

## 两种布局后装机房辐射防护效果比较

杜文, 马晓春, 蔡宏懿, 郭逸潇  
甘肃省人民医院放疗科, 甘肃 兰州 730000

**【摘要】目的:**从理论和实验两方面考察不同布局的后装机房各监测点(电缆孔、控制台、防护门、候诊位)的周有效剂量,为改善职业人员辐射防护提供数据支持。**方法:**依据射线强度衰减所遵从的平方反比定律及指数规律,推导出各监测点的周有效剂量计算公式,依次计算放射源处于不同位置时各监测点的周有效剂量;用MEDCOM射线检测仪测量后装机放射源活度最大时,放射源处于不同位置各监测点的空气比释动能率,计算周工作负荷,即可得各监测点的周有效剂量。**结果:**考虑距离因素后,各监测点(电缆孔、控制台、防护门、候诊位)的周有效剂量理论值分别由13.00、30.90、0.012 10、1.200  $\mu\text{Sv}$ 降至2.08、2.29、0.004 75、0.564  $\mu\text{Sv}$ ;实验值则分别由4.32、25.60、2.01、1.96  $\mu\text{Sv}$ 降至2.16、2.96、1.55、1.41  $\mu\text{Sv}$ 。**结论:**考虑距离因素的后装机房布局能显著降低职业人员的周有效剂量。

**【关键词】**高剂量率后装放疗;辐射防护;周有效剂量;距离

**【中图分类号】**R146

**【文献标志码】**A

**【文章编号】**1005-202X(2018)05-0532-05

## Evaluation of radiation protection effect of two kinds of layouts of afterloading irradiation treatment room

DU Wen, MA Xiaochun, CAI Hongyi, GUO Yixiao

Department of Radiotherapy, Gansu Provincial Hospital, Lanzhou 730000, China

**Abstract: Objective** To calculate the theoretical and experiment value of weekly effective dose at each monitoring site (cable hole, console, lead gate, waiting room) in different layouts of afterloading irradiation treatment room, and provide data support for improving the radiation protection for occupation personnel. **Methods** Based on the inverse square law and exponential law of the attenuation of X-ray intensity, the calculation formula of weekly effective dose at each monitoring site was derived, and the weekly effective dose at each monitoring site with the radioactive source at different locations was calculated. When the activity of the radioactive source which was placed at different locations reaches the maximum, MEDCOM Inspector Alert Handheld Surface Contamination Meter was used to measure the air kerma rate at each monitoring site. Finally, the weekly effective dose at each monitoring site was obtained by calculating weekly workload. **Results** After considering the distance, the theoretical value of weekly effective dose at each monitoring site (cable hole, console, lead gate, waiting room) was reduced from 13.00, 30.90, 0.012 10, 1.200  $\mu\text{Sv}$  to 2.08, 2.29, 0.004 75, 0.564  $\mu\text{Sv}$ , respectively. The experiment value was decreased from 4.32, 25.60, 2.01, 1.96  $\mu\text{Sv}$  to 2.16, 2.96, 1.55, 1.41  $\mu\text{Sv}$ , respectively. **Conclusion** The layout of afterloading irradiation treatment room with the consideration of the distance significantly reduces the weekly effective dose of the occupation personnel.

**Keywords:** high dose rate afterloading radiotherapy; radiation protection; weekly effective dose; distance

### 前言

放疗在治疗肿瘤的同时,也会严重伤害人体的其他正常组织<sup>[1]</sup>,高剂量率(HDR)近距离后装治疗也

不例外。有研究者对后装机房的周围有效剂量率三维空间分布作了研究<sup>[2]</sup>,也有研究者利用蒙特卡罗程序研究了放射源位置对迷宫内辐射场分布的影响<sup>[3]</sup>,但是放射源位置对机房周围环境辐射场分布的影响仍不是很清楚。兰州市能开展后装治疗的医院的后装机均摆放在在靠近控制台的位置,而中国医学科学院肿瘤医院的后装机则摆放在在远离控制台的位置<sup>[4]</sup>。这两种布局的后装机房,到底哪一种辐射防护效果更好?本研究从光子束强度随距离衰减的反平方定律

