

水吸收剂量国际校准协议 TRS-398^{v7} 使用指南

王志鹏¹, 王坤¹, 金孙均¹, 吴晗^{1,2}, 韩佳乐^{1,2}, 陆刚^{1,2}, 杨小元¹

1. 中国计量科学研究院, 北京 100029; 2. 安徽理工大学机电工程学院, 安徽 淮南 232001

【摘要】为满足外照射治疗束水吸收剂量校准需求,结合国际原子能机构(IAEA)2024年发布的 TRS-398 的第7版内容,给出优化的水吸收剂量校准流程及建议。在参考测量条件方面,给出多种外照射治疗束测量注意事项及电离室适用范围;在电离室测量方面,给出各个修正项的测量方法及射线质转换因子表;在校准不确定度方面,比较更新前后各个影响量的变化。结果表明:采用 IBA FC65-G 电离室校准高能光子束、高能电子束、质子束和轻离子束水吸收剂量值较早期版本的相对偏差依次为-0.4%、0.5%、-1.7%和-1.3%,相对标准不确定度依次为1.0%、1.1%、1.7%和2.6%。本指南结合国内放疗剂量校准水平和实践给出 TRS-398 优化的校准实践,以便高效准确地开展绝对剂量校准工作。

【关键词】水吸收剂量;电离室剂量计;校准系数;射线质转换因子;不确定度;TRS-398

【中图分类号】R318;R811.1

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2024)11-1327-10

User's guide to international calibration protocol TRS-398^{v7} for absorbed dose to water

WANG Zhipeng¹, WANG Kun¹, JIN Sunjun¹, WU Han^{1,2}, HAN Jiale^{1,2}, LU Gang^{1,2}, YANG Xiaoyuan¹

1. National Institute of Metrology, Beijing 100029, China; 2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China

Abstract: To fulfill the calibration requirements for absorbed dose to water in external beam radiotherapy, the summary offers a streamlined calibration procedure and recommendations in accordance with TRS-398 (version 7) published by International Atomic Energy Agency in 2024. It addresses various considerations for reference measurement conditions in external beam radiotherapy and defines the appropriate scope for ionization chambers. In terms of ionization chamber measurements, it elaborates on the methods for measuring various correction factors and provides a table of beam quality conversion factors. The calibration uncertainty is examined by comparing the contributions of different factors before and after the update. The results demonstrate that using IBA FC65-G ionization chamber to calibrate high-energy photon beams, high-energy electron beams, proton beams and light ion beams results in relative deviations of -0.4%, 0.5%, -1.7% and -1.3% as compared with the earlier versions, with relative standard uncertainties of 1.0%, 1.1%, 1.7% and 2.6%, respectively. The guideline which is tailored to the national radiotherapy dose calibration standards and practices presents an optimized calibration approach for TRS-398, allowing clinicians to conduct absolute dose calibration more efficiently and accurately.

Keywords: absorbed dose to water; ionization chamber dosimeter; calibration coefficient; beam quality conversion factor; uncertainty; TRS-398

前言

为了降低放射治疗束水吸收剂量(D_w)测量不确定度,国际原子能机构(IAEA)于2000年出版了第一

版《外照射放疗剂量测定:基于水吸收剂量标准的剂量测定国际实施规程》(原子能机构技术报告系列第398号(TRS-398))^[1]。目前国际上大多数医院外照射放疗剂量均溯源至基于⁶⁰Co γ 射线水吸收剂量标准网络体系。尽管我国现行的JJG 589-2008《医用电子加速器辐射源》^[2]仍然采用IAEA TRS-277方案通过传递⁶⁰Co γ 射线空气比释动能(N_k)或照射量(N_x)作为水吸收剂量的传递物理量,实际上通过传递 N_k 或 N_x 再测量 D_w 过程中涉及较多物理过程, D_w 的不确定度高达4%($k=1$)^[3],而作为最早定义放疗剂量不确定度的国际电离辐射单位委员会(ICRU)1976

【收稿日期】2024-06-05

【基金项目】国家重点研发计划(2021YFF0603600);质量技术基础能力建设专项(ANL2402)

【作者简介】王志鹏,博士,助理研究员,研究方向:水吸收剂量基准相关研究,E-mail: wangzp@nim.ac.cn

【通信作者】王坤,博士,研究员,研究方向:辐射剂量学,E-mail: wangkun@nim.ac.cn

年给出的 $\pm 5\%$ 剂量范围^[4],是基于95%的置信区间,对应的 D_w 的不确定度应为2.5%($k=1$)。后来Wambersie^[5]结合放射生物学和临床数据提出 $\pm 3.5\%$ 的要求,IAEA也在人类健康系列报告(HHS-31)提出 D_w 的不确定度应为3%($k=1$)的要求^[6]。近年来随着放疗技术的普及和推广,我国已进入精准放疗时代,对放疗设备输出剂量精度提出更高要求。国家市场监督管理总局发布JJF1743-2019《放射治疗用电离室剂量计水吸收剂量校准规范》^[7],国家癌症中心/国家肿瘤质控中心发布NCC/T-RT 002-2021《基于水吸收剂量校准因子的高能光子束和电子束吸收剂量测定指南》^[8],使得我国在计量技术法规和临床应用方面均采用TRS-398作为放疗剂量测量的重要依据,通过传递 ^{60}Co γ 辐射场的水吸收剂量校准系数($N_{D,w}$)进行 D_w 的量值传递,以满足我国精准放疗技术需求。本指南结合2024版TRS-398^[9]及我国外照射放疗剂量校准能力给出并讨论电离室剂量计基于 $N_{D,w}$,测量 ^{60}Co γ 射束、高能光子束、高能电子束、医用质子束和碳离子束水吸收剂量中电离室选择、射线质转换因子获取、电离室修正因子测量和水吸收剂量不确定度比较等相关问题。

