

小野照射不同密度肺模体横向电子不平衡现象的蒙特卡罗模拟研究

李洁^{1,2}, 汪晖¹, 汪冬¹, 郑华庆¹, 吴宜灿¹

1. 中国科学院核能安全技术研究所/中子输运理论与辐射安全重点实验室, 安徽 合肥 230031; 2. 中国科学技术大学科学岛分院, 安徽 合肥 230026

【摘要】目的:研究小野对不同密度肺模体横向电子不平衡程度的影响,为肺部小野放射治疗提供参考。**方法:**利用蒙特卡罗程序EGSnrc/DOSXYZnrc对不同射野照射包含不同密度肺组织的模体进行模拟,选择6和15 MV两种能量、8种射野大小 $[(0.2 \times 0.2) \text{ cm}^2 \sim (3.0 \times 3.0) \text{ cm}^2]$ 、7种肺密度 $(0.001 \sim 1.000 \text{ g/cm}^3)$ 的不同组合,利用剂量衰减百分比(DRP)衡量横向电子不平衡的严重程度。**结果:**当肺密度小于 0.4 g/cm^3 时,DRP非常大且随密度剧烈变化,电子不平衡现象比较严重;当肺密度大于 0.4 g/cm^3 时,DRP随密度变化幅度减缓。肺内剂量衰减程度随射野的增加而减小,肺组织后方相对更小的野会有较大程度的剂量升高。**结论:**低密度范围内,密度的改变会引起肺部剂量的剧烈变化,在使用小野对肺部肿瘤进行治疗时,应更加注意CT-电子密度转换曲线的准确性,谨慎选择放射治疗参数以保护肺周围重要危及器官。针对低密度肺的剂量计算,应选用考虑电子不平衡的更精确的剂量计算方法。

【关键词】小野;肺密度;放射治疗;电子不平衡;蒙特卡罗模拟

【中图分类号】R811.1;R312

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2019)04-0379-05

Monte Carlo simulation of lateral electron disequilibrium in different lung density phantoms after small-field radiation

LI Jie^{1,2}, WANG Hui¹, WANG Dong¹, ZHENG Huaqing¹, WU Yican¹

1. Key Laboratory of Neutronics and Radiation Safety, Institute of Nuclear Energy Safety Technology, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China; 2. Science Island Branch, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

Abstract: Objective To study the effects of small-field radiation on lateral electron disequilibrium in different lung density phantoms and provide references for small-field radiotherapy for lung cancers. **Methods** Monte Carlo code EGSnrc/DOSXYZnrc was used to simulate different densities of lung tissues after radiation with different field sizes. The combinations of 2 kinds of energies (6 MV and 15 MV), 8 kinds of field sizes (from $0.2 \text{ cm} \times 0.2 \text{ cm}$ to $3.0 \text{ cm} \times 3.0 \text{ cm}$) and 7 kinds of lung densities (from 0.001 g/cm^3 to 1.000 g/cm^3) were selected in the simulation. The lateral electron disequilibrium was evaluated by dose reduction percentage. **Results** The dose reduction percentage was very large and changed remarkably with the density when the lung density was less than 0.4 g/cm^3 . However, when the lung density was greater than 0.4 g/cm^3 , the change of dose reduction percentage was mitigated with the density. The attenuation of lung dose decreased with the increase of radiation field, and the doses in the small fields behind the lung tissues were significantly increased. **Conclusion** In a range of low density, the change of density might cause dramatic changes in the lung dose. During the treatment for lung cancer, medical physicists should pay more attention to the accuracy of the CT- electron density conversion curves and select the optimal radiotherapy parameters to protect the organs-at-risk around the lungs. A more accurate dose calculation method considering the electron disequilibrium is recommended in the low-density lung dose calculation.

