

# 移动式加速器术中放射治疗的辐射防护与安全评价

马永忠 万玲 娄云 李慧娟 王宏芳 冯泽臣

**【摘要】** 目的 评估移动式加速器术中放射治疗(IORT)的辐射防护与安全状况,为 IORT 临床应用中的辐射安全提供指导。方法 以某医院拟用的 1 台 MOBETRON 移动式加速器及其场所为研究目标,确定 IORT 的工作负荷及场所外围人员的年剂量管理目标值,估算极端情况下 IORT 室外围的辐射水平和人员所受的剂量,核算 IORT 治疗场所的辐射屏蔽。结果 该 IORT 治疗室在仅采用相当于普通 X 射线诊断装置的屏蔽条件下,治疗室外与靶不同距离关注位置的剂量率为:东墙外 35~78  $\mu\text{Sv/h}$ ;南墙外 89  $\mu\text{Sv/h}$ ,西墙外 70~84  $\mu\text{Sv/h}$ ,北墙外 75~106  $\mu\text{Sv/h}$ ;IORT 室楼下普通治疗室 64  $\mu\text{Sv/h}$ ,室顶外围空间为 45  $\mu\text{Sv/h}$ 。估算出年累积出束 5 h 时场所外围职业人员的年剂量最高为 0.53 mSv,公众所受年剂量低于 0.1 mSv,均满足剂量管理目标值的要求。加速器 IORT 设备及场所设置有相应的安全联锁、防护设施与管理措施,可有效制约设备运行照射时人员误入和误留 IORT 室的风险。结论 在普通手术室中施行移动式加速器 IORT 时,在工作负荷极小的条件下采取针对低能辐射的屏蔽防护可达到剂量管理目标要求,但应相对固定 IORT 场所,并根据工作负荷和剂量率控制要求对治疗室增设相应的屏蔽。

**【关键词】** 移动式加速器;术中放射治疗(IORT);辐射防护;辐射屏蔽

## Assessment on the radiation protection and safety of Intra-operative radiotherapy ( IORT) with a mobile accelerator

MA Yong-zhong, WAN Ling, LOU Yun, LI Hui-juan, WANG Hong-fang, FENG Ze-chen

(Beijing Center for Disease Control and Prevention, Beijing 100013, China)

**【Abstract】 Objective** To assess the radiation protection and safety of Intra-operative radiotherapy ( IORT) with a mobile accelerator, and to provide guidance of radiation safety for clinical application of IORT. **Methods** A Mobetron mobile accelerator and its working room of a hospital were determined as the research object. After the workloads of IORT and annual dose goals were confirmed, the radiation level surrounding the IORT room and the doses received by the personnel were calculated. When the irradiation condition was set in the worst scenarios, In addition, the radiation shielding of IORT room were checked. **Results** Under the radiation protection of the IORT room being designed as the same shielding structure as the room of an ordinary X-ray diagnostic device, the dose rates were calculated as follows: 35-78  $\mu\text{Sv/h}$  outside east wall, 89  $\mu\text{Sv/h}$  outside south wall, 70-84  $\mu\text{Sv/h}$  outside west wall and 75-106  $\mu\text{Sv/h}$  outside north wall. The maximum rate of the general treatment room below the IORT room was 64  $\mu\text{Sv/h}$  and the dose rate of the space above the treatment room was 45  $\mu\text{Sv/h}$ . At the same time, it was shown that all the annual doses calculated from 5 h of cumulative beam-on time met the requirement of dose goal for the highest annual dose received by occupational radiation staff were 0.53 mSv, and the annual doses of public were lower than 0.1 mSv. The radiation safety settings including some corresponding safety facilities, available protection apparatus and effective management measures were employed to prevent operators from entering or staying in IORT room incorrectly. **Conclusion** The dose management goal of IORT with a mobile accelerator operated in an ordinary operating room could be achieved with infinitesimal radiotherapy workload, but the IORT spot should be fixed and the treatment room should be added with relevant shielding materials in terms of actual workload and controlling requirement of dose rate.