1 基于TRS-398水吸收剂量校准方法

1.1 基于TRS-398水吸收剂量校准的基本原理

基于TRS-398给出电离室剂量计基于参考射线束 Q_0 的水吸收剂量校准系数 N_{D,w,Q_0} ,测量待测射束 Q 的水吸收剂量 $D_{w,Q}$:

$$D_{w,Q} = M_Q \cdot N_{D,w,Q_0} \cdot k_{Q,Q_0} \quad (1)$$

其中,参数射束为 ^{60}Co γ 的射束通常省去 Q_0 ,水吸收剂量校准系数简写为 $N_{D,w}$;参考束 Q_0 至测量束 Q 的射线质转换因子简写为 k_Q ;式(1)可简写为式(2):

$$D_{w,Q} = M_Q \cdot N_{D,w} \cdot k_Q \quad (2)$$

其中, M_Q 表示电离室剂量计在射束 Q 中修正后的电离电荷量,由式(3)计算:

$$M_Q = M_{\text{raw}} \cdot k_{\text{pol}} \cdot k_s \cdot k_{\text{elec}} \cdot k_{\text{dd}} \cdot k_{\text{TP}} \quad (3)$$

其中, M_{raw} 为未修正的电离电荷, k_{pol} 表示极化效应, k_s 为离子复合效应, k_{elec} 为静电计修正, k_{dd} 为测量深度处横向剂量分布不均匀修正, k_{TP} 为空气密度修正。

为了便于用户使用,针对各种射束水吸收剂量校准时,对TRS-398最新版^[9]提供的相应关键数据进行摘录引用,对水吸收剂量修正因子在 ± 1.001 以内或其对标准不确定度贡献小于0.1%的影响量进行了省略处理,如有深入研究需求,可参考文献[9]提供的方法详加分析。

1.2 基于TRS-398水吸收剂量校准优势

相比 N_k 或 N_x , $N_{D,w}$ 有3个主要优势。一是同类型

不同序列号电离室 $N_{D,w}/N_k$ 值缺乏恒定性,国际计量局(BIPM)给出了高达0.8%的差异性^[10],通过传递 $N_{D,w}$ 能够将特定电离室的差异包含其中,从而消除采用 N_k 时对同类型电离室都有相同的相关不确定度分量假设的影响,进而显著降低用户测量 D_w 的不确定度;二是国际上几乎所有用于传递 N_k 的基准实验室均采用电离法,很难通过国际比对消除传递 N_k 时潜在的系统偏差^[11],而传递 $N_{D,w}$ 的基准实验室可以采用电离法^[12]、量热法(石墨量热法和水量热法)和Fricke剂量法^[13],这些方法不涉及相同的假设或估计的修正系数,通过国际比对可以组成更加稳健的水吸收剂量国际基准体系;三是基于 N_k 或 N_x 测量 D_w 是基于多个系数和扰动修正因子^[2],而基于 $N_{D,w}$ 测量 D_w 只有一个系数和一个修正因子,使用公式更加简单。

本次更新的TRS-398(2024版)采用了国际上多数水吸收剂量基准实验室最新的研究成果,不仅更新了可用的治疗水平电离室的类型,还在蒙特卡罗模拟基础上增加实验研究值^[14-17],给出了射线质转换因子(k_Q)的最佳估计不确定度。使得依据最新TRS-398,采用推荐电离室获得的 ^{60}Co γ 射束、高能光子束、高能电子束和质子束 D_w 的不确定度在1.7%($k=1$)以内,轻离子束 D_w 的不确定度为2.7%($k=1$),较好地满足国内外精准放疗对剂量测量的需求。

1.3 国内基于TRS-398水吸收剂量校准服务

中国计量科学研究院(NIM)不仅建立了基于水量热法的 ^{60}Co γ 射线水吸收剂量装置,还在高能光子束和电子束辐射场开展水吸收剂量量传体系的研究^[17],同时联合质子碳离子中心(如山东第一医科大学附属肿瘤医院)开展质子碳离子束绝对剂量标准和治疗水平电离室校准体系的研究。目前每年溯源至NIM的 ^{60}Co γ 射线水吸收剂量基准的剂量计约700台,同时NIM还可以开展6、10和25 MV光子及高能电子束水吸收剂量校准服务,针对国产剂量计或新型剂量计通过提供水吸收剂量校准系数($N_{D,w}$)和射线质转换因子(k_Q)的方式满足用户校准需求,针对质子碳离子束也开展了多种剂量计 k_Q 值的实验研究,以满足国内外照射放疗剂量对基准校准体系的需求。

2 外照射放疗束水吸收剂量校准实施

2.1 ^{60}Co γ 射束水吸收剂量校准

采用基于 ^{60}Co γ 射束给出的 $N_{D,w}$ 校准系数校准 ^{60}Co γ 射束时,显然用户射线质与校准射线质一致,此时 k_Q 值为1。考虑校准实验室与用户采用的极化电压相同,电离室又与静电计组合校准, ^{60}Co γ 射束作为连续束也不需要离子复合修正。对式(3)进

行简化并代入式(2)可导出⁶⁰Co γ射束的水吸收剂量 D_w :

$$D_w = N_{D,w} \cdot M_{\text{raw}} \cdot k_{\text{TP}}$$

(4)

简而言之,用户只需要考虑测量时水模体的温度及空气的气压对电离室探测器灵敏体内空气密度的修正即可,该修正值由式(5)计算:

$$k_{\text{TP}} = \frac{273.15 + T}{293.15} \cdot \frac{101.325}{P}$$

(5)

其中, T 和 P 分别为电离室灵敏体内空气温度和气压,单位分别为℃和kPa,此处要特别注意的是为了让电离室空腔内温度和气压值与水模体的温度和周围气压相同,需要留足相应的平衡时间,水模体内水温尽量与空气温度接近,且校准时应控制模体温度变化,因此建议水模体和剂量计量最好放在治疗室内或相似条件的备用间。

根据 TRS-398 更新前后进行对比,获得⁶⁰Co γ射束水吸收剂量校准不确定度,如表 1 所示,通过对用户剂量计长期稳定性和建立参考条件进行重新评定,对 D_w 值的不确定度进行了较小的优化。

表 1 ⁶⁰Co γ射束水吸收剂量校准不确定度(%)

Table 1 Calibration uncertainty of absorbed dose to water for ⁶⁰Co γ-ray beams (%)

