Journal of Practical Oncology Vol.41 No.4 2026 www.syzlzz.com

DOI:10.3785/syzlzz.2026.044

· 结直肠肿瘤 ·

直肠癌放疗膀胱充盈情况的影响因素分析及预测模型构建

林志悦，李宗泰，罗嘉秀，林楚燕，许森奎，何汇朗，迟锋，刘慧
华南肿瘤国家重点实验室，中山大学肿瘤防治中心放疗科，广东 广州 510060
通信作者：刘慧，Email：liuhui2@sysucc.org.cn

摘要：目的 探讨影响直肠癌容积旋转调强放疗（volumetric modulated arc therapy, VMAT）期间膀胱充盈程度的相关因素，并建立膀胱体积预测模型，为临床膀胱准备和放疗管理提供参考。**方法** 选取2021年4月至8月在中山大学肿瘤防治中心接受VMAT放疗的10例初治直肠癌患者。每日放疗前行锥形束计算机断层扫描（cone-beam computed tomography, CBCT）扫描，勾画CBCT图像上的膀胱轮廓并获取膀胱体积。记录成功执行膀胱准备方案分次的饮水量、饮水至CBCT扫描间隔时间、放疗分次、性别、当日是否同步化疗、体质量变化率和肿瘤TNM分期等资料。以膀胱体积为因变量，采用Pearson相关性分析探讨各变量与膀胱体积的相关性，并采用多元线性回归分析建立膀胱体积预测模型。**结果** 共纳入成功执行膀胱准备方案的192次放疗分次数据。Pearson相关性分析显示，膀胱体积与饮水至CBCT扫描间隔时间呈强相关（r=0.602，P<0.01），与饮水量呈中度相关（r=0.511，P<0.01），与性别（r=0.340，P<0.01）、体质量变化率（r=0.314，P<0.01）和肿瘤N分期（r=–0.367，P<0.01）呈弱相关。多元线性回归分析显示，性别、饮水量、饮水至CBCT扫描间隔时间和体质量变化率为膀胱体积的预测因素，建立回归方程为：膀胱体积（mL）= –85.097 + 44.344 × 性别 + 0.344 × 饮水量（mL）+ 3.079 × 饮水至CBCT扫描间隔时间（min）+ 10.080 × 体质量变化率（%），其中性别男性=1，女性=0。该模型拟合度较好（R^2=0.650），数据满足独立性要求（DW=1.509），模型差异具有统计学意义（F=85.424，P<0.01）。**结论** 饮水量、饮水至CBCT扫描间隔时间、性别、体质量变化率和肿瘤N分期与直肠癌VMAT放疗期间膀胱体积相关。基于性别、饮水量、饮水至CBCT扫描间隔时间和体质量变化率构建的多元线性回归模型可用于预测膀胱体积，对指导直肠癌放疗期间膀胱准备具有一定参考价值。

关键词： 直肠癌；容积旋转调强放疗；膀胱充盈；预测模型

直肠癌是全球第三大常见的肿瘤[1]。我国直肠癌发病率呈上升趋势[2]。放疗是直肠癌的一种重要治疗方式[3-5]。在直肠癌放疗过程中，膀胱体积的变化对靶区剂量影响大[6]。膀胱充盈程度随着放疗进程的推进而逐渐变小，小肠的受照体积和膀胱充盈程度呈负相关[7]。因此，膀胱的充盈程度一致性对放疗质量控制至关重要。放疗过程中很多患者无法准确控制尿量，因此尿量判断需要借助B型超声膀胱测量仪或者锥形束计算机断层扫描（cone-beam computed tomography, CBCT）图像。这极大降低放疗效率，也可能使危及器官受到过量照射。准确预测患者膀胱充盈的情况，并帮助患者在放疗过程中进行膀胱准备工作，对放疗质量和效率具有重要意义。本研究探讨影响直肠癌患者放疗期间膀胱充盈程度的相关因素，并构建预测模型，以期为患者的膀胱充盈管理提供参考。

