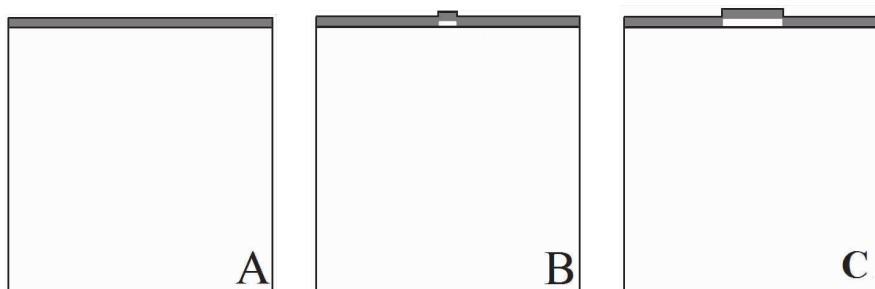


图 1 空腔模型

Figure 1. Models of Cavities

A: Model of the control group; B: Model of the thickness group; C: Model of the area group.

### 1.3 Geant4 模型构建和剂量计算

基于 Varian 公司提供模型,以 Geant4 构建能量

6 MV、射野面积 10 cm × 10 cm 的 2300CD 医用直线加速器机头模型,物理模型选用 G4EmPenelope

Physics, 截止射程 1 mm, 计算 30 cm × 30 cm × 30 cm 水模体中百分深度剂量 (percentage depth dose, PDD) 和 10 cm 深度处离轴比 (off-axis ratio, OAR), 与 IBA 蓝水箱测量数据对比验证机头模型准确性 (图 2)。在 Geant4 中分三组模拟, 每组初始粒子 1 × 10<sup>8</sup>, 每次产生 30 个相同粒子, 记录到达 Jaw 上粒子信息作为相空间文件 1; 以相空间文件 1 作为粒子源, 依次读取其中粒子信息, 每次产生 10 个相同粒子, 记录到达 Jaw 下粒子信息作为相空间文件 2。

分别构建与 TPS 中相同的水模体、补偿膜及空腔模型, 水模体和补偿膜材质为水, 空腔材质为空气, 在水模体中心轴及 0.1 cm、0.3 cm、0.5 cm、0.9 cm 和 1.5 cm 深度处 x 方向上 (-8 cm, 8 cm) 设置 0.2 cm × 0.2 cm × 0.2 cm 的体素以记录剂量沉积。每组模型均分三组进行模拟, 以相空间文件 2 为粒子源, 依次读取粒子信息, 每次产生 50 个相同粒子并模拟其在模型中的输运过程, 分别获取体素中剂量沉积。射野范围内剂量沉积误差小于 2%。