物理量和步骤	相对标准不确定度	
	更新前	更新后
步骤 1: 标准实验室校准		
基准实验室获得的 $N_{D,w}$	0.5	0.5
次级标准的长期稳定性	0.1	0.1
$N_{D,w}$ 在标准实验室校准用户剂量计	0.4	0.4
步骤 1 的合成不确定度	0.6	0.6
步骤 2: 用户 ⁶⁰ Co γ射束测量		
用户剂量计的长期稳定性	0.3	0.2
建立参考条件	0.5	0.3
计时器或射束监督单元读数	0.1	0.1
校准的影响量	0.3	0.3
步骤 2 的合成不确定度	0.6	0.5
D_w 的合成不确定度(步骤 1 和 2)	0.9	0.8

2.2 加速器光子束水吸收剂量校准

在加速器光子束方面,将参考测量深度(z_{ref})统一为等效水深 10 g·cm⁻²条件测量。采用基于 $N_{D,w}$ 校准系数校准光子束水吸收剂量值时需要计算或查找 k_Q 值,还需要考虑电离室的离子复合修正、剂量分布均匀性修正等。对式(3)进行简化并代入式(2)可导出加速器光子束的水吸收剂量 $D_{w,Q}$:

$$D_{w,Q} = N_{D,w} \cdot M_{\text{raw}} \cdot k_{\text{TP}} \cdot k_Q \cdot k_s \cdot k_{\text{dd}}$$

(6)

加速器光子束水吸收剂量校准实验分为两步。一是选择合适的探测器扫描待校准能量光子束的深度剂量分布和水深为 10 cm 的剖面剂量分布,根据百分深度剂量分布(PDD)曲线获得待校准光子束的射线质($\text{TPR}_{20,10}$)并依据该射线质值和探测型号查表获得 k_Q 值,并根据剖面剂量分布(Profile)曲线计算剂量分布不均匀性修正;二是采用双压法测量待校准射束在治疗模式剂量率对应的 k_s 值,再测量特定监督单元(MU)对应的 M_{raw} 值,依据式(6)计算 $D_{w,Q}$ 值。

在电离室离子复合修正因子的测量方面,根据 TRS-398,假定电离电荷的倒数($1/M$)和极化电压的倒数($1/V$)之间存在着线性关系, M_1 、 M_2 分别为极化电压为 V_1 、 V_2 时电离电荷值,其中 V_1 为常用电压值,极化电压 V_1 条件的 k_s 由式(7)计算,相应拟合系数 a_0 、 a_1 、 a_2 查表 2 获取。

$$k_s = a_0 + a_1 \left(\frac{M_1}{M_2} \right) + a_2 \left(\frac{M_1}{M_2} \right)^2$$

(7)

表 2 双压法计算 k_s 的拟合系数

Table 2 Fitting coefficients for k_s calculation using the double voltage method

V_1/V_2	脉冲束			脉冲扫描束		
	a_0	a_1	a_2	a_0	a_1	a_2
2.0	2.337	-3.636	2.299	4.711	-8.242	4.533
2.5	1.474	-1.587	1.114	2.719	-3.977	2.261
3.0	1.198	-0.857	0.677	2.001	-2.402	1.404
3.5	1.080	-0.542	0.463	1.665	-1.467	0.984
4.0	1.002	-0.363	0.341	1.468	-1.200	0.734
5.0	0.975	-0.188	0.214	1.279	-0.750	0.474

在光子束 k_Q 值获取方面,增加 k_Q 与电离室类型和射线质的拟合关系,如式(8)所示:

$$k_Q(\text{TPR}_{20,10}) = \frac{1 + \exp\left(\frac{a - 0.57}{b}\right)}{1 + \exp\left(\frac{a - \text{TPR}_{20,10}}{b}\right)}$$

(8)

相应的电离室特定系数 a 和 b 查表 3 获得。如表 3 所示,式(8)所涉及电离室特定常数系数为蒙特卡罗模拟计算值和多数剂量标准实验室直接测量值回归分析获得,通过该方法将 k_Q 值的标准不确定度由 1.0%降低至 0.6%,若 k_Q 值为水吸收剂量基准实验室直接测量,其标准不确定度约为 0.3%^[17-18]。因此采用新版 TRS-398 或者基准实验室直接测量的 k_Q 值可以

显著提高用户校准 $D_{w,Q}$ 值的精度,以满足精准放疗对剂量测量的需求。当然用户也可以根据电离室类型和待测光子束 $TPR_{20,10}$ 值,通过查表4采用插值的方式获得 k_Q 值。

表3 k_Q 的拟合系数
Table 3 Fitting coefficients for k_Q

电离室类型	包含数据点数		特征参数	
	计算值	实验值	a	b
Capintec PR-06C Farmer	10	3	1.068 33	-0.082 62
Exradin A1SL Miniature	14	6	1.216 33	-0.133 51
Exradin A12 Farmer	35	6	1.097 83	-0.095 44
Exradin A12S Short Farmer	16	3	1.114 99	-0.100 57
Exradin A18	10	3	1.104 87	-0.096 70
Exradin A19 Classic Farmer	29	6	1.120 24	-0.104 93
Exradin A26	10	3	1.095 87	-0.093 83
Exradin A28	19	3	1.124 53	-0.102 78
IBA CC13	42	6	1.114 41	-0.102 60
IBA CC25	10	3	1.089 81	-0.092 54
IBA FC65-G Farmer	64	20	1.097 52	-0.096 42
NE 2571 Farmer	126	28	1.089 18	-0.092 22
PTW 30010 Farmer	25	3	1.125 94	-0.107 40
PTW 30012 Farmer	25	13	1.124 42	-0.104 15
PTW 30013 Farmer	65	23	1.182 73	-0.132 56
PTW 31010 Semiflex	29	6	1.237 55	-0.152 95
PTW 31013 Semiflex	48	6	1.192 97	-0.133 66
PTW 31016 PinPoint 3D	15	-	1.116 50	-0.108 41
PTW 31021 Semiflex 3D	37	13	1.296 12	-0.165 14
PTW 31022 PinPoint 3Dc	25	6	1.144 35	-0.111 30
Sun Nuclear SNC125c	25	-	1.097 00	-0.097 49
Sun Nuclear SNC600c Farmer	25	5	1.068 00	-0.084 85

采用本次更新的 TRS-398 测量加速器光子束 $D_{w,Q}$ 值的各个影响量的标准不确定度如表5所示。由于在标准实验室校准环节各个影响量与 ^{60}Co γ 射束相同,表5只给出了用户测量相关的影响量,通过重新评估用户剂量计长期稳定性,建立参考、射束监督单元读数和射线质转换因子等将 $D_{w,Q}$ 值的合成标准不确定度重新评估为1.0%,有效提高临床剂量精度。