1 资料与方法

1.1 一般资料

选取2021年4月至8月在中山大学肿瘤防治中心放疗科接受放疗的10例初治直肠癌患者。患者年龄38~68岁，平均年龄58岁，中位年龄58岁；男性5例，女性5例；放疗前均未接受直肠癌相关手术治疗。Karnofsky功能状态（Karnofsky performance status, KPS）评分均≥70分。根据国际抗癌联盟（Union for International Cancer Control, UICC）第8版TNM分期标准[8]，cT2期2例，cT3期7例，cT4期1例；cN0期5例，cN1期3例，cN2期2例；cM0期10例。本研究经中山大学肿瘤防治中心伦理委员会批准（伦理号：B2024-117）。

1.2 放疗计划设计

患者均采用个体化俯卧板进行固定，使用GE

Discovery 16 排 80 cm CT（GE Healthcare，美国）进行定位扫描，扫描范围第 10 胸椎下缘至坐骨结节下缘，层厚 2.5 mm，重建层厚 2.5 mm。图像上传至 Monaco 计划设计系统（Elekta，瑞典）进行计划设计。治疗技术为容积旋转调强（volumetric-modulated arc therapy, VMAT），X 线能量为 6 MV。处方剂量为大体肿瘤体积计划靶区（planning target volume for the gross tumor volume, PTV-GTV）50 Gy/25 次，计划靶区（planning target volume, PTV）45 Gy/25 次。危及器官剂量限制：小肠最大剂量（maximum dose, D_{max}）<50 Gy，接受 45 Gy 照射的体积（V_{45}）<100 mL；结肠 D_{max}<60 Gy；股骨头平均剂量（mean dose, D_{mean}）<40 Gy；膀胱接受 50 Gy 照射的体积百分比（V_{50}）<50%。计划经验证后，采用 Halcyon 直线加速器（Varian Medical Systems，美国）实施放疗。放疗前均行 CBCT 扫描。

1.3　膀胱准备方案

对患者进行膀胱准备方案的口头宣教。嘱其在每天预约放疗时间前 1 h 排空膀胱并进行一次性饮水（初始饮水 500~600 mL），饮水后不再饮水、进食、排尿或排便。患者主述急尿后由经过统一培训的放疗治疗师实施 CBCT 扫描。把所得膀胱图像与计划膀胱图像进行在线对比，若差异较大，则对喝水量和等待时间进行调整。记录患者每次放疗的饮水时间、饮水量、饮水至 CBCT 扫描的间隔时间和体质量。若饮水后再次饮水、进食、排尿或排便，则视为方案失败。

1.4　数据获取

仅纳入成功执行膀胱准备方案的放疗分次，记录相应分次的饮水量、饮水至 CBCT 扫描的间隔时间、当日是否同步化疗和体质量等信息。将当次 CBCT 膀胱图像导入 PV-iRT 靶区智能勾画系统（广州柏视医疗科技有限公司），由同一位放疗治疗师完成膀胱的逐层勾画，并记录膀胱体积。体质量变化率 =（当日体质量 - 上一个治疗日体质量）/ 上一个治疗日体质量 × 100%。所有患者于每日空腹状态下同一时间点测量体质量。

1.5　统计学分析

采用 SPSS 20.0 软件分析数据。符合正态分布的计量资料采用均值 ± 标准差（$\bar{x} \pm s$）表示。相关性分析采用 Pearson 相关性分析。采用线性回归分析筛选影响膀胱充盈的因素。分类变量赋值：性别变量中，男性 =1，女性 =0；是否同步化疗变量中，是 =1，否 =0；肿瘤 T、N 和 M 分期按照分期等级赋值。以 P<0.05 为差异具有统计学意义。

2　结　果

2.1　膀胱准备方案的可行性

10 例患者计划总放疗分次为 250 次，其中成功执行膀胱准备方案并纳入分析的放疗分次为 192 次，整体执行成功率为 76.8%。5 例患者执行成功率 >80%，其中 1 例达 100%。成功执行膀胱准备方案后，患者放疗前膀胱体积为（362.85 ± 136.69）mL，中位数为 368.60 mL（图 1）。

2.2　影响膀胱充盈的因素

Pearson 相关性分析显示，膀胱体积与饮水至 CBCT 扫描间隔时间呈强相关（r=0.602，P<0.01），与饮水量呈中度相关（r=0.511，P<0.01），与性别（r=0.340，P<0.01）、体质量变化率（r=0.314，P<0.01）和肿瘤 N 分期（r=-0.367，P<0.01）呈弱相关（图 2）。膀胱体积与放疗分次（r=-0.140，P=0.052）、当日是否同步化疗（r=0.052，P=0.471）和肿瘤 T 分期（r=0.031，P=0.673）均无相关性。