Keywords: small field; lung density; radiotherapy; electron disequilibrium; Monte Carlo simulation

【收稿日期】2018-11-28

【基金项目】国家自然科学基金(11605233);中国科学院合肥物质科学研究院院长基金(YZJJ201618)

【作者简介】李洁,在读硕士研究生,研究方向:精准放射治疗中的剂量计算方法,E-mail: jie.li@fds.org.cn

【通信作者】汪晖,助理研究员,研究方向:精准放射治疗中的剂量计算方法,E-mail: hui.wang@fds.org.cn

前言

随着放疗技术的发展,调强放射治疗(Intensity-Modulated Radiation Therapy, IMRT)、图像引导放射治疗(Image-Guided Radiation Therapy, IGRT)、容积调强放射治疗(Volumetric Arc Therapy, VMAT)、螺旋断层放疗(Tomotherapy)、立体定向放射外科

(Stereotactic Radiosurgery, SRS)、伽马刀(Gamma Knife)、赛博刀(Cyberknife)等先进放疗技术得到越来越广泛的应用,射野范围从传统的(4×4) cm²到(40×40) cm²扩展到更小的亚厘米范围,在IMRT治疗中小野可以小至(0.3×0.1) cm²^[1],在SRS、Gamma Knife和Cyberknife中,同样使用仅几毫米级的射野来照射肿瘤并达到保护正常组织和危及器官的目的^[2]。小野照射情况下极易发生横向电子不平衡并造成剂量的不确定性,电子不平衡的程度与射束能量、介质组分特别是介质密度紧密相关。健康肺组织的密度最大为0.35 g/cm³,但是疾病的发生会导致气腔密度和血容量改变从而改变肺密度,如肺气肿患者肺密度可能小于0.1 g/cm³,此外肺在吸气和呼气时的密度也会发生改变,肺部密度的变化增加了小野照射情况下剂量的复杂性,更容易造成横向电子不平衡。Mesbahi等^[3]使用MCNPX蒙特卡罗程序研究(0.5×0.5) cm²~(3×3) cm²大小射野照射肺密度为0.25 g/cm³的模体内的剂量分布情况。Beilla等^[4]使用GATE/Geant4蒙特卡罗程序研究(3×3)、(5×5)、(10×10)、(20×20) cm²大小射野照射深呼吸屏气状态下的肺模体内的剂量分布情况,但是对于小野照射不同密度肺模体内的剂量分布情况的研究较少。由于蒙特卡罗方法在小野剂量计算中的准确性已得到广泛验证^[5-7],因此本文采用蒙特卡罗方法针对小野在不同密度肺模体中产生的横向电子不平衡情况进行研究,从而为肺部放射治疗参数以及剂量计算方法的选择提供参考。中科院核能安全技术研究所·FDS凤麟核能团队长期对精准放射治疗关键物理与技术进行研究,开发了具有自主知识产权的精准放射治疗系统“麒麟刀”KylinRay^[8-13],本文研究工作是在前期“麒麟刀”研发工作基础上开展的。

1 材料与方法

本文使用加拿大国家研究院(National Research Council of Canada, NRCC)开发的EGSnrc/DOSXYZnrc通用蒙特卡罗程序^[14-15]来研究射野大小和肺密度对剂量分布的影响,主要模拟参数包括:全局电子截止能量(Global Electron Cutoff Energy, ECUT)为0.7 MeV,全局光子截止能量(Global Photon Cutoff Energy, PCUT)为0.01 MeV,使用直接韧致辐射分裂和电子射程截断等减方差技术,韧致辐射分裂数为1 000,模拟计算中模拟粒子数为10⁹量级^[16]。

DOSXYZnrc被用来模拟体元大小为(0.2×0.2×0.2) cm³、体积为(30×30×30) cm³的平板模体,将模体材料设定为水(z 为0~10 cm)、肺(z 为10~20 cm)和水(z 为