2.3 加速器电子束水吸收剂量校准

采用基于 $N_{D,w}$ 校准系数校准加速器电子束时与光子束类似也需要计算或查找 k_Q 值,也需要考虑电离室的离子复合修正、剂量分布均匀性修正等。除此之外电子束参考深度 z_{ref} 与其能量或射线质 R_{50} 有关, z_{ref} 值为 $0.6R_{50}-0.1\text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$,类似的加速器电子束 $D_{w,Q}$ 同样由式(6)计算,不同类型电离室和高能电子束 R_{50} 与 k_Q 值的可查表6获得。在介质选择方面,删除了使用水等校材料测量电子束 $D_{w,Q}$ 值的方案,并将圆柱形电离室的使用范围由电子束射线质最大剂量50%对应的深度值 $R_{50}>4\text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$ 或表面平均能量 $E_0>10\text{ MeV}$ 扩大至 $R_{50}>3\text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$ 或 $E_0>8\text{ MeV}$ 。采用圆柱形电离室测量时,其参考点定位深度应为 $z_{\text{ref}}+0.5r_{\text{cav}}$ (其中, r_{cav} 表示所用圆柱形电离室的灵敏体积半径径)。

与加速器光子束不同,尽管很多基准实验室不具备直接提供电子束水吸收剂量校准服务,TRS-398依然给出了在电子束 R_{50} 为 $7.5\text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$ 时的射线质转换因子($k_{Q,7.5}$),也称为电子束的能量转换因子,其水吸收剂量由式(9)计算:

$$D_{w,Q} = M_{\text{raw}} \cdot N_{D,w,7.5} \cdot k_{Q,7.5} \cdot k_{\text{TP}} \cdot k_s \cdot k_{\text{dd}} \tag{9}$$

其中, $N_{D,w,7.5}$ 表示电离室在电子束射线质 R_{50} 为 $7.5\text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$ 的水吸收剂量校准系数, $k_{Q,7.5}$ 值可以查表7获得。该方案直接将电子束 $D_{w,Q}$ 测量溯源至电子束,实现了同

表4 多种类型电离室在高能光子束不同 $TPR_{20,10}$ 处对应的 k_Q 值
Table 4 k_Q values corresponding to different $TPR_{20,10}$ for various types of ionization chambers in high-energy photon beams

电离室类型	射线质 $TPR_{20,10}$											
	0.56	0.59	0.62	0.65	0.68	0.70	0.72	0.74	0.76	0.78	0.80	0.82
IBA CC13	1.000 5	0.998 9	0.996 9	0.994 2	0.990 6	0.987 6	0.983 9	0.979 5	0.974 2	0.967 8	0.960 1	0.951 0
IBA CC25	1.000 4	0.999 1	0.997 4	0.995 0	0.991 8	0.989 0	0.985 5	0.981 2	0.976 0	0.969 5	0.961 7	0.952 1
IBA FC65-G	1.000 4	0.999 0	0.997 2	0.994 6	0.991 2	0.988 2	0.984 6	0.980 2	0.974 8	0.968 3	0.960 3	0.950 7
PTW 30010	1.000 5	0.998 9	0.996 7	0.993 8	0.990 1	0.986 9	0.983 2	0.978 7	0.973 4	0.967 1	0.959 5	0.950 6
PTW 30011	1.000 5	0.998 9	0.996 9	0.994 2	0.990 6	0.987 5	0.983 8	0.979 3	0.973 9	0.967 4	0.959 5	0.950 1
PTW 30012	1.000 4	0.999 0	0.997 0	0.994 4	0.991 0	0.988 1	0.984 6	0.980 4	0.975 4	0.969 4	0.962 2	0.953 6
PTW 30013	1.000 7	0.998 4	0.995 6	0.992 0	0.987 6	0.984 0	0.980 0	0.975 3	0.969 9	0.963 6	0.956 5	0.948 4
PTW 31010	1.000 8	0.998 2	0.995 2	0.991 4	0.986 9	0.983 5	0.979 5	0.975 0	0.970 0	0.964 3	0.957 9	0.950 7
PTW 31013	1.000 7	0.998 5	0.995 8	0.992 4	0.988 2	0.984 8	0.981 0	0.976 5	0.971 4	0.965 5	0.958 8	0.951 1
PTW 31021	1.000 7	0.998 4	0.995 7	0.992 5	0.988 6	0.985 6	0.982 3	0.978 6	0.974 4	0.969 7	0.964 5	0.958 7

表5 采用 $N_{D,w}$ 校准加速器光子束水吸剂量的不确定度(%)
Table 5 Uncertainty in calibrating photon beam absorbed dose to water using $N_{D,w}$ (%)

物理量和步骤	相对标准不确定度	
	更新前	更新后
步骤1:标准实验室校准		
步骤1的合成不确定度	0.6	0.6
步骤2:用户加速器光子束测量		
用户剂量计的长期稳定性	0.3	0.2
建立参考条件	0.4	0.3
计时器或射束监督单元读数	0.6	0.3
校准的影响量	0.4	0.3
射线质转换因子 k_Q	1.0	0.6
步骤2的合成不确定度	1.4	0.8
$D_{w,Q}$ 的合成不确定度(步骤1和2)	1.5	1.0

质溯源,通过降低射线质转换因子的方式使得电子束水吸收剂量校准不确定度更小。

与光子束类似,在标准实验室校准环节各个影响量与 ^{60}Co γ 射束相同,因此表8和表9分别只给出了用户采用 $N_{D,w}$ 和 $N_{D,w,7.5}$ 校准系数,获得电子束水吸收剂量值过程中各个影响量的不确定度及其合成标准不确定度,与更新前相比, $D_{w,Q}$ 值的不确定度被重新评估为1.0%左右,与光子束基本一致,尤其是采用 $N_{D,w,7.5}$ 校准系数获得 $D_{w,Q}$ 值的不确定度略优于光子束,为电子束临床应用提供更好的剂量测量技术支持。

2.4 质子束水吸收剂量校准

本次更新对临床质子束剂量递送系统进行分类。将质子束分为宽束(利用散射或均匀扫描技术)和笔形扫描(Pencil Beam Scanning, PBS)输运系统。

表6 多种类型电离室在高能电子束不同 R_{50} 对应的 k_Q 值
Table 6 k_Q values corresponding to different R_{50} for various types of ionization chambers in high-energy electron beams