**【Key words】** Mobile accelerator; Intra-operative radiotherapy ( IORT); Radiation protection; Radiation shielding

移动式术中放射治疗加速器(文中简称“移动式

加速器”或“加速器”)是近年来推行的一种新型放射治疗设备,使用该类设备开展术中放射治疗(intra-operative radiotherapy, IORT)的主要特色在于加速器设备移动灵活,不需对手术中的病人移位即可对其实施术中照射<sup>[1-3]</sup>,从而提高了手术安全性,简化了手术

基金项目:北京市预防医学公益应用研究项目(编号:2012-BJCDC-06)

作者单位:100013,北京市疾病预防控制中心,北京市预防医学研究

中心

中放射治疗的操作过程而降低感染率,且可用于全身多种肿瘤的治疗,所以采用移动式加速器进行 IORT 的模式在临床肿瘤放射治疗中的渗透日益深入。目前我国已有数家医院引入了该类设备,通常认为其辐射防护要求低,可直接在常规手术室内为患者提供放射治疗,而实际上该类设备在其自身结构、防护性能和使用要求等方面有其独特性,国内多数学者尚未对其防护设计进行深入研究,在设备投入临床应用的防护评价中也无相应的技术标准可循,从而可能导致该治疗技术偏离理性的发展方向。现分析移动式加速器 IORT 场所的辐射屏蔽参数,对治疗系统的辐射安全状况进行评估,探讨 IORT 临床应用相关的辐射防护问题。

### 1 材料与方法

**1.1 IORT 设备及其使用场所** 该研究中的 IORT 设备为 1 台美国 Intraop Medical Corp. 公司生产的 MOBETRON 移动式加速器,由某医院引进后拟设置在门诊楼四层的手术室中使用,加速器即为使用场所中需要考虑的辐射源。

**1.1.1 设备的组成结构:** 主要由 3 部分组成,包括控制单元、调制单元和治疗单元,小型加速器电子束治疗装置安装在 C 型臂机架上移动使用,可在手术过程中进行治疗照射,加速管以两段 X 波加速电子,电子能量 4 ~ 12 MeV 可调,随电子能量的增加降低电子束流,获得相同的输出剂量率。加速管包壳为铅、钢材材料以减小装置本身的泄漏辐射,在电子束照射区的下方设有 12.5 cm 厚的铅屏蔽板。设备的外观<sup>[4]</sup>见图 1,治疗体的坐标系<sup>[5]</sup>见图 2。

**1.1.2 加速器基本性能指标:** 电子束能量 4、6、9、12 MeV,虚拟源至准直器(限光筒)出口端面的距离(SSD)为 50 cm;限光筒出口剂量率:1 000 cGy/min;机架旋转角度:枪靶(GT)方向 ± 30°,与枪靶垂直方向(AB) ± 45°,等中心可移的范围:4 ~ 5 cm;限光筒直径 3 ~ 10 cm,限光筒和适配器垫的厚度分别为 0.5 cm 和 1.0 cm 的组织当量。

**1.1.3 IORT 工作负荷:** 该设备仅用于特殊群体的治疗,每周最多治疗 2 名患者,在 1 000 cGy/min 剂量率照射条件下,最多出束照射 3 min/人,累积出束 6 min/周,工作 50 周/a,估算出年累积出束 300 min/a (5h/a)。

**1.1.4 IORT 室的基本屏蔽条件:** 使用该 MOBETRON 加速器开展 IORT 的手术室面积为 63 m<sup>2</sup>,仅按照普通



图 1 MOBETRON 移动式加速器外观图

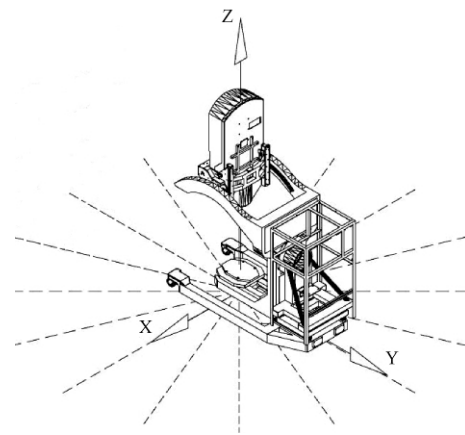


图 2 MOBETRON 移动式加速器治疗体的坐标系

医用 X 射线诊断机进行了建筑屏蔽设计,其平面规划为文献[6]中图 2 描述的设计方案,手术室四周防护墙和与手术室相通的防护门均为 2 mm 铅,观察窗 3 mm 铅,室顶和地板为 14 cm 砼 + 2 mm 铅,仅满足 GBZ130 规定的普通医用 X 射线诊断机的屏蔽防护要求<sup>[7]</sup>,需要针对 IORT 辐射源项参数核算该 IORT 室在不同工作负荷时应设置的屏蔽。