2.3　膀胱充盈模型的构建

采用多元线性回归分析，以 Pearson 相关分析中差异具有统计学意义的性别、饮水量、饮水至 CBCT 扫描间隔时间、体质量变化率和肿瘤 N 分期为候选自变量，以膀胱体积为因变量，剔除 P>0.05 的自变量后，最终纳入性别、饮水量、饮水至 CBCT 扫描间隔时间和体质量变化率，构建膀胱体积预测模型（表 1）。回归方程：膀胱体积（mL）=

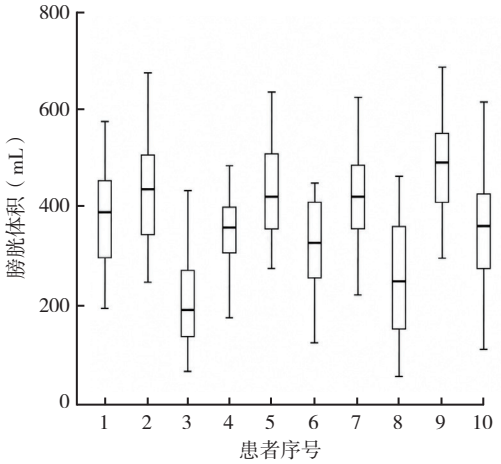
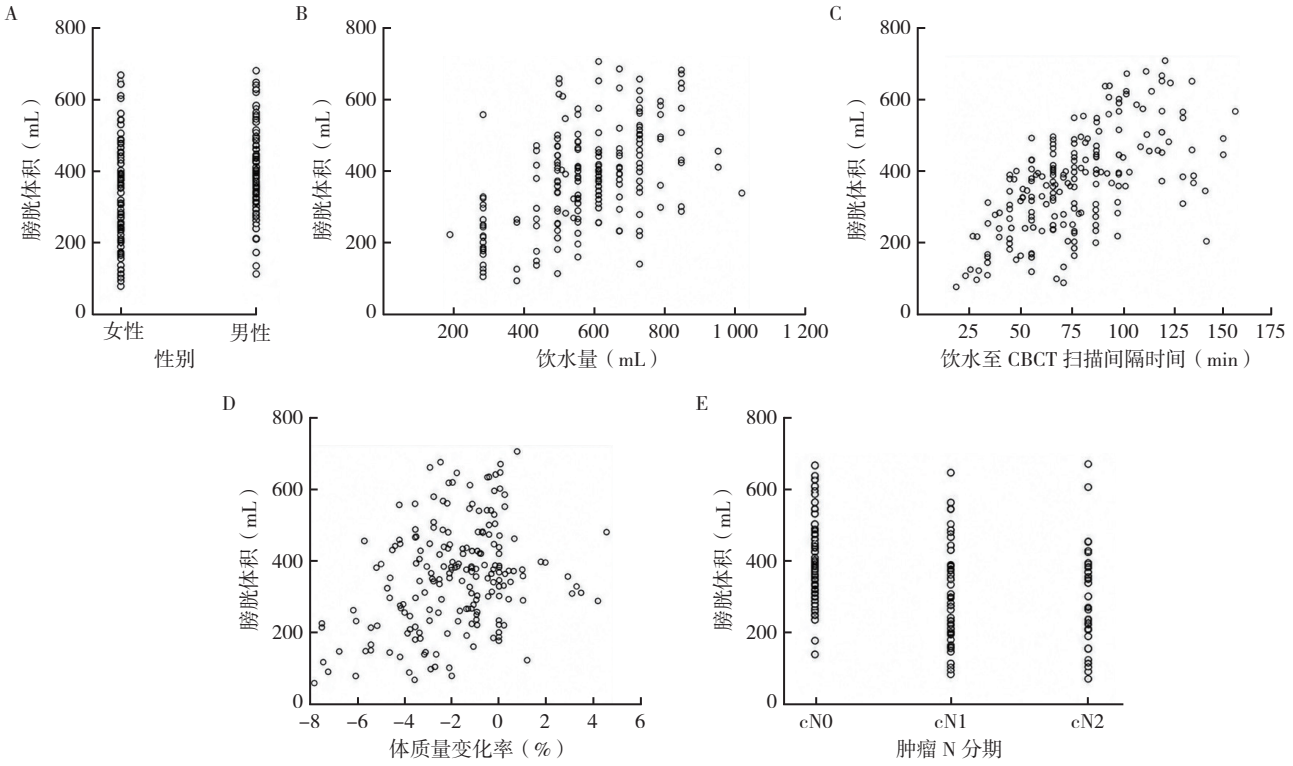