20~30 cm),其中 z 表示相应材料在模体内的深度。放射源能量选择6、15 MV^[17],每个能量的放射源射野大小在(0.2×0.2)、(0.4×0.4)、(0.5×0.5)、(0.6×0.6)、(0.8×0.8)、(1.0×1.0)、(2.0×2.0)、(3.0×3.0) cm²之间变化,肺模体密度的取值包括0.001、0.100、0.260、0.400、0.600、0.800、1.000 g/cm³,对两种能量、8种射野大小、7种肺密度的不同组合进行模拟。对于每次模拟,在模体中心轴上大小为(0.2×0.2×0.2) cm³的体元中沉积的能量被记录下来;类似地,对相同大小的体元,模体内不同深度处的横向离轴剂量也记录下来^[18]。

深度的剂量衰减百分比(Dose Reduction Percentage, DRP)使用公式:

$$\text{DRP} = \text{PDD}(E, \text{FS}, \rho_{\text{water}}) - \text{PDD}(E, \text{FS}, \rho_{\text{lung}}) \quad (1)$$

计算给定,表示射野及密度变化对肺内剂量衰减程度的影响,从而衡量横向电子不平衡的程度。DRP的绝对值越大表示肺部的剂量扰动越强烈,电子不平衡现象越严重。

2 结果

图1显示射束能量为6 MV、射野大小为(0.4×0.4) cm²条件下不同肺密度的百分深度剂量分布以及深度为11.9和21.9 cm处的横向离轴剂量分布。图2显示结果与图1类似,只是将射野大小增加到(1.0×1.0) cm²,能量增加至15 MV。从图中可以看出,在水和肺交界处有明显的剂量变化,在第一个水肺交界处剂量突降,并随肺组织深度的增加逐步降低,在第二个肺与水的交界处剂量增加,并在水中达到第二个峰值,然后逐步下降。相对于纯水模体,肺组织密度越低,肺内剂量衰减程度越高,但在肺组织后方剂量增加程度也越高。另外从图1a和图2a中可以看出,当肺密度极低为0.001 g/cm³时,在第一个水肺交界面上出现剂量跃变,剂量突然增加然后迅速减小。

图3显示能量为6 MV、肺密度为0.001 g/cm³条件下不同射野大小的百分深度剂量分布和横向离轴剂量分布。图4显示结果与图3类似,只是将肺密度增加到0.260 g/cm³,能量增加至15 MV。从图中可以看出肺部剂量相对于纯水剂量发生较大衰减,并且衰减程度随射野的增加而减小,但在肺组织后方相对更小的野[(0.2×0.2) cm²]会有较大程度的剂量升高。

3 讨论

3.1 密度影响

图1显示了射束能量为6 MV、射野大小为(0.4×0.4) cm²条件下不同肺密度的百分深度剂量分布和横向离轴剂量分布,最大DRP出现在10~12 cm之间,当肺密度为

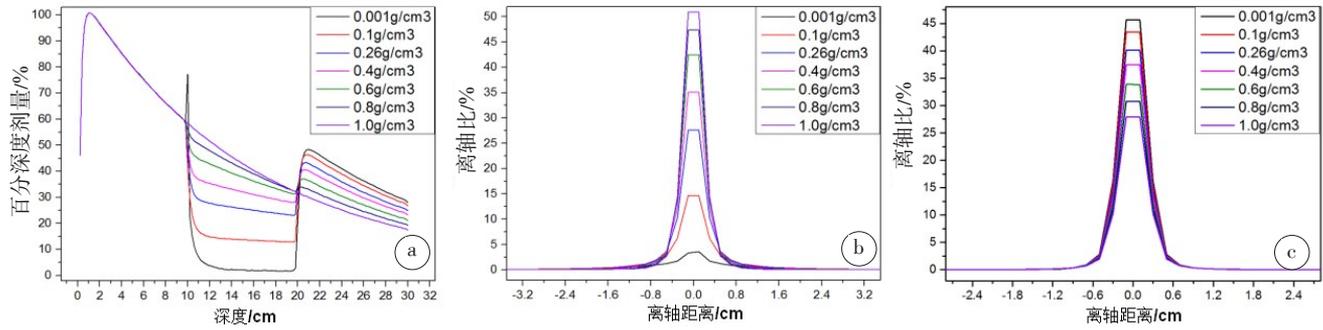


图1 射束能量为6 MV、射野大小为(0.4×0.4) cm²条件下不同深度处的百分深度剂量(a)及11.9 cm(b)、21.9 cm(c)深度处的离轴剂量分布
 Fig.1 Percent depth dose at different depths (a) and the off-axis ratios at the depth of 11.9 cm (b) and 21.9 cm (c) when the energy is 6 MV and field size is (0.4×0.4) cm²