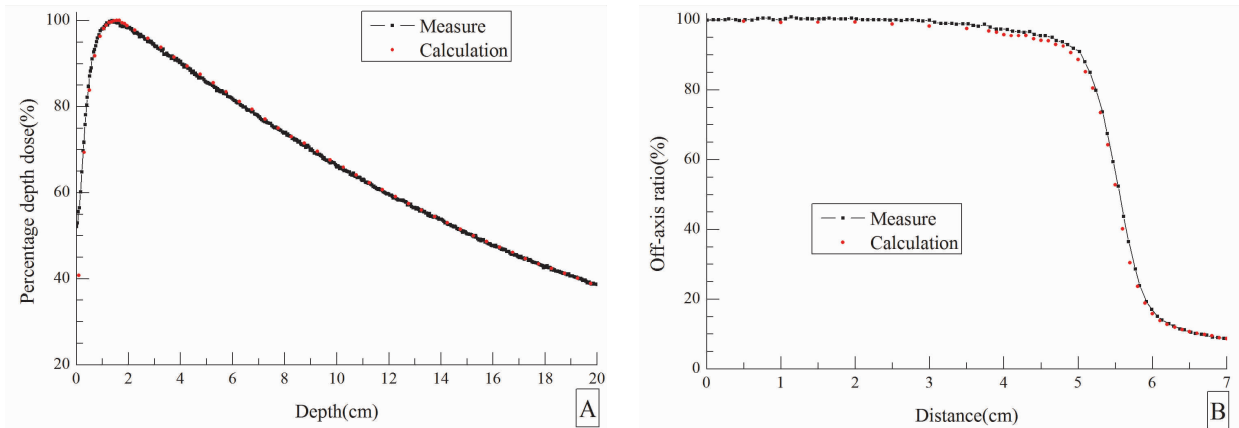


图 2 Geant4 计算数据与测量数据对比

Figure 2. Comparison of Geant4-Calculated Data and IBA Blue Water Phantom Tank-Measured Data

A. Percentage depth dose; B. Off-axis ratio.

### 1.4 数据处理及绘图

Geant4 计算数据和 TPS 导出数据均保存为 ASCII 文件, 将其拷贝到 Excel 进行统计分析。为进一步减小模型差异, 本研究采用相对深度剂量差 (difference of relative depth dose, DRDD) [式(1)] 和相对离轴剂量差 (difference of relative off-axis dose, DROAD) [式(2)] 分别描述空腔对中心轴和浅层侧向 profile 计算带来的影响, 其越接近 0 说明 TPS 计算值与 Geant4 越接近, 大于 0 说明 TPS 计算值高于 Geant4, 小于 0 说明 TPS 计算值低于 Geant4。相关图片均由 OriginPro 8 软件绘制。

$$DRDD = \left[ \left( \frac{D_{C,d,TPS}}{D_{d,TPS}} \right) - \left( \frac{D_{C,d,MC}}{D_{d,MC}} \right) \right] \times 100\% \quad (1)$$

式中,  $D_{C,d,TPS}$  和  $D_{d,TPS}$  分别为含空腔和不含空腔时深度 d 处 TPS 计算值;  $D_{C,d,MC}$  和  $D_{d,MC}$  分别为含空腔和不含空腔时深度 d 处 Geant4 计算值。

$$DROAD = \left[ \left( \frac{D_{C,p,TPS}}{D_{p,TPS}} \right) - \left( \frac{D_{C,p,MC}}{D_{p,MC}} \right) \right] \times 100\% \quad (2)$$

式中,  $D_{C,p,TPS}$  和  $D_{p,TPS}$  分别为含空腔和不含空腔时 p 处 TPS 计算值;  $D_{C,p,MC}$  和  $D_{p,MC}$  分别为含空腔和

不含空腔时 p 处 Geant4 计算值。

## 2 结果

### 2.1 对照组结果

无空腔时, Eclipse 和 XIO 与 Geant4 计算所得 PDD 差异在 2% 以内 (图 3A), 0.1 cm 深度处 OAR 差异在射野范围内也均在 2% 以内 (图 3B)。因此模型几何结构和所用参数合理。

### 2.2 空腔厚度的影响

由表 1 知, 补偿膜下空腔会导致两套 TPS 高估浅表剂量, 空腔厚度对二者计算浅层剂量影响相似, 空腔厚度 ≤ 0.5 cm 时, 对中心浅层剂量计算影响很小, 即使 0.1 cm 深度处影响也仅 2% 左右; 但随着其厚度增加, 对中心浅层剂量计算影响逐渐增加, 其中 Eclipse 所受影响大于 XIO。由图 4 知, 空腔厚度主要影响 TPS 对水模体浅层剂量计算的准确性, 随水模体深度增加, 影响迅速减小, 即使对于厚度为 0.9 cm 的空腔, 在水下 0.5 cm 处影响也只有 2% 左右, 在深度较大处 Eclipse 表现略好于 XIO。