图 1　10 例初治直肠癌患者成功执行膀胱准备方案后放疗前膀胱体积分布



注 A：性别；B：饮水量；C：饮水至 CBCT 扫描间隔时间；D：体质量变化率；E：肿瘤 N 分期；CBCT：锥形束计算机断层扫描（cone-beam computed tomography）。

图 2 10 例直肠癌患者放疗期间 192 个放疗分次膀胱体积与相关影响因素的散点图

表 1 直肠癌患者放疗期间膀胱体积预测因素的多元线性回归分析

变量	回归系数	标准误差	*t* 值	*P* 值
常量	−85.097	33.283	−2.557	0.011
性别（男性）	44.344	15.942	2.782	0.006
饮水量	0.344	0.056	6.173	<0.01
饮水至 CBCT 扫描间隔时间	3.079	0.228	13.482	<0.01
体质量变化率	10.080	3.167	3.183	0.002

注 CBCT：锥形束计算机断层扫描（cone-beam computed tomography）。

−85.097 + 44.344 × 性别 + 0.344 × 饮水量（mL）+ 3.079 × 饮水至 CBCT 扫描间隔时间（min）+ 10.080 × 体质量变化率（%），其中性别男性 =1，女性 =0。该模型拟合度较好（R^2=0.650），数据满足独立性要求（*DW*=1.509），模型差异具有统计学意义（*F*=85.424，*P*<0.01），共线性可接受（均 VIF<10）。残差直方图和回归标准化残差的正态 P-P 图显示，残差近似正态分布。

3 讨 论

由于盆腔特殊的解剖结构，膀胱体积的变化较大，随着膀胱充盈程度的变化，靶区及与之毗邻的各危及器官的位置会发生相应的移动，进而影响靶区和周围器官剂量的分布[9-11]。精确控制膀胱充盈具有一定的难度，而使用超声和 CT 等辅助手段也有一定的局限性[12-13]。本研究设计了可行的膀胱准备方案，明确膀胱充盈的影响因素，并以此为基础构建膀胱充盈程度预测模型。

直肠癌患者需要实施有效的膀胱充盈方案。有效的膀胱充盈方案可以提高治疗的准确性，从而改善患者放疗期间和放疗后的生活质量。本研究设计可行的膀胱充盈准备方案，尽管经过严格宣教，方案实施的成功率为 76.8%，出现失败的案例多数与患者中途憋不住尿有关，如漏尿或者憋不住直接排空。方案进行过程中，部分患者难以控制与掌握尿量。这可能与患者年龄有关。年龄越大的患者对憋尿情况的意识越不明确。研究表明，患者即使已接受详细的口头或书面形式的膀胱充盈训练，仍难以保持膀胱尿量[14]，在放疗期间也难以控制膀胱容量[15-16]。因此，本研究通过建立膀胱充盈模型来评估膀胱状态是非常有益的。

研究报道，可通过提取直肠癌靶区和危及器官膀胱的解剖空间位置关系建立回归方程模型预测直肠的剂量[17]。本研究将可能影响膀胱充盈情

况的因素进行相关性分析显示，间隔时间、性别、饮水量、体质量变化率和肿瘤 N 分期是直肠癌放疗期间影响膀胱充盈的因素。研究显示，间隔时间是影响盆腔肿瘤放疗期间膀胱容量的因素，患者在饮水量为 500 mL 前提下，膀胱容积与间隔时间具有强相关[18]。本研究也显示，间隔时间与膀胱充盈存在强相关（r=0.602，P<0.01）。这可能由于患者在放疗过程中经过反复膀胱准备训练，且多次接受膀胱充盈重要性的宣教，已熟悉达到适宜膀胱充盈状态时的尿意感受，从而能够较准确地把握饮水后的等待时间。饮水时间间隔与膀胱充盈存在强相关。对于需精准控制膀胱充盈状态的放疗，医生可根据研究中明确的间隔时间与膀胱充盈的量化关系，为患者制定个性化饮水方案。患者放疗前 1 h 饮水 500 mL，膀胱充盈适度后行放疗，可避免因间隔时间过短（充盈不足）或过长（过度充盈导致靶区位置不精准）而影响放疗效果。书面膀胱充盈说明和使用超声膀胱测量容量可以减少体内膀胱容量的变化[19]。既往研究显示，性别对定位 CT 时膀胱容积无影响[18]；而本研究显示，性别与膀胱体积呈弱相关（r=0.340，P<0.01）。本研究分析显示，当日是否同步化疗与膀胱体积无相关性（r=0.052，P=0.471）。这些结果仍需大样本量的临床研究加以验证。