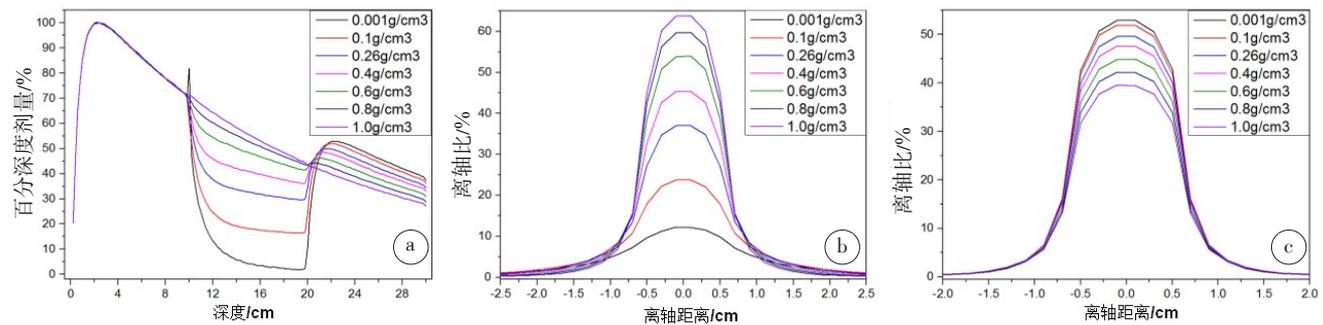


图2 射束能量为15 MV、射野大小为(1.0×1.0) cm²条件下不同深度处的百分深度剂量(a)及11.9 cm(b)、21.9 cm(c)深度处的离轴剂量分布
 Fig.2 Percent depth dose at different depths (a) and the off-axis ratios at the depth of 11.9 cm (b) and 21.9 cm (c) when the energy is 15 MV and field size is (1.0 cm×1.0) cm²

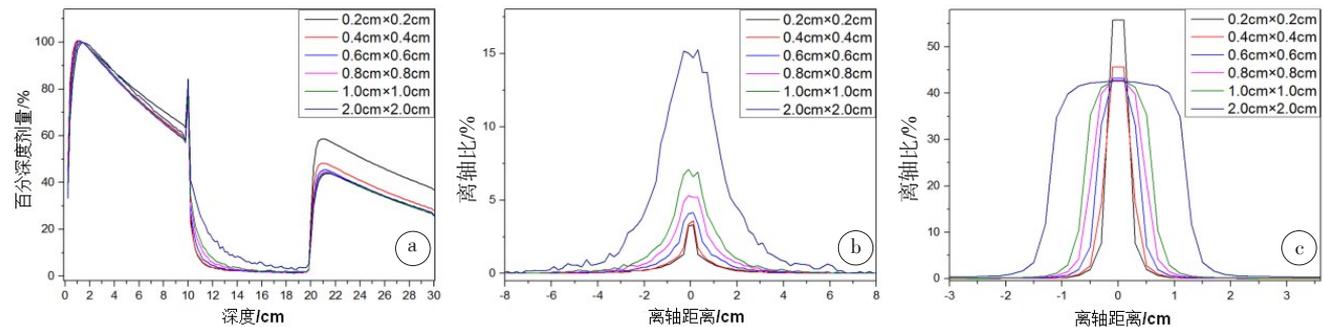


图3 能量为6 MV、肺密度为0.001 g/cm³条件下不同深度处的百分深度剂量(a)及11.9 cm(b)、21.9 cm(c)深度处的离轴剂量分布
 Fig.3 Percent depth dose at different depths (a) and the off-axis ratios at the depth of 11.9 cm (b) and 21.9 cm (c) when the energy is 6 MV and the density of lung is 0.001 g/cm³