### 1.2 IORT 场所辐射屏蔽与剂量的估算方法

**1.2.1 采用加速器向下治疗照射时的最高照射条件参数**(12MeV 电子束、1000cGy/min 剂量率和最大直径 φ10 cm 的限光筒),估算极端情况下电子束直接照射到铅板遮挡器时手术室外围的辐射水平和人员所受的剂量。

**1.2.2 参照 NCRP 51 报告<sup>[8]</sup>中有关入射电子束不同角度方向的等效能量曲线和文献[5]中提供的 IORT**

室内辐射场剂量分布系数,确定设备在典型位置出束照射时该 IORT 室内射线的辐射能量和剂量因子,核算场所的辐射屏蔽。

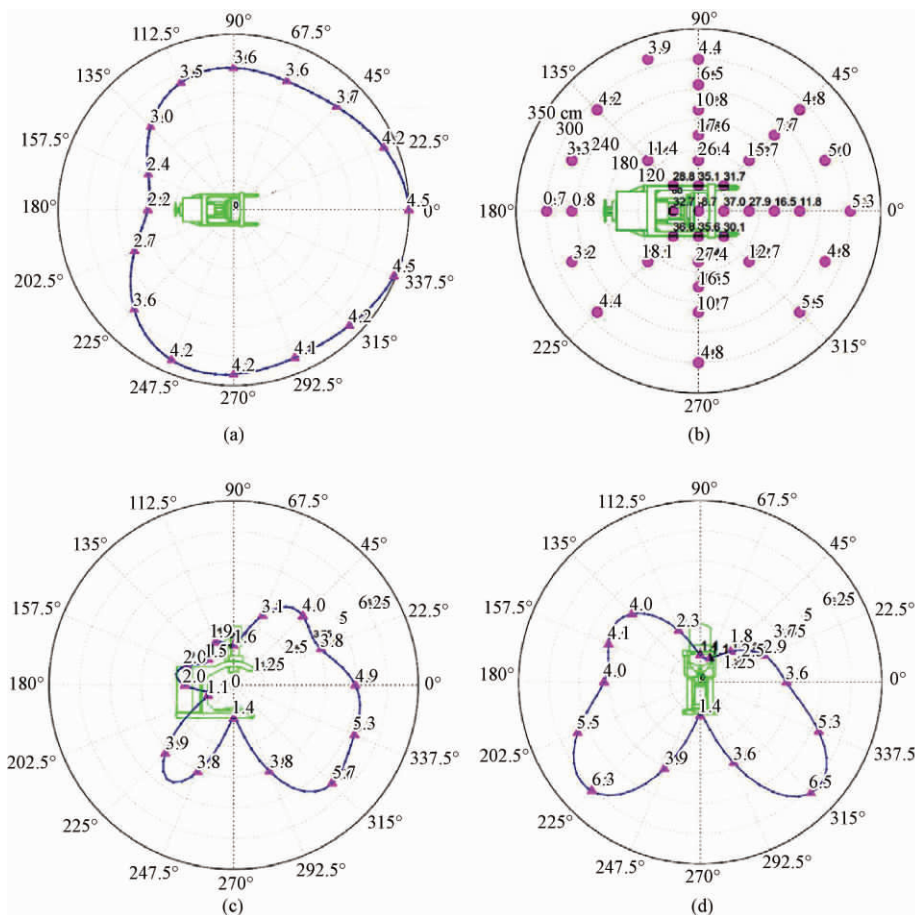
**1.2.3 剂量管理目标值:**在人员受照剂量的评估中,参照了该医院确立的剂量管理目标值。其中 IORT 相关放射工作人员在该设备计划治疗工作量时的年剂量管理目标值为 2.0 mSv,场所周围非放射工作人员(公众)的年剂量管理目标值为 0.1 mSv。该 MOBETRON 加速器属于不经常开展 IORT 的设备,尚未采用常规放射治疗加速器的剂量率目标(居留因子  $T \geq 1/2$  的场所为  $2.5 \mu\text{Sv/h}$ ,居留因子  $T < 1/2$  的场所为  $10 \mu\text{Sv/h}$ )来控制<sup>[9]</sup>。