本研究基于影响膀胱充盈情况的因素性别、饮水量、间隔时间和体质量变化率构建多元线性回归模型。该模型具有良好的解释度。近年来，对于放疗过程中膀胱充盈程度的研究已被广泛报道。例如，有学者通过在超声扫描模拟时表征患者膀胱充盈动力学的价值建立膀胱动力学预测模型，来确保治疗时的膀胱容量与模拟定位时一致[20]。也有研究通过建立模型在 3 个维度上量化由于膀胱和直肠体积的变化导致的膀胱形状的变化，从而根据已知尿量预测短时间内膀胱形状的变化[21]。研究发现，在直肠癌患者放化疗期间使用超声扫描仪有助于在治疗期间保持膀胱的持续充盈[22]。与之比较，本研究未使用超声等辅助设备，因此建立的预测模型更易于推广。

展望后续研究，应收集更多的变量，包括患者的情绪、心理状态、膀胱功能、肾功能或药物使用情况（如利尿剂）等。本研究暂未纳入这些变量主要因为：本研究为探索性分析，初期聚焦于易监测和可干预的基础变量（如饮水量和间隔时间），旨在先明确简单因素的影响规律；部分变量（如膀胱功能的客观评估需尿动力学检查）会增加患者的检查负担，可能降低临床配合度，而心理状态的量化（如焦虑量表评分）需额外时间成本，在小样本初步研究中暂未纳入；药物使用情况需详细核查患者用药史，部分患者存在非处方利尿剂使用未记录的情况，可能导致数据偏倚。患者在憋尿过程中根据主观感受判断膀胱充盈程度，但主观感受会受饮水情况、患者情绪、用药和膀胱功能等因素影响[23-24]。因此，未来研究需进一步纳入这些影响因素，以提高研究结果的适用性和可靠性。本研究样本量较小，对结果的可靠性产生潜在影响。后续应通过多中心协作扩大样本量，以提高模型的准确性，同时改进准备方案，提高模型的通用型。

综上所述，本研究通过相关性分析发现，饮水量、饮水至 CBCT 扫描间隔时间、性别、体质量变化率和肿瘤 N 分期与直肠癌 VMAT 放疗期间膀胱体积相关。基于性别、饮水量、饮水至 CBCT 扫描间隔时间和体质量变化率构建的多元线性回归模型可用于预测放疗前膀胱体积，对指导直肠癌患者放疗期间膀胱准备和提高放疗实施效率具有一定参考价值。

利益冲突　所有作者声明无利益冲突

参考文献：

[1] Nierengarten MB. Global cancer statistics 2022: The report offers a view on disparities in the incidence and mortality of cancer by sex and region worldwide and on the areas needing attention[J]. Cancer, 2024, 130(15): 2568.

[2] Han B, Zheng R, Zeng H, et al. Cancer incidence and mortality in China, 2022[J]. J Natl Cancer Cent, 2024, 4(1): 47-53.

[3] Tai DT, Loc TM, Kien TT, et al. Assessing efficacy and toxicity in rectal cancer radiotherapy: a comparative study of two fractionation regimens[J]. Oncologie, 2025, 27(4): 509-518.

[4] Ruan JJ, Huang XT, Wang T, et al. Impact of belly board immobilization devices and body mass factor on setup displacement using daily cone-beam CT in rectal cancer radiotherapy[J]. J Appl Clin Med Phys, 2025, 26(3): e14573.

[5] Catona GM, Marcu LG. Qualitative and quantitative evaluation of the role of CBCT in rectal cancer radiotherapy[J]. Radiol Med, 2025, 130(2): 150-160.