0.001、0.100、0.260和0.800 g/cm³时,最大DRP从48.5%、37.9%、25.7%降至4.5%,相应深度从11.3 cm降至10.7 cm,当密度大于0.4 g/cm³时,最大DRP出现的深度基本相同,如表1所示。

对6 MV射束,不同射野条件下不同肺密度的最大DRP如图5所示,当肺密度低于0.4 g/cm³,最大DRP随密度变化幅度较大;但当密度大于0.4 g/cm³时,最大DRP随密度变化幅度减缓。当发生电子不平衡时,肺部剂量与肺密度密切相关,特别是在低密度范围内,密度的改变会引起肺部剂量的剧烈变化,因此在放射治疗过程

中,CT-电子密度转换曲线的准确性对剂量计算的准确性是相当重要的。目前放射治疗计划系统中使用的某些剂量计算方法及非均匀修正方法的前提是假设计算点存在电子平衡,当电子平衡不成立时,由该类方法计算出的剂量要高于材料中实际沉积的能量,从而造成剂量误差,容易造成危及器官的剂量过高,从而引起严重并发症。杨振等^[6]对小野照射情况下治疗计划系统中不同剂量计算方法的效果进行比较研究,发现卷积叠加算法与蒙特卡罗模拟的深度剂量一致性很好,而笔形束算法高估了肺介质内的深度剂量,剂量偏差范围较大。

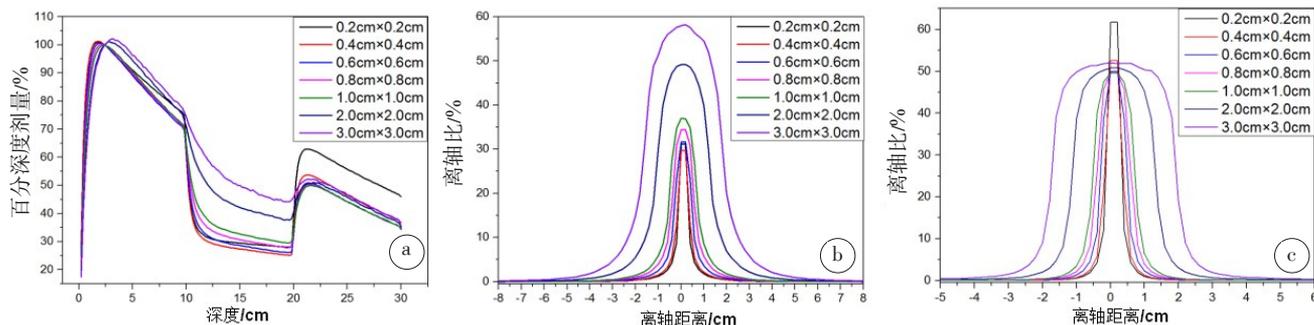


图4 能量为15 MV、肺密度为0.260 g/cm³条件下不同深度处的百分深度剂量(a)及11.9 cm(b)、21.9 cm(c)深度处的离轴剂量分布
Fig.4 Percent depth dose at different depths (a) and the off-axis ratios at the depth of 11.9 cm (b) and 21.9 cm (c) when the energy is 15 MV and the density of lung is 0.260 g/cm³

表1 不同肺密度的最大剂量衰减百分比
Tab.1 Maximum dose reduction percentage of different lung densities

参数	肺密度/g·cm ⁻³					
	0.001	0.100	0.260	0.400	0.600	0.800
最大DRP/%	48.5	37.9	25.7	18.1	10.2	4.5
最大DRP深度/cm	11.3	11.1	10.9	10.7	10.7	10.7