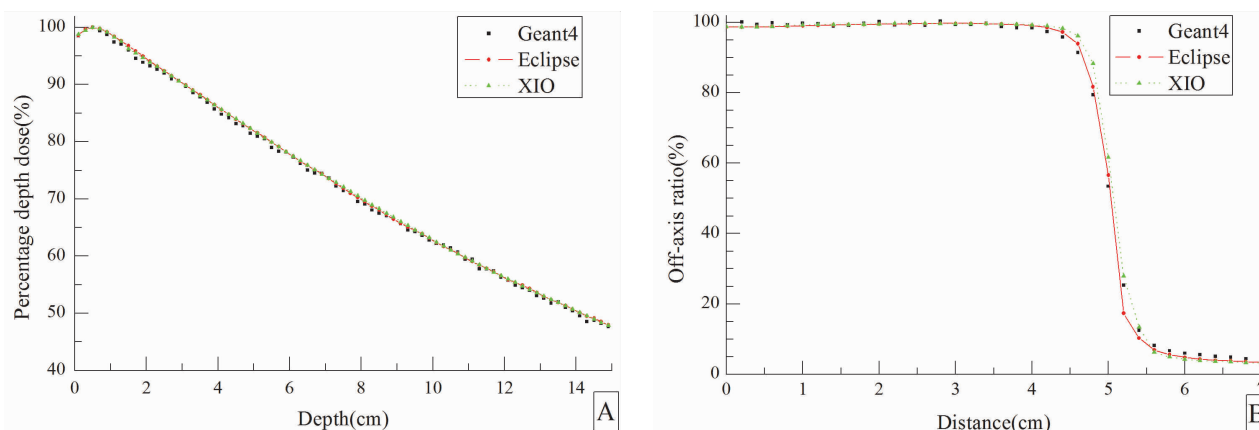


图 3 无空腔时 Geant4 与 TPS 计算结果对比

Figure 3. Comparison of Geant4-Calculated Results and TPS-Calculated Results without Cavity

A. Percentage depth dose; B. Off-axis ratio at the 0.1 cm depth.

TPS: Treatment planning system.

表 1 不同深度空腔下 0.1 cm 深度处相对深度剂量差

Table 1. Difference in Relative Depth Dose at the 0.1 cm Depth in Cavities of Different Depths

Planning system	Depth of cavity (cm)				
	0.2	0.3	0.5	0.7	0.9
Eclipse (%)	1.60 ± 0.88	1.53 ± 0.96	1.95 ± 1.68	5.06 ± 0.89	7.81 ± 0.91
XIO (%)	1.70 ± 0.88	1.63 ± 0.96	2.45 ± 1.68	4.08 ± 0.89	5.75 ± 0.91

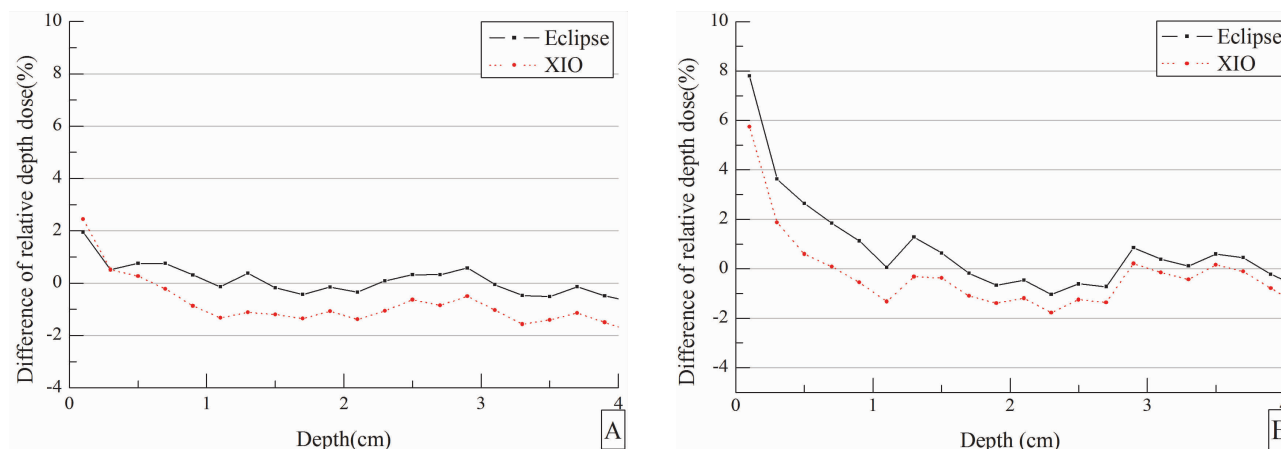


图 4 不同厚度空腔下 Eclipse 和 XIO 相对深度剂量差对比

Figure 4. Comparison of DRDD with Cavities of Different Thicknesses Calculated by Eclipse and XIO