[6] 薛宏元, 林蓉, 曾自力, 等. 膀胱体积的变化对直肠癌术后调强放疗剂量学影响的研究[J]. 中国辐射卫生, 2017, 26(6): 726–729.

[7] 陈国付, 邵国良. 直肠癌放疗中膀胱充盈程度与危及器官体积相关性分析[J]. 浙江创伤外科, 2019, 24(5): 891–893.

[8] Brierley JD, Gospodarowicz MK, Wittekind C. TNM classification of malignant tumours[M]. 8th ed. Chichester: Wiley Blackwell, 2017.

[9] 郑士明, 李玉成, 杨一威, 等. 直肠癌放疗前后膀胱容积变化对危及器官影响的初步临床研究[J]. 世界最新医学信息文摘, 2019, 19(86): 107–108.

[10] 韩蕾, 王文玲, 毛必静, 等. 膀胱充盈状态对直肠癌盆腔调强适形放疗靶区和邻近危及器官影响的临床研究[J]. 护士进修杂志, 2010, 25(16): 1451–1453.

[11] 姚春梅, 赵军, 刘玉荣, 等. 膀胱自主充盈状态对直肠癌术后三维适形放疗靶区和器官的影响[J]. 山西医药杂志, 2014, 43(4): 366–368.

[12] 姜晓勃, 钟庆初, 黄群峰, 等. 盆腔肿瘤放疗中膀胱充盈一致性初步研究[J]. 中华放射肿瘤学杂志, 2016, 25(6): 598–601.

[13] 穆娅莎·阿布力米提 , 周卫兵 , 刘海峰 , 等 . 盆腔肿瘤患者放疗前膀胱充盈稳定性训练及可靠性研究 [J]. 中华放射肿瘤学杂志 , 2016, 25(2): 146–149.

[14] 朱万里, 潘海卿, 丁叔波, 等. 直肠癌新辅助放疗中最佳膀胱容量精确性保持的探讨[J]. 浙江医学教育, 2021, 20(2): 54–56.

[15] Huang SJ, Li T, Guo YJ, et al. Impact of bladder volume and bladder shape on radiotherapy consistency and treatment interruption in prostate cancer patients[J]. J Appl Clin Med Phys, 2025, 26(4): e70026.

[16] Rades D, Kristiansen C, Vestergaard Madsen C, et al. Bladder volume <200 ml during a course of moderate hypofractionated irradiation in patients with localized prostate cancer[J]. Anticancer Res, 2025, 45(2): 701–708.

[17] 王东, 明智, 刘可. 直肠癌容积旋转调强放疗膀胱剂量预测研究[J]. 中国医疗设备, 2023, 38(6): 82–85, 133.

[18] 李长云 . 盆腔恶性肿瘤放疗中保持膀胱充盈一致性相关因素的研究 [D]. 济南 : 济南大学 , 2019: 10–11.

[19] Bodusz D, Brajczewska–Bello J, Rutkowski T, et al. The role of ultrasound–based monitoring of bladder volume in patients with prostate cancer during CyberKnife stereotactic radiosurgery[J]. Appl Sci, 2024, 14(19): 9091.

[20] Nathoo D, Loblaw A, Davidson M, et al. A feasibility study on the role of ultrasound imaging of bladder volume as a method to improve concordance of bladder filling status on treatment with simulation[J]. J Med Imaging Radiat Sci, 2018, 49(3): 277–285.

[21] Lotz HT, Remeijer P, van Herk M, et al. A model to predict bladder shapes from changes in bladder and rectal filling[J]. Med Phys, 2004, 31(6): 1415–1423.

[22] Yoon HI, Chung Y, Chang JS, et al. Evaluating variations of bladder volume using an ultrasound scanner in rectal cancer patients during chemoradiation: Is protocol–based full bladder maintenance using a bladder scanner useful to maintain the bladder volume?[J]. PLoS One, 2015, 10(6): e0128791.

[23] Chen VE, Gillespie EF, Manger RP, et al. The impact of daily bladder filling on small bowel dose for intensity modulated radiation therapy for cervical cancer[J]. Med Dosim, 2019, 44(2): 102–106.

[24] Mahantshetty U, Shetty S, Majumder D, et al. Optimal bladder filling during high–dose–rate intracavitary brachytherapy for cervical cancer: a dosimetric study[J]. J Contemp Brachytherapy, 2017, 9(2): 112–117.

（收稿日期：2025–05–19）