Elcim等^[19]比较了笔形束算法和蒙特卡罗方法在肺部三维适形放射治疗中靶区以及肺等关键器官的剂量差异,发现二者肺平均剂量差异为9.1%。Jones等^[1]对小野照射情况下剂量计算中不同非均匀修正方法的效果进行了比较,发现当射野小于(3×3) cm²时,Batho修正方法和等效路径长度法与蒙卡结果有较大差异,而卷积叠加方法与蒙卡模拟结果一致性相对较好,因此放射治疗过程中应选择更精确的考虑电子不平衡的剂量计算方法^[20]。另外在肺密度极低的肺气肿患者治疗过程中,在肺与其他组织的交界面处可能会出现剂量的跃变,造成肺内剂量的瞬态增加,应注意保护正常肺组织。

3.2 射野影响

从图3和图4可以看出,肺部剂量相对于纯水剂量发生很大衰减,并且衰减程度随射野的增加而减小,另外在肺组织后方相对更小的野[(0.2×0.2) cm²]会有较大程度的剂量升高。中心轴上第一个水肺交界面后0.9 cm深度处不同射野大小、不同肺密度的DRP如图6所示。当肺密度为0.001 g/cm³、射野为(0.2×0.2) cm²时,中心轴DRP相对于射野为(0.6×0.6) cm²时增加了9.01%,相对于肺密度为0.26 g/cm³时增加了24.39%。当射野大小小于电子射程时,射野内产生的电子和散射光子大量逸出,将大量能量沉积在射野外,造成介质中剂量减少,发生电子不平衡现象^[21]。尤其在小野照射低密度介质时,光子衰减减少且电子射程增加,电子将其能量

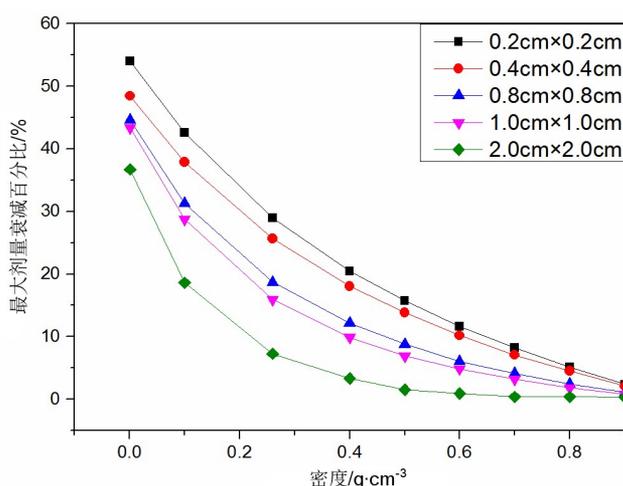


图5 不同射野条件下不同肺密度的最大剂量衰减百分比
Fig.5 Maximum dose reduction percentage of different lung densities at different field sizes

沉积在下游更远的位置,同时更多电子离开射野范围,横向电子不平衡更加严重,在低密度介质内造成更多能量亏损。另外在小野照射情况下,在肺组织后容易出现剂量增加,因此当肺周围有需要保护的重要器官时需要谨慎选择放射治疗参数。

4 结论

本文使用蒙特卡罗方法研究了小野照射不同密度肺模体时的横向电子不平衡现象,可以为肺部小野放射治疗参数的选择提供参考。在低密度范围内,密度改变会引起肺部剂量的剧烈变化,因此在使用小野对肺部肿瘤进行治疗时,应更加注意CT-电子密度转换曲线的准确性并谨慎选择治疗参数。在密度极低的肺气肿患者的治疗过程中,在肺与其他组织的交界处可能会出现剂量跃变并造成肺内剂量的瞬态增加,应注意保护正常肺组织。在小野照射情况下,在肺组织后容易出现剂量增加,因此当肺周围有需要保护的重要器