**2 结果**

**2.1 移动式加速器 IORT 治疗室的辐射屏蔽参数与剂量估算** 移动式加速器在治疗室内进行 IORT 照射

时,室内杂散辐射剂量主要来源于电子束射入人体后所产生的韧致辐射。电子束在加速器室壁及准直器件(如限光筒)上的束流损失相对较小,相应的韧致辐射剂量也低。在治疗设备电子束照射的相应区设有 12.5 cm 厚的铅板遮挡器,极端情况下电子束可能向下直接照射铅板遮挡器(重靶)时,竖直向下方向的韧致辐射能量和强度均最大。参考设备的剂量学指标、NCRP 51 号报告和图 3 中描述的辐射场剂量水平与分布,确定了剂量估算的基本参数,见表 1。表 2 中描述了所估算出的与靶不同距离关注位置的剂量率和人员在相应位置驻留时的年受照剂量,计算中考虑了设备的工作负荷、室外场所驻留条件等因素。

**2.2 加速器 IORT 设备及场所的安全联锁与防护设施** 用于 IORT 的加速器除本身必须具备的安全设施外,还应结合 IORT 实际的操作流程和场所的现况设置相应的安全联锁装置和防护设施,该



注: (a) 室内靶平面 ( $Z = 100$ ) 上距靶 300 cm 处的剂量分布; (b) 室内地面 ( $Z = 0$ ) 上距靶不同位置的剂量分布; (c) 室内靶 X 平面(治疗单元左右平面)上距靶 300 cm 处的剂量分布; (d) 室内照射靶 Y 平面(治疗单元前后平面)上距靶 300 cm 处的剂量分布。

图 3 MOBETRON 加速器 IORT 室内剂量分布 ( $\mu\text{Sv}/10 \text{ Gy}$ )

表 1 确定的用于估算 IORT 室外围辐射水平的基本参数

参数	不同方位的辐射参数			备注
	0°(地面)	90°(水平面)	180°(室内)	
辐射能量 E( MeV)	12	7	7	参考 NCRP 51 的 E. 6
300 cm 处的剂量因子( $10^{-7}$ )	6. 5	4. 5	4. 0	参考图 3
100 cm 处的剂量率( $\times 10^3 \mu\text{Sv/h}$ )	3. 51	2. 43	2. 16	靶点剂量率 $6 \times 10^8 \mu\text{Sv/h}$
TVL <sub>铅</sub> ( mm)	51	50	50	参考 IAEA 47 <sup>[10]</sup> 和文献 [3]
TVL <sub>砼</sub> ( cm)	40. 6	35. 4	35. 4	参考 IAEA 47、NCRP 151 <sup>[11]</sup>

表 2 IORT 室外围辐射屏蔽与剂量估算结果

位置	距离 ( cm)	辐射屏蔽		剂量率( $\mu\text{Sv/h}$ )		居留因子 <i>T</i>	年剂量 ( $\mu\text{Sv/a}$ )
		厚度( cm)	衰减( <i>B</i> )	屏蔽前	屏蔽后		
东墙外 D( 准备间 1)	533	2 mmPb 当量	9. 15E-01	86	78	1/5	78
东墙外 E( 准备间 2)	544	2 mmPb 当量	9. 15E-01	82	75	1/5	75
东墙外 P( 走廊)	801	2 mmPb 当量	9. 15E-01	38	35	1/20	9
南墙外 R( 病例讨论室)	499	2 mmPb 当量	9. 15E-01	98	89	1/5	89
西墙外 G( 清洁走廊)	514	2 mmPb 当量	9. 15E-01	92	84	1/20	21
西墙外 F( 防护门外)	562	2 mmPb 当量	9. 15E-01	77	70	1/20	18
北墙外 J( 观察窗)	448	3 mmPb 当量	8. 75E-01	121	106	1	530
北墙外 C( 控制室门外)	545	2 mmPb 当量	9. 15E-01	82	75	1	375
IORT 室楼下普通治疗室	490	13 cm 砼 + 2 mmPb	4. 36E-01	146	64	1/8	40
IORT 室顶上方	420	14 cm 砼 + 2 mmPb	3. 67E-01	122	45	1/40	6

MOBETRON 加速器治疗系统及其手术室的安全设置如下。

2. 2. 1 急停按钮: 设备配套有 5 个急停按钮( 控制台 1 个, 调制器前后各 1 个, 治疗单元左右各 1 个), 供工作人员在异常情况下紧急停止出束。