A. Cavity thickness is 0.5 cm; B. Cavity thickness is 0.9 cm.

DRDD: Difference of relative depth dose.

### 2.3 空腔面积的影响

由表 2 知,空腔面积对两套 TPS 计算浅表剂量影响相似,随空腔面积增加,对中心轴浅表剂量影响减小,面积较小时 XIO 优于 Eclipse,而面积较大时, Eclipse 优于 XIO。从图 5 可以看出,空腔面积对中心轴深度剂量影响较小, Eclipse 表现略优于 XIO。

由图 6 知,随空腔面积增加,浅层影响较大区域逐渐外移, Eclipse 在外周区域所受影响要大于 XIO;对中心区域影响逐渐趋于稳定,二者均在 2% 左右,但 Eclipse 略好于 XIO,在离轴距离接近 5.0 cm 时波动较大,可能由于蒙特卡洛计算误差所致。

表 2 不同空腔面积下 0.1 cm 深度处相对深度剂量差

Table 2. Difference in Relative Depth Dose at the 0.1 cm Depth in Cavities of Different Areas

Planning system	Cavity of area (cm <sup>2</sup> )					
	2 × 2	4 × 4	8 × 8	10 × 10	12 × 12	15 × 15
Eclipse (%)	7.81 ± 0.91	2.66 ± 0.88	1.03 ± 1.24	0.56 ± 1.53	-0.14 ± 0.94	0.06 ± 1.37
XIO (%)	5.75 ± 0.91	4.25 ± 0.88	2.62 ± 1.24	2.84 ± 1.53	2.25 ± 0.94	2.44 ± 1.37

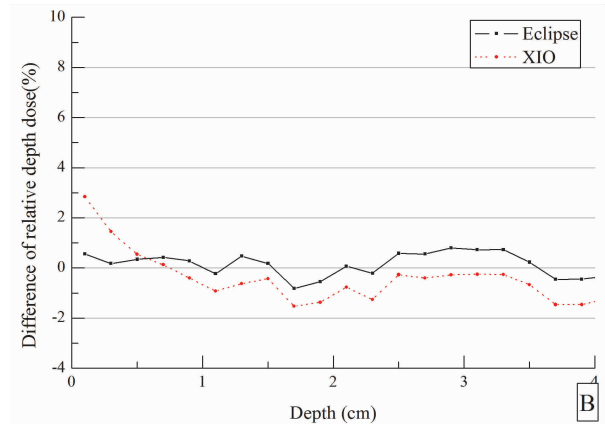
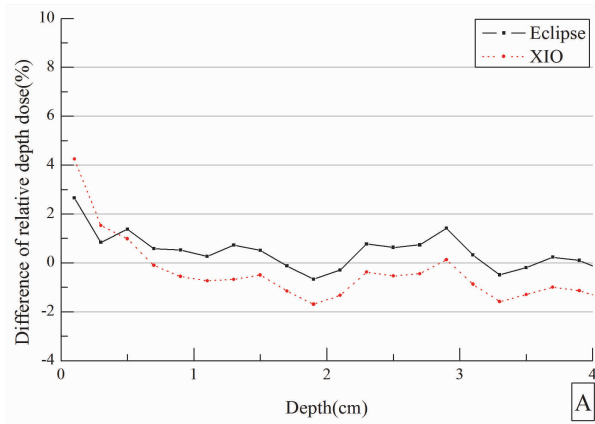