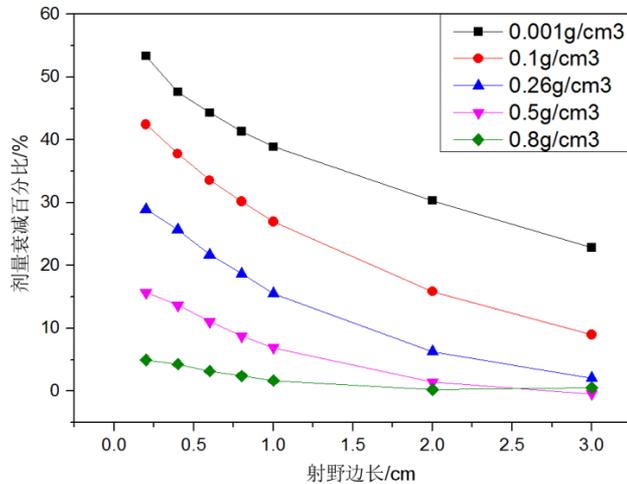


图6 不同密度肺模体条件下不同射野的剂量衰减百分比

Fig.6 Dose reduction percentage of different field sizes at different lung densities

官时需要谨慎选择放射治疗参数。肺部横向电子不平衡与肺密度和射野大小有关,当肺密度较低或射野较小时,横向电子不平衡会造成肺部剂量的较大衰减。目前使用的某些剂量计算方法及非均匀修正方法并没有考虑肺部横向电子不平衡的影响,这会造成对肺部剂量计算结果的高估,因此此类方法如需在肺部小野剂量计算中得到更精确的计算结果仍需继续改进,或选择考虑电子不平衡的卷积叠加、蒙特卡罗等方法。

致谢:本文工作是在中科院核能安全技术研究所·FDS 凤麟核能团队进行的,感谢FDS 凤麟核能团队其他成员提供的各项帮助和支持。

【参考文献】

[1] JONES A O, DAS I J. Comparison of inhomogeneity correction algorithms in small photon fields[J]. *Med Phys*, 2005, 32(3): 766-776.

[2] DAS I J, DING G X, AHNESJO A. Small fields: nonequilibrium radiation dosimetry[J]. *Med Phys*, 2008, 35(1): 206-215.

[3] MESBAHI A, DADGAR H, GHAREH-AGHAJI N, et al. A Monte Carlo approach to lung dose calculation in small fields used in intensity modulated radiation therapy and stereotactic body radiation therapy[J]. *J Cancer Res Ther*, 2014, 10(4): 896-902.

[4] BEILLA S, YOUNES T, VIEILLEVIGNE L, et al. Monte Carlo dose calculation in presence of low-density media: application to lung SBRT treated during DIBH[J]. *Phys Med*, 2017, 41: 46-52.

[5] GHAREHAGHAJI N, DADGAR H A. Dosimetric verification of small fields in the lung using lung-equivalent polymer gel and Monte Carlo simulation[J]. *J Cancer Res Ther*, 2018, 14(2): 278-286.

[6] 陈宁,周剑良,邱杰,等. 基于蒙特卡罗方法对小野数据测量比较研究[J]. *中华放射肿瘤学杂志*, 2017, 26(9): 1077-1079.

CHEN N, ZHOU J L, QIU J, et al. A comparative study of measurement of small field data and calculation based on Monte Carlo method[J]. *Chinese Journal of Radiation Oncology*, 2017, 26(9): 1077-1079.

[7] PARTANEN M, OJALA J, NIEMELA J, et al. Comparison of two Monte Carlo-based codes for small-field dose calculations in external

beam radiotherapy[J]. *Acta Oncol*, 2017, 56(6): 891-893.