电离室类型	射线质 $R_{50}/\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$													
	1.0	1.4	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	7.0	8.0	10.0
PTW34001	0.9743	0.9645	0.9518	0.9428	0.9349	0.9281	0.9222	0.9171	0.9127	0.9088	0.9055	0.9001	0.8960	0.8907
IBA FC65-G	-	-	-	-	0.9328	0.9279	0.9241	0.9210	0.9184	0.9163	0.9144	0.9114	0.9090	0.9055
PTW 30013	-	-	-	-	0.9300	0.9247	0.9210	0.9180	0.9155	0.9135	0.9118	0.9090	0.9068	0.9037
PTW 30012	-	-	-	-	0.9384	0.9331	0.9290	0.9257	0.9230	0.9207	0.9187	0.9156	0.9131	0.9094
ExradinA12	-	-	-	-	0.9353	0.9304	0.9264	0.9232	0.9205	0.9182	0.9163	0.9130	0.9104	0.9066
ExradinA19	-	-	-	-	0.9320	0.9273	0.9236	0.9205	0.9178	0.9156	0.9136	0.9103	0.9077	0.9036

表7 多种类型电离室在高能电子束不同 R_{50} 对应的 $k_{Q,7.5}$ 值
Table 7 $k_{Q,7.5}$ values corresponding to different R_{50} for various types of ionization chambers in high-energy electron beams

电离室类型	射线质 $R_{50}/\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$													
	1.0	1.4	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	7.0	8.0	10.0
PTW34001	1.0851	1.0742	1.0600	1.0500	1.0412	1.0337	1.0271	1.0214	1.0164	1.0122	1.0084	1.0024	0.9979	0.9919
PTW34045	1.0861	1.0747	1.0601	1.0498	1.0409	1.0332	1.0266	1.0209	1.0160	1.0118	1.0082	1.0023	0.9980	0.9924
IBA PPC40	1.0826	1.0721	1.0583	1.0485	1.0401	1.0327	1.0263	1.0208	1.0160	1.0118	1.0082	1.0024	0.9980	0.9922
IBA PPC05	1.0647	1.0572	1.0474	1.0401	1.0337	1.0279	1.0229	1.0183	1.0143	1.0107	1.0076	1.0022	0.9980	0.9921
ExradinA10	1.0714	1.0611	1.0482	1.0393	1.0317	1.0254	1.0200	1.0155	1.0117	1.0085	1.0058	1.0016	0.9986	0.9950
ExradinA11	1.0720	1.0615	1.0483	1.0393	1.0316	1.0252	1.0199	1.0154	1.0116	1.0084	1.0057	1.0016	0.9987	0.9952
IBAFC65G	-	-	-	-	1.0249	1.0195	1.0154	1.0120	1.0091	1.0068	1.0047	1.0014	0.9988	0.9949
PTW30013	-	-	-	-	1.0240	1.0186	1.0145	1.0112	1.0085	1.0062	1.0043	1.0012	0.9989	0.9955
PTW30012	-	-	-	-	1.0264	1.0207	1.0162	1.0126	1.0096	1.0071	1.0049	1.0014	0.9987	0.9947

采用基于 $N_{D,w}$ 校准系数校准质子束时,与加速器光子或电子束有较大差异。首先是质子束射线质不再仅

仅表征单能质子束或展宽质子束在水中的穿透性,而是结合质子水吸剂量测量深度,用该深度至质子束

表8 采用 $N_{D,w}$ 校准加速器电子束水吸剂量的不确定度(%)

Table 8 Uncertainty in calibrating electron beam absorbed dose to water using $N_{D,w}$ (%)

物理量和步骤	相对标准不确定度更新前		相对标准不确定度更新后	
	圆柱形	平板	圆柱形	平板
	$R_{50} \geq 4 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$	$R_{50} \geq 1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$	$R_{50} \geq 3 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$	$R_{50} \geq 2 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$
步骤1:标准实验室校准				
步骤1的合成不确定度	0.6	0.6	0.6	0.6
步骤2:用户加速器光子束测量				
用户剂量计的长期稳定性	0.3	0.4	0.2	0.4
建立参考条件	0.4	0.6	0.3	0.3
计时器或射束监督单元读数	0.6	0.6	0.3	0.3
校准的影响量	0.4	0.5	0.3	0.3
射线质转换因子 k_Q	1.2	1.7	0.7	0.7
k_Q 应用至待测电子束和电离室组合的影响	-	-	0.2	0.2
步骤2的合成不确定度	1.5	2.0	0.9	1.0
$D_{w,Q}$ 的合成不确定度(步骤1和2)	1.6	2.1	1.1	1.2

表9 采用 $N_{D,w,7.5}$ 校准加速器电子束水吸剂量的不确定度(%)

Table 9 Uncertainty in calibrating electron beam absorbed dose to water using $N_{D,w,7.5}$ (%)

物理量和步骤	相对标准不确定度更新前		相对标准不确定度更新后	
	圆柱形	平板	圆柱形	平板
	$R_{50} \geq 4 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$	$R_{50} \geq 1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$	$R_{50} \geq 3 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$	$R_{50} \geq 2 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$
步骤1:标准实验室校准				
基准实验室获得的 $N_{D,w,7.5}$	0.7	0.7	0.5	0.5
步骤1的合成不确定度	0.7	0.7	0.5	0.5
步骤2:用户加速器光子束测量				
用户剂量计的长期稳定性	0.3	0.4	0.2	0.4
建立参考条件	0.4	0.6	0.3	0.3
计时器或射束监督单元读数	0.6	0.6	0.3	0.3
校准的影响量	0.4	0.5	0.3	0.3
能量转换因子 $k_{Q,7.5}$	0.9	0.6	0.2	0.2
$k_{Q,7.5}$ 应用至待测电子束和电离室组合的影响	-	-	0.1	0.1
步骤2的合成不确定度	1.3	1.2	0.6	0.7
$D_{w,Q}$ 的合成不确定度(步骤1和2)	1.4	1.4	0.8	0.9