图 5 不同面积空腔下 Eclipse 和 XIO 相对深度剂量差对比

Figure 5. Comparison of DRDD with Cavities of Different Areas Calculated by Eclipse and XIO

A. Cavity area 4.0 cm × 4.0 cm; B. Cavity area 10.0 cm × 10.0 cm.

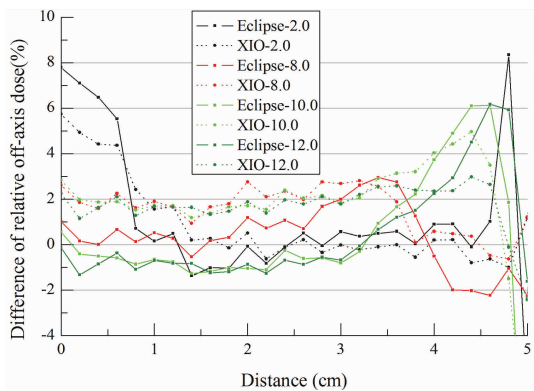


图 6 0.1 cm 深度处不同面积空腔下 Eclipse 和 XIO 相对离轴剂量差对比

Figure 6. Comparison of DROAD at the 0.1 cm Depth in Cavities of Different Areas Calculated by Eclipse and XIO

Eclipse-X and XIO-X corresponding to results of Eclipse and XIO with cavities of different areas (X cm × X cm).

DROAD: Difference of relative off-axis dose.

### 3 讨论

TPS 计算精度直接关系到放疗的最终效果, 为确保其能安全有效应用于临床, 国内外出台了一系列的标准和指南<sup>[12-16]</sup>, 虽然在 TPS 验收或做相关质控时会采用其中的方法, 但其并不涵盖临床中遇

到的一些特殊情况, 因此针对临床的各种可能性验证 TPS 的准确性对更好地应用其制定放疗计划及计划的质量保证有重要意义。Eclipse 和 XIO 是两种应用广泛的商用 TPS 软件, 其中均涉及多种算法, 本文基于 Geant4 蒙特卡罗软件包研究了补偿膜下空腔对 Eclipse 的 AAA 和 XIO 的 Superposition 计算浅层组织剂量的影响。空腔的存在会使二者在一定程度上高估浅层剂量, 通过对比 Geant4、AAA 和 Superposition 的计算结果, 发现空腔对 Geant4 的影响更大, 因此可能是两种算法低估了次级电子与空腔介质的相互作用, 其中厚度是影响二者计算精度的主要因素, 但在空腔厚度小于 0.5 cm 时, 与 Geant4 差异在 3% 以内; 面积主要影响计算精度的侧向分布, 随空腔面积变大, 影响较大区域逐渐外移, 二者在中心区域与蒙特卡算法差异逐渐减小至 2% 左右。对于图和表中数据的波动可能是由于蒙特卡计算误差所致, 尤其是接近射野边缘处, 剂量梯度较大, 更容易造成 OROAD 较大波动。

临床工作中, 物理师在使用 Eclipse 的 AAA 算法和 XIO 的 Superposition 算法制定放疗计划时如遇补偿膜下空腔问题应根据空腔大小在计划中适当增加空腔下浅表肿瘤剂量; 医生在评估计划时也应注意到空腔存在的影响, 此时对肿瘤区域剂量均匀性

的过高要求极有可能意味着肿瘤浅表部分剂量的不足;空腔过大时,建议重新定位,以使靶区及周围危及器官剂量计算更加准确。对补偿膜进行改进使其与凹凸不平的体表更加贴合或升级 TPS、改进 TPS 算法使其更好处理剂量二次建成及电子扩散问题或许是解决补偿膜下空腔问题最直接有效的办法,很多学者也在朝这方面努力。

本研究只针对 1 cm 厚补偿膜研究了射野 10 cm × 10 cm、源皮距 100 cm、机架角 0°时的情况,有空腔时机架角的倾斜会变相增加其厚度,同时不同厚度补偿膜及不同照射方式下是否会有不同结果也有待进一步研究。