2. 2. 2 声音报警: 出束前 5 s 有声音报警, 出束过程中每 10 MU 发出一声“BEEP”。

2. 2. 3 灯光警示与报警: 出束时控制台上设有灯光闪烁报警, 同时可接外部警示灯箱; 在东侧走廊通往准备间的防护门、机房与控制室相通的防护门上方均设置出束工作状态警示灯, 灯箱上设置醒目的辐射危险警示语, 出束时红灯警示防止人员误入治疗室( 通常情况下机房西侧防护门处于锁闭状态)。

2. 2. 4 按键和密码: 治疗系统设置有密码保护, 具有输入密码无误才可激活启动按钮的保护功能。

2. 2. 5 用户联锁接口: 系统提供了额外的用户联锁接口, 包括门机联锁、室外辐射水平实时监控接口等。

2. 2. 6 系统联锁: 设置有一系列的联锁系统, 包括双计时器联锁、双剂量计联锁、超剂量率联锁( 剂量率高于设定值 150%)、剂量计电压联锁( 失去高压时)、低剂量率联锁( 剂量率低于设定值的 50%)、限光筒连接联锁、RF/Gun/AFC 联锁( 能量相关的联锁), 以防止

设备误操作、照射剂量不准确或导致周围人员受到不必要的照射。

2. 2. 7 门机联锁: 只有在与治疗室相通的各防护门( IORT 手术室东侧防护门还包括两个准备间与走廊之间的防护门) 关闭到位、加速器术中放射治疗设备才能出束; 设备出束状态下, 意外开启任何一道防护门时立即自动停束, 并贮存已完成的治疗剂量。

2. 2. 8 激光软到位对准装置: 可保证电子束在限光筒中心轴上。

2. 2. 9 射线阻挡器: 在机架下方设置的铅阻挡器( 12. 5cm Pb), 可使 20Gy 剂量( SSD = 50cm 处) 降低至 3 个以上数量级, 阻挡器和照射头位置自动对应。

2. 2. 10 其他: 在 IORT 治疗室的各防护门上设置电离辐射警示标志; 在治疗系统的控制台配置监视与对讲设备, 以保证手术室内进行 IORT 操作准备的工作人员与控制台操作人员实时沟通, 同时便于工作人员在治疗时实时观察 IORT 室内的治疗状态。

2. 3 加速器 IORT 运行的辐射安全管理

2. 3. 1 IORT 场所分区及管制

2. 3. 1. 1 控制区为术中放射治疗室门内的室区, 包括 IORT 室和东侧的两个准备间; 监督区包括: IORT 室北侧的控制室、东侧走廊、西侧洁净走廊、南侧病例讨论

室以及治疗室楼下相邻的场所。

**2.3.1.2 出束治疗前 IORT 室内清场,并对监督区实施管制。**治疗前的清场管理措施包括①治疗室内的清场:治疗前室内相关人员,包括手术医师、手术护士、麻醉师等退至东侧走廊监督区最北侧区域,放射治疗医师、医学物理师、技师退至操作室区域,保证治疗出束时治疗室内除接受治疗的患者外,无其他人员留在室内;②准备间的清场:出束前对准备间进行巡查,保证在出束治疗时准备间内无留存人员;③与治疗室相邻的其它区域的清场:病例讨论室、手术治疗室东侧和西侧过道(走廊)、楼下普通治疗室等相邻场所均在治疗前进行全面巡查和强制管理,确保这些区域在治疗出束期间无任何人员接近。除采取治疗前的清场措施外,在治疗全过程中还对治疗室外围人员可接触的区域严加管制,防止无关人员进入。

**2.3.2 IORT 工作人员分类控制与管理:**①需要进入 IORT 手术室的工作人员,包括手术医师、手术护士、麻醉师、放射治疗医师、医学物理师、技师等原则上从具有放射工作资质的人员中选定,对需要进入 IORT 室内操作而又无放射工作资质的人员,则按照国家有关法规事先落实其相关资质,并统一作为放射工作人员管理。②凡需承担 IORT 工作的人员均按照规定佩戴个人剂量计,并定期检测,将检测结果记录备案。③ IORT 工作人员在现场严格遵守安全操作规程,听从现场负责人的统一安排。