最远端射程的距离定义为其射线质 R_{res} 。圆柱形电离室仅推荐用在 $R_{\text{res}} \geq 0.5 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$ 的宽束和 $R_{\text{res}} \geq 15 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$ 的PBS系统。平板电离室依然适用于所有类型质子束。辐射野方面规定平板电离室的空腔直径或圆柱形电离室的空腔长应不大于参考射野的一半。

用户依据测量质子束水吸收剂量计的 R_{res} 值,查找 k_Q 值。本次更新后,在测量质子束 R_{res} 方面只推荐平板型电离室,意味着常用的三维水箱扫场用的小体积圆

柱形电离室也需要替换为平板型电离室。在宽束的展宽布拉格峰(SOBP)模式,电离室的有效测量点定位SOBP的中心。针对PBS系统,在辐射野方面取决于束斑的尺寸推荐值,参考测量深度根据质子束射程 $R_p \geq 5 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$ 选择为 $2 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$, $R_p < 5 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$ 选择为 $1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。另外,还需要着重考虑电离室的离子复合修正、剂量分布均匀性修正等,其 $D_{w,Q}$ 值同样由式(6)计算。

由于质子束的 k_Q 值在 $R_{\text{res}} > 2 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时的相对变化量

在 0.3% 以内, 因此给出了 R_{res} 为 $2\text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$ 和 $30\text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$ 两个射线质条件的 k_Q 值并与早期版本进行比较, 如表 10 所示。根据表 10 可知, 对于前期采用圆柱形电离室校准的用户, 采用更新的 k_Q 值后水吸收剂量值预计减小 1% 左右, 采用平板电离室的变化略小。

表 10 多种类型电离室在两种质子束 R_{res} 处的 k_Q 值与早期版本的比较
Table 10 Comparison of k_Q values at two R_{res} for various types of ionization chambers in proton beams with earlier versions

电离室类型	$R_{\text{res}}=2\text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$		相对偏差/%	$R_{\text{res}}=30\text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$		相对偏差/%
	TRS-398 2024	TRS-398 2000		TRS-398 2024	TRS-398 2000	
IBAF65-G	1.023 1	1.041	-1.72	1.020 7	1.039	-1.76
PTW 30010	1.023 7	1.030	-0.61	1.021 3	1.029	-0.75
PTW 30011	1.018 5	1.034	-1.50	1.016 1	1.032	-1.54
PTW30012	1.030 4	1.041	-1.02	1.028 1	1.039	-1.05
PTW30013	1.025 6	1.031	-0.52	1.023 2	1.029	-0.56
PTW31010	1.023 1	-	-	1.020 8	-	-
PTW31013	1.019 8	-	-	1.017 5	-	-
PTW31016	1.004 6	-	-	1.002 7	-	-
PTW 31021	1.031 4	-	-	1.029 2	-	-
ExradinA10	1.027 0	-	-	1.025 5	-	-
IBA PPC05	0.992 4	-	-	0.991 0	-	-
IBA PPC40	0.995 4	-	-	0.994 0	-	-
PTW 34045	1.005 0	1.003	0.20	1.003 5	1.001	0.25
PTW 34001	0.997 0	1.002	-0.50	0.995 6	1.000	-0.44

在不确定度方面, 由于基于质子束辐射场的绝对剂量相关研究相对不充分, 质子束的 k_Q 值仍然主要基于模拟计算给出, 其不确定度值被重新评定为 1.4%, 仅略小于早期的圆柱形 (1.7%) 和平板型 (2.0%) 电离室的 k_Q 值不确定度。质子束水吸收剂量值的不确定度评定中除了 k_Q 不同外, 其他与光子束相同, 更新后圆柱形和平板型电离室参考剂量校准的合成标准不确定度均为 1.7%。

尽管质子束也提供了在质子束条件的交叉校准程序, 由于质子束水吸收剂量绝对测量装置尚未成熟, 用电离室剂量计作为标准 (参考) 剂量值的不确定度为 1.7%, 因此其交叉校准的意义主要用于用户多支探测器的验证比较。

2.5 轻离子束水吸收剂量校准

最新 TRS-398 采用了 ICRU 在 2019 年发布的第 93 号报告^[19-20], 将原子序数大于氦 ($Z=10$) 原子序数的离子称为重离子, 原子序数 ≤ 10 的离子为轻离子, 相关章节标题由“重离子束”改为了“轻离子束”, 适用范围从原来射程在 $2\sim 30\text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$ 原子序数为 2 (He) 至 18 (Ar) 的离子束改为射程在 $2\sim 30\text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$ 的轻离子束。

在参考剂量测量方面, 对于 SOBP 模式, 仍然是根据 SOBP 宽度 $\geq 2\text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$ 选择圆柱形和平板电离室, SOBP 宽度 $< 2\text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$ 只能选择平板电离室, 电离室的有效测量点定位在 SOBP 的中心。增加了单能轻离子测量的推荐条件, 与质子束 PBS 系统类似参考测量深度为深度剂量分布曲线 (PDD) 的坪区, 圆柱形和平板电离室均可以使用, 其有效测量点定位于等效水深为 $1\text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$ 或 $2\text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$ 处, 其水吸收剂量值同样由式 (6) 计算。

轻离子束 k_Q 值与早期版本进行比较如表 11 所示, 与质子束类似也对电离室种类进行了更新。由表 11 可知, 若用户采用圆柱形电离室校准参考剂量, 采用更新后的 k_Q 值水吸收剂量值预计减小 1% 左右, 采用平板电离室的变化略小。

轻离子束的 k_Q 值也是基于模拟计算获得, 其不确定度被重新评定为 2.4%, 仅比早期的 3.0% 左右略小, 在轻离子束 $D_{w,Q}$ 值合成标准不确定度评定中除 k_Q 外其他影响量也与光子束一致, 更新后圆柱形和平板型电离室参考剂量校准的不确定度分别为 2.6% 和 2.7%。

与质子束不同的是, 如果对采用 RBE 加权产生

表 11 多种类型电离室在轻离子束的 k_Q 值与早期版本的比较
Table 11 Comparison of k_Q values for various types of ionization chambers in light ion beams with earlier versions