- [8] CAO R F, WU Y C, PEI X, et al. Multi-objective optimization of inverse planning for accurate radiotherapy[J]. *Chinese Phys C*, 2011 (35): 313-317.
- [9] 吴宜灿,曹瑞芬,胡丽琴,等. 动态调强精准放射治疗计划系统 KylinRay-IMRT 的研发及验证[J]. *中国医疗器械杂志*, 2018, 42(1): 7-10.
- WU Y C, CAO R F, HU L Q, et al. Development and validation of dynamic intensity modulated accurate radiotherapy system KylinRay-IMRT[J]. *Chinese Journal of Medical Instrumentation*, 2018, 42(1): 7-10.
- [10] WU Y C, CHENG M Y, WANG W, et al. Development of Chinese female computational phantom rad-human and its application in radiation dosimetry assessment[J]. *Nuclear Technology*, 2018, 201(2): 155-164.
- [11] 吴宜灿,贾婧,曹瑞芬,等. 图像引导精准定位跟踪系统 KylinRay-IGRT[J]. *中国医学物理学杂志*, 2017, 34(3): 225-229.
- WU Y C, JIA J, CAO R F, et al. Image-guided accurate positioning and tracking system KylinRay-IGRT [J]. *Chinese Journal of Medical Physics*, 2017, 34(3): 225-229.
- [12] 吴宜灿,贾婧,曹瑞芬,等. 质子调强放射治疗计划系统 KylinRay-IMPT[J]. *中国医学物理学杂志*, 2017, 34(6): 541-545.
- WU Y C, JIA J, CAO R F, et al. Proton intensity modulated accurate radiotherapy system KylinRay-IMPT[J]. *Chinese Journal of Medical Physics*, 2017, 34(6): 541-545.
- [13] 吴宜灿,郑华庆,曹瑞芬,等. 剂量引导实时验证系统 KylinRay-DGRT [J]. *现代仪器与医疗*, 2017, 23(6): 13-17.
- WU Y C, ZHENG H Q, CAO R F, et al. Design and implementation of a dose-guided accurate radiotherapy system KylinRay-DGRT[J]. *Modern Instruments & Medical Treatment*, 2017, 23(6): 13-17.
- [14] KAWRAKOW I, MAINEGRA-HING E, ROGERS D W. The EGSnrc code system: Monte Carlo simulation of electron and photon transport, NRCC Report PIRS-701 [R]. Ottawa, Canada: National Research Council Canada, 2018.
- [15] WALTERS B, KAWRAKOW I, ROGERS D W. DOSXYZnrc users manual, NRCC report PIRS-794 [R]. Ottawa, Canada: National Research Council of Canada, 2018.
- [16] 杨振,井建国,胡逸民. 小野条件下肺介质中光子剂量算法的比较研究[J]. *中国现代医学杂志*, 2011, 21(10): 1161-1164.
- YANG Z, JING J G, HU Y M. Comparison of photon dose algorithms of lung under small fields[J]. *China Journal of Modern Medicine*, 2011, 21(10): 1161-1164.
- [17] MOHAN R, CHUI C, LIDOFISKY L. Energy and angular distributions of photons from medical linear accelerators[J]. *Med Phys*, 1985, 12 (5): 592-597.
- [18] DISHER B, HAJDOK G, GAEDE S, et al. An in-depth Monte Carlo study of lateral electron disequilibrium for small fields in ultra-low density lung: implications for modern radiation therapy[J]. *Phys Med Biol*, 2012, 57(6): 1543-1559.
- [19] ELCIM Y, DIRICAN B, YAVAS O. Dosimetric comparison of pencil beam and Monte Carlo algorithms in conformal lung radiotherapy[J]. *J Appl Clin Med Phys*, 2018, 19(5): 616-624.
- [20] 李乾坤. 小射野光子束在非均匀介质中的剂量特性研究[D]. 成都: 四川大学, 2007.
- LI Q K. Dosimetric study on dose perturbation in inhomogeneities for photon beams with small field size (beamlets)[D]. Chengdu: Sichuan University, 2007.
- [21] JONES A O, DAS I J, JONES F J. A Monte Carlo study of IMRT beamlets in inhomogeneous media[J]. *Med Phys*, 2003, 30(3): 296-300.

(编辑:薛泽玲)