**2.3.3 IORT 工作场所防护与剂量监测管理:**①每次出束操作前逐项检查 IORT 治疗室和治疗系统的联锁和安全防护设施,保证其功能正常。②在治疗场所增设固定式剂量监测仪器,监测仪器具备累积剂量监测的功能,安装位置设置在治疗室内邻近控制室门口和控制室内人员操作区域。③设定测量仪器的剂量阈值,每次及时读取并记录现场检测的剂量数据,并由专人使用防护巡测仪测量治疗室外围场所的实际辐射水平,如检测发现超出其阈值,则暂停治疗照射。④定期校准场所固定安装的辐射剂量检测仪和巡测仪,保证测量仪器的功能正常。

**2.3.4 IORT 工作负荷的控制:**①考虑到该设备仅用于特殊群体的治疗,医院对拟配置的 MOBETRON 加速器治疗工作负荷作了严格控制,出束治疗工作不超过 2 例患者/周,每例(每次)照射剂量不超过 20 Gy,每次照射时间小于 3 min。②每次治疗推荐由不同的放射治疗医师、医学物理师和技师承担 IORT 操作,以确保工作人员所受的辐射剂量在安全范围内。IORT

时对进入手术室的严格管理和 IORT(低频次使用)相关安全设施的正常工作,以及治疗系统相应防护措施的落实,可有效制约设备运行照射时人员误入和误留 IORT 治疗室的风险,从而控制潜在照射的辐射危险。

### 3 讨论

IORT 时电子束作用于人体或部件产生的韧致辐射能谱是连续的,治疗室内的辐射场主要由低贯穿辐射(LPR)的杂散辐射组成,治疗室防护墙设有的 2~3 mm 铅当量的屏蔽对低能辐射具备较好的屏蔽效果,而其中份额较少的较高能量韧致辐射对这种当量的屏蔽来说几乎是透明的。实际监测表明 2 mm 铅防护墙可衰减室内 97.3% 的杂散辐射,相应方向墙外约有 3.0% 的高能韧致辐射。在进行治疗室外围剂量估算时,电子束为竖直向下照射,水平和室顶方向的韧致辐射能量均保守地取为 7 MeV(如表 1 所述),相当于与 12 MeV 主束呈 90°方向的光子能量,现有屏蔽条件下 IORT 室外围剂量率的估算值高于实际值约 6 倍,若在常规治疗条件下考虑患者的吸收时,估算值则仅高于实际值约 3 倍,对治疗室增设屏蔽时应考虑这种因素,适当予以修正。

该医院引进的 MOBETRON 加速器仅用于极少数特殊人群的治疗,IORT 工作量最高仅为 2 人/周、年出束照射 5 h/a,表 2 的估算结果表明,该工作负荷下职业人员在控制室内所受年剂量最高为 0.53 mSv,在治疗室外围其他位置接受的年剂量均低于 0.10 mSv,满足职业人员剂量管理目标值的要求;IORT 室楼下的普通治疗室和室顶等场所,人员接触时所受年剂量均不高于 0.06 mSv,满足公众剂量管理目标值的要求。其中,室顶为室外空间,必须借助专用工具才能进入,实际居留因子小于 1/40。

由于该医院的 MOBETRON 加速器为不常用的术中放射治疗设备,对其外围辐射水平,国外主要采用放射治疗工作负荷来控制,而国内尚无相应的技术标准,在防护评价中亦不宜采用 GBZ 201.2—2011 中有关常规放射治疗加速器的剂量率目标值来控制,但设备出束状态下治疗时外围过高的瞬时剂量率也必然给周围人员造成较重的心理负担,所以也应在设计阶段根据辐射场的剂量水平与分布状况增设屏蔽,将场所外围关注位置的辐射水平降低到可以接受的尽可能低的程度,对此国家应尽快出台相应标准予以明确。表 2 中估算出的治疗室外围剂量率仅为极端情况下的理论值,与实际治疗时外围的辐射水平比较而言则是过于