电离室类型	k_Q		相对偏差/%
	TRS-398 2024	TRS-398 2000	
IBA CC13	1.027	1.040	-1.25
IBA CC25	1.030	1.040	-0.96
IBA FC65-G	1.028	1.042	-1.34
PTW 30010	1.030	1.031	-0.10
PTW 30011	1.027	1.035	-0.77
PTW 30012	1.037	1.042	-0.48
PTW 30013	1.028	1.032	-0.39
PTW 31010	1.039	-	-
PTW 31013	1.036	-	-
PTW 34001	0.997	1.003	-0.60
PTW 34045	1.006	1.004	-0.20
Exradin A10	1.033	-	-
IBA PPC05	0.993	-	-
IBA PPC40	0.993	-	-

SOBP 条件进行参考剂量测定,还需要增加RBE加权值引入的不确定度,通常可以根据该条件下SOBP区域中实际的物理剂量梯度进行修正。

3 讨论

在光子束方面,表 12 给出了国内校准使用较多的 IBA FC65-G、PTW 30012 和 PTW 30013 电离室在 6 MV($TPR_{20,10}$ 值约为 0.68)和 10 MV($TPR_{20,10}$ 值约为 0.74)光子束的电离室 k_Q 值的比较。更新后 k_Q 值的有效数字增加一位,其值略小于早期值,随能量增加相对偏差具有增大的趋势。

电子束方面,表 13 和表 14 为常用圆柱形和平板型电离室在两个特定射线质处 k_Q 值和 $k_{Q,7.5}$ 值更新前后的变化。显然是 $k_{Q,7.5}$ 值变化相对较小,且NIM已经具备直接给出 $N_{D,w,7.5}$ 校准系数的能力,对于电子束剂量校准准确度要求的用户可以选择该项服务。

根据表 10~表 14 可知,采用更新后的 TRS-398 时,IBA FC65-G 电离室校准高能光子束、高能电子束、质子束和碳离子束 $D_{w,Q}$ 值较早期版本的相对偏差

表 12 光子束 k_Q 值更新前后的比较
Table 12 Comparison of photon beam k_Q values before and after update

电离室类型	$TPR_{20,10}=0.68$		相对偏差/%	$TPR_{20,10}=0.74$		相对偏差/%
	TRS-398 2024	TRS-398 2000		TRS-398 2024	TRS-398 2000	
IBA FC65-G	0.991 2	0.995	-0.38	0.980 2	0.985	-0.49
PTW 30012	0.991 0	0.994	-0.30	0.980 4	0.986	-0.57
PTW 30013	0.987 6	0.990	-0.24	0.975 3	0.980	-0.48

表 13 电子束 k_Q 值更新前后的比较
Table 13 Comparison of electron beam k_Q values before and after update

电离室类型	$R_{50}=4.00\text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$		相对偏差/%	$R_{50}=7.00\text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$		相对偏差/%
	TRS-398 2024	TRS-398 2000		TRS-398 2024	TRS-398 2000	
PTW 34001	0.922 2	0.920	0.24	0.900 1	0.898	0.23
IBA FC65-G	0.924 1	0.920	0.45	0.911 4	0.910	0.15
PTW 30012	0.929 0	0.920	0.98	0.915 6	0.910	0.62
PTW 30013	0.921 0	0.911	1.10	0.909 0	0.901	0.89

依次为-0.4%、0.5%、-1.7%和-1.3%,其相对标准不确定度依次为 1.0%、1.1%、1.7%和 2.6%,意味着采用之前版本校准的 $D_{w,Q}$ 值需要进行调整。当然如果用户采用直接溯源至加速器光子束或电子束,将不受本更新的影响。

TRS-398 在电子束、质子束和轻离子束水吸收剂量校准时仍然要求圆柱形电离室的有效测量点定位在参考测量深度处,该做法主要是修正圆柱形电离室在深度剂量方向的体积均布效应。实际上水吸收剂量初级标准实验室给出 k_Q 实验值的时候通常包

表 14 电子束 $k_{Q,7.5}$ 值更新前后的比较
Table 14 Comparison of electron beam $k_{Q,7.5}$ values before and after update

电离室类型	$R_{50}=4.00\text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$		相对偏差/%	$R_{50}=7.00\text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$		相对偏差/%
	TRS-398 2024	TRS-398 2000		TRS-398 2024	TRS-398 2000	
PTW34001	1.027 1	1.028	-0.09	1.002 4	1.003	-0.06
IBA FC65-G	1.015 4	1.012	0.34	1.001 4	1.002	-0.06
PTW30012	1.016 2	1.013	0.32	1.001 4	1.002	-0.06
PTW30013	1.014 5	1.013	0.15	1.001 2	1.002	-0.08

括了电离室在深度方向的修正值。放疗剂量校准用圆柱形电离室灵敏体积半径通常在 3 mm 内,对于电子束、质子束和轻离子在深度方向的体积修正约在 2 mm 内,且这些粒子束的参考测量点处的剂量梯度通常小于 1.0%/mm,另外有效测量点的实际偏移量仍存在不确定性^[21-22]。因此为了方便用户使用,本指南建议用户继续采用圆柱形电离室的灵敏体积中心进行定位,再根据待测射束参考测量点的剂量梯度确定是否修正,如质子束和轻离子束参考测量深度在坪区或 SOBP 中心,其剂量梯度小于 0.5%/mm,较光子束(在水深 10 cm 处的剂量梯度约 0.7%/mm)还小,因此用户并不需要着重考虑有效测量点的问题。

显然离子复合修正值是质子束,尤其是轻离子束电离室校准其 $D_{w,Q}$ 值应重点考虑的影响量。尽管用户可以参考式(6)和表 2 计算脉冲射束离子复合修正值,实际上目前临床用质子束和碳离子束多数是连续束^[23],因此仍然需要用户绘制 Jaffé 图或参考 Rossomme 等^[24]给出的三电压法以获得最佳的离子复合修正,NIM 也正与质子束和碳离子医学中心合作,开展相关的研究以提高临床剂量校准效率。

另外所有放疗剂量校准测量均需要将测量值修正至 20 °C 和 101.325 kPa 的标准参考条件,而用户所用的温度计和气压计也需要定期校准,以确保空气密度修正 k_{TP} 值的准确性。尽管 TRS-398 在水吸收剂量校准测量中吸收介质推荐是水,同时也解释了不推荐水等校材料的原因是其深度缩放因子和注量修正因子尚无确定性结论所致。实际上水等校材料在具有确定参考深度(如高能光子束、质子束和轻离子束)校准中特别方便,若用户在水模体内完成校准后,基于该条件给出自选的水等校材料的水吸收剂量修正因子后,也可用水等校材料开展水吸收剂量校准工作。此时需要特别注意的是,用户需要定期采用水模体验证水等校材料的修正因子的重复性和长期稳定性。