**作者声明:**本文全部作者对于研究和撰写的论文出现的不端行为承担相应责任;并承诺论文中涉及的原始图片、数据资料等已按照有关规定保存,可接受核查。

**学术不端:**本文在初审、返修及出版前均通过中国知网(CNKI)科技期刊学术不端文献检测系统的学术不端检测。

**同行评议:**经同行专家双盲外审,达到刊发要求。

**利益冲突:**所有作者均声明不存在利益冲突。

**文章版权:**本文出版前已与全体作者签署了论文授权书等协议。

#### [参考文献]

- [1] Choi CW, Hong JW, Park CS, *et al.* Chest-wall surface dose during post-mastectomy radiation therapy, with and without nonmagnetic bolus: A phantom study[J]. J Magnet, 2016, 21(2):293-297.
- [2] Das LC, Golden DE, Perevalova E, *et al.* A feasibility study of 2-mm bolus for postmastectomy radiation therapy[J]. Pract radiat Oncol, 2017, 7(3):161-166.
- [3] 周瑛瑛,邱小平,狄晓云,等."Pretend" Bolus 在乳腺癌根治术后调强放疗应用中的剂量学研究[J]. 中国医学物理学杂志, 2013,30(1):12-14.
- [4] 胡作怀,付建东,陈芳,等.组织补偿膜添加方式引起的放疗剂量差异研究[J]. 中华放射肿瘤学杂志, 2016,25(4):388-390.
- [5] 陈华,徐义果,庄志邈,等.放疗计划系统中空腔边缘剂量计算准确性研究[J]. 中华放射肿瘤学杂志, 2017, 26(1):69-73.
- [6] Vanderstraeten B, Reynaert N, Paelinck L, *et al.* Accuracy of patient dose calculation for lung IMRT: A comparison of Monte Carlo, convolution/superposition, and pencil beam computations [J]. Med Phys, 2006, 33 :3149-3158.
- [7] Geant4 Collaboration. Geant4 Scope of Application[EB/OL]. <http://geant4-userdoc.web.cern.ch/geant4-userdoc/UsersGuides/IntroductionToGeant4/html/IntroductionToG4.html#geant4-scope-of-application>, 2020-03-03.
- [8] 孔栋,惠琳,魏贤顶,等.Bolus 与皮肤间空腔对浅层组织剂量沉积影响研究[J]. 中华放射肿瘤学杂志, 2019, 28(1):27-31.
- [9] 孔栋,惠琳,魏贤顶,等.补偿膜下空腔间隙对浅表组织剂量影响[J]. 中华放射肿瘤学杂志, 2018, 27(11):1009-1013.
- [10] 李东,刘平,季芳,等.基于蒙卡 GEANT4 研究某放疗场所的辐射水平分布规律[J]. 中国辐射卫生, 2018, 27(4):413-416.
- [11] Arbor N, Gasteuil J, Noblet C, *et al.* A GATE/Geant4 Monte Carlo toolkit for surface dose calculation in VMAT breast cancer radiotherapy[J]. Phys Med, 2019, 61 :112-117.
- [12] 国家食品药品监督管理局.放射治疗计划系统质量保证指南:YY/T 0798-2010[S], 2011.
- [13] 国家食品药品监督管理局.远距离放射治疗计划系统高能 X(γ)射束剂量计算准确性要求和试验方法:YY 0775-2010[S], 2010.
- [14] 国家食品药品监督管理局.调强放射治疗计划系统性能和试验方法:YY/T 0889-2013[S], 2013.
- [15] 国家食品药品监督管理局.放射治疗计划系统的调试典型外照射治疗技术的测试:YY/T 0895-2013[S], 2013.
- [16] Fraas B, Doppke K, Hunt M, *et al.* American Association of Physicists in Medicine Radiation Therapy Committee Task Group 53: Quality assurance for clinical radiotherapy treatment planning [J]. Med Phys, 1998, 25 :1773-1829.