# 北京市海淀区585名自愿咨询检测者危险行为特征

刘伟 曹卫华

**【摘要】** 目的 了解 2008~2010 年北京市海淀区疾病预防控制中心艾滋病自愿咨询检测(VCT)门诊部求询者危险行为特征和人口学信息、HIV 感染状况,为今后更好的开展 VCT 服务提供参考。方法 对 2008~2010 年期间能够自愿接受调查的 VCT 求询者进行问卷调查及血清学检测,利用 SPSS 13.0 软件进行统计描述。结果 3 年间共有 585 位求询者接受了调查,其中男性 514 名,占 87.86%(514/585),女性 71 名,占 12.14%(71/585);年龄以 20~40 岁为主,共 501 人,占 85.64%(501/585);大专以上学历者居多,占 71.11%(416/585);因性行为而来求询的人数占 85.81%(502/585),其中发生非婚异性性行为者占 48.55%(284/585),男男同性性行为者(MSM)占 35.56%(208/585)。在有非婚异性性行为史的求询者中,31.34%(89/284)不使用安全套,MSM 中有 16.83%(35/208)的人发生过无保护性肛交。共有 569 位求询者接受了检测,HIV 抗体阳性率为 2.28%(13/569)。结论 男性青年及有非婚性行为史者是今后艾滋病防控工作的重点人群,今后在加大艾滋病防控知识宣传的同时,要倡导正确的防艾生活方式。

**【关键词】** 艾滋病; 自愿咨询检测; 危险行为

作者单位: 100083 北京大学公共卫生学院(刘伟、曹卫华); 北京市海淀区疾病预防控制中心(刘伟)

通讯作者: 曹卫华, E-mail: caoweihua60@163.com

保守的,应在设备安装后给出治疗室外围的实测剂量率,并根据其确定相应剂量控制目标应限制的术中放射治疗工作量和相应工作人员适宜的驻留位置;还应配合 IORT 手术时机,尽量在治疗室周围人员相对少的时间合理安排术中放射治疗。

评估 IORT 治疗系统及其场所的辐射安全状况时,综合考虑了设备本身的固有安全配置、场所的屏蔽与安全设施、治疗工作负荷和出束时现场管控措施等,初步表明该移动式加速器在普通手术室中进行 IORT 时,虽然在工作负荷极小的条件下采取针对低能辐射的屏蔽防护可达到剂量管理目标要求,但应相对固定 IORT 场所,并根据工作负荷和剂量率控制要求对治疗室增设相应的屏蔽。

## 参 考 文 献

- [1] Beddar AS, Biggs PJ, Chang S, et al. Intraoperative radiation therapy using mobile electron linear accelerators. Report of AAPM Radiation Therapy Committee Task Group No. 72. *Med Phys* 2006, 33: 1476-1489.
- [2] Mario Ciocca, Guido Pedroli, Roberto Orecchia Daves, et al. Radiation survey around a Linac mobile electron linear accelerator for intraoperative radiation therapy. *J Applied Clin Med Phy* 2009, 10(2): 131-138.
- [3] A. Sam Beddar, Sunil Krishnan. Intraoperative radiotherapy using a mobile electron LINAC: A retroperitoneal sarcoma case. *J Applied Clin Med Phy*, 2005, 6(3): 95-107.
- [4] Daves JL, Mills MD. Shielding assessment of a mobile electron accelerator for intraoperative radiotherapy. *J Applied Clin Med Phy* 2001, 2(3): 165-173.
- [5] Alexandre S. Krechetov, Donald Goer. Shielding assessment of a mobile electron accelerator for intraoperative radiotherapy. *J Applied Clin Med Phy* 2010, 11(4): 1-11.
- [6] 马永忠, 万玲, 娄云, 等. 移动式加速器术中放射治疗辐射场剂量水平的测量与分析. *首都公共卫生*, 2012, 6(4): 150-154.
- [7] 卫生部. GBZ 130-2002 医用 X 射线诊断卫生防护标准. 北京: 中国法律出版社 2002.
- [8] NCRP Report No. 51. Radiation Protection Design Guidelines for 0.1 - 100 MeV Particle Accelerator Facilities, NCRP, 1977.
- [9] 卫生部. GBZ/T 201.2-2011 放射治疗机房的辐射屏蔽规范 第 2 部分: 电子直线加速器放射治疗机房. 北京: 中国标准出版社 2011.
- [10] IAEA Safety Reports series No. 47. Radiation Protection in the Design of Radiotherapy Facilities IAEA 2006.
- [11] NCRP Report No. 151. Structural Shielding Design and Evaluation for Megavoltage X-and Gamma-Ray Radiotherapy Facilities, NCRP 2005.

(收稿日期: 2012-08-23)