4 结 论

本次 TRS-398 首次对电离室 k_Q 值及 $D_{w,Q}$ 不确定度进行了较大修订,主要表现为引入水吸收剂量基准实验室给出的实验值,并重新评估 k_Q 值的不确定度,优化基于⁶⁰Co 水吸收剂量校准系数校准临床治疗用射线束 $D_{w,Q}$ 值的不确定度,进一步满足精准放疗技术的需求。

本指南结合国内放射治疗束水吸收剂量校准实践,给出适合临床物理师可快速开展的剂量校准方案,对 TRS-398 中的关键数据库的更新前后进行比较,讨论用户实际校准时电离室有效测量点修正和离子复合修正应注意的事项,以方便用户对现有校准结果进行修正。

【参考文献】

[1] International Atomic Energy Agency. Absorbed dose determination in external beam radiotherapy: an international code of practice for dosimetry based on standards of absorbed dose to water: STI/DOC/010/398[S]. Vienna, Austria: IAEA, 2000.

[2] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 医用电子加速器辐射源检定规程: JJG 589-2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009. General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Medical electron accelerator radiation source: JJG 589-2008[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009.

[3] International Atomic Energy Agency. The use of plane parallel ionization chambers in high energy electron and photon beams: an international code of practice for dosimetry: STI/DOC/010/381[S]. Vienna, Austria: IAEA, 1997.

[4] International Commission on Radiation Units & Measurements, Inc. Determination of absorbed dose in a patient irradiated by beams of X or gamma rays in radiotherapy: ICRU-REPORT 24[S]. Bethesda, MD, USA: ICRU, 1976.

[5] Wambersie A. What accuracy is required and can be achieved in radiation therapy (review of radiobiological and clinical data)[J]. Radiochim Acta, 2001, 89(4/5): 255-264.

[6] International Atomic Energy Agency. Accuracy requirements and uncertainties in radiotherapy: STI/PUB/1679[S]. Vienna, Austria: IAEA, 2016.

[7] 国家市场监督管理总局. 放射治疗用电离室剂量计水吸收剂量校准规范: JJF 1743-2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020. State Administration for Market Regulation. Calibration specification of water absorbed dose of dosimeters with ionization chambers as used in radiotherapy: JJF 1743-2019[S]. Beijing: Standards Press of China, 2020.

[8] 国家癌症中心/国家肿瘤质控中心. 基于水吸收剂量校准因子的高

- 能光子束和电子束吸收剂量测定指南[J]. 中华放射肿瘤学杂志, 2022, 31(5): 410-420.
- National Cancer Center/National Cancer Quality Control Center. Absorbed dose determination in high-energy photon beams and electron beams based on standards of absorbed dose to water[J]. Chinese Journal of Radiation Oncology, 2022, 31(5): 410-420.
- [9] International Atomic Energy Agency. Absorbed dose determination in external beam radiotherapy: an international code of practice for dosimetry based on standards of absorbed dose to water: IAEA TRS-398[S]. Vienna, Austria: IAEA, 2024.
- [10] Boutillon M, Perroche AM. Determination of calibration factors in terms of air kerma and absorbed dose to water in the ^{60}Co gamma rays [EB/OL]. (1993-12-01). <https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/76605>.
- [11] Bielajew AF, Rogers DW. Implications of new correction factors on primary air kerma standards in ^{60}Co -beams[J]. Phys Med Biol, 1992, 37(6): 1283-1291.
- [12] Boutillon M, Perroche AM. Ionometric determination of absorbed dose to water for cobalt-60 gamma rays[J]. Phys Med Biol, 1993, 38(3): 439-454.
- [13] Seuntjens J, Duane S. Photon absorbed dose standards[J]. Metrologia, 2009, 46(2): S39-S58.
- [14] Renaud J, Sarfehnia A, Marchant K, et al. Direct measurement of electron beam quality conversion factors using water calorimetry[J]. Med Phys, 2015, 42(11): 6357-6368.
- [15] Muir BR, Cojocaru CD, McEwen MR, et al. Electron beam water calorimetry measurements to obtain beam quality conversion factors [J]. Med Phys, 2017, 44(10): 5433-5444.
- [16] Krauss A, Kapsch RP. Direct determination of kQ factors for cylindrical and plane-parallel ionization chambers in high-energy electron beams from 6 MeV to 20 MeV[J]. Phys Med Biol, 2018, 63(3): 035041.
- [17] Wang ZP, Wang K, Jin SJ, et al. Development and application of absorbed dose primary standard for ^{60}Co and high-energy photon beams using water calorimetry[J]. Metrologia, 2023, 60(2): 025008.
- [18] McEwen MR. Measurement of ionization chamber absorbed dose kQ factors in megavoltage photon beams[J]. Med Phys, 2010, 37(5): 2179-2193.
- [19] Wambersie A, Deluca PM, Andreo P, et al. Light" or Heavy" ions: a debate of terminology?[J]. Radiother Oncol, 2004, 73(s2).
- [20] ICRU. Prescribing, recording, and reporting light ion beam therapy [EB/OL]. <https://www.icru.org/report/icru-report-93-prescribing-recording-and-reporting-light-ion-beam-therapy/>.
- [21] Kawrakow I. On the effective point of measurement in megavoltage photon beams[J]. Med Phys, 2006, 33(6): 1829-1839.
- [22] McEwen MR, Kawrakow I, Ross CK. The effective point of measurement of ionization chambers and the build-up anomaly in MV X-ray beams[J]. Med Phys, 2008, 35(3): 950-958.
- [23] Palmans H, Thomas R, Kacperek A. Ion recombination correction in the Clatterbridge Centre of Oncology clinical proton beam[J]. Phys Med Biol, 2006, 51(4): 903-917.
- [24] Rossomme S, Delor A, Lorentini S, et al. Three-voltage linear method to determine ion recombination in proton and light-ion beams[J]. Phys Med Biol, 2020, 65(4): 045015.

(编辑:薛泽玲)