**【收稿日期】**2017-11-13

**【作者简介】**杜文,硕士,物理师,研究方向:肿瘤放射物理学,E-mail: eluosidaodananna@163.com

**【通信作者】**蔡宏懿,博士,主任医师,研究方向:放射肿瘤学及放射物理学,E-mail:gschy333@163.com

及透射光子强度随吸收体厚度衰减的指数规律出发,推导后装机房周围各监测点的原射线计算公式。并以甘肃省人民医院后装机房为例,利用推导得到的公式计算放射源处于不同位置时各监测点周有效剂量的设计值,同时使用美国MEDCOM射线检测仪测量放射源处于不同位置时各监测点的周有效剂量,以便从理论及实验两方面来考察这两种布局的后装机房的辐射防护效果。

## 1 材料与方法

### 1.1 仪器设备

美国MEDCOM Inspector Alert便携式多功能射线检测仪。序列号:A06520;探测类型: $\alpha, \beta, \gamma$ 及X射线;测量范围:0.01~1 100.00  $\mu\text{Sv/h}$ ;灵敏度:0.01  $\mu\text{Sv/h}$ ;探测器:盖革管;能量响应: $\gamma$ 射线 $\geq 10$  keV;精度: $\pm 10\% \sim \pm 15\%$ 。

### 1.2 原理和公式

后装治疗用的 $\text{Ir}^{192}$ 源是辐射各向同性的,而且未准直,因而后装治疗室所有的防护墙都是主屏蔽墙。光子束的强度 $I$ 与屏蔽体厚度 $x$ 的关系遵循下列微分方程: $dI = -\mu I dx$ ,其中, $\mu$ 是线性衰减系数。解此微分方程,即得到光子束衰减所遵循的指数规律: $I = I_0 e^{(-\mu x)}$ , $I_0$ 表示未经屏蔽体衰减的光子束强度,若 $L_{\frac{1}{10}}$ 为屏蔽体的十分之一值层,则 $L_{\frac{1}{10}} = \frac{\ln 10}{\mu}$ 。工作负荷 $W$ 为距放射源1 m处治疗机的每周输出总剂量<sup>[5]</sup>,未加屏蔽体前距离放射源 $d$ 处的光子束强度为 $\frac{WTU}{d^2}$ ,其中, $T$ 为居留因子, $U$ 是使用因子。加屏蔽体后,为达到防护目标,光子束强度应该衰减为 $p$ ,即 $\frac{I}{I_0} = \frac{pd^2}{WTU} = e^{(-\mu x)}$ ,主防护墙的设计厚度应为 $S_p = x = \frac{\ln(\frac{WTU}{pd^2})}{\mu} = L_{\frac{1}{10}} \log_{10}(\frac{WTU}{pd^2})$ 。若已知主防护墙的厚度 $S_p$ ,则经过厚度为 $S_p$ 的屏蔽体的衰减后,原射线的强度变为 $p = \frac{WTU}{d^2 10^{\frac{S_p}{L_{\frac{1}{10}}}}}$ 。对HDR  $\text{Ir}^{192}$ 后装机,工作

负荷 $W = 3.4 \times 10^5 \mu\text{Gy} \cdot \text{m}^2/\text{week}$ <sup>[6]</sup>。密度 $\rho_{\text{铅}} = 11.36 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 的铅,十分之一值层为 $TVL_{\frac{1}{10}} = L_{\frac{1}{10}} = 20 \text{ mm}$ <sup>[7]</sup>。对于密度 $\rho_{\text{混}} = 2.35 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 的混凝土,十分之一值层 $TVL_{\frac{1}{10}} = L_{\frac{1}{10}} = 14.7 \text{ cm}$ <sup>[7]</sup>。甘肃省人民医院后装机房的宽 $k = 7.38 \text{ m}$ ,长 $m = 7.25 \text{ m}$ ,防护门宽度 $h = 1.82 \text{ m}$ ,迷路长度 $n = 5.05 \text{ m}$ , $l = 13.38 \text{ m}$ (图1);后装机房治疗室使用面积为 $36.2 \text{ m}^2$ ,符合国家相关标准<sup>[8-11]</sup>对后装机房的要求。主防护墙

的厚度为 $52 \text{ cm}$ 。材料为密度 $\rho_{\text{混}} = 2.35 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 的混凝土,防护门厚度为 $5 \text{ cm}$ ,材料为密度 $\rho_{\text{铅}} = 11.36 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 的铅。甘肃省人民医院HDR  $\gamma$ 射线遥控后装治疗机为山东新华医疗器械股份有限公司生产的,机身宽 $40 \text{ cm}$ ,长 $93 \text{ cm}$ ,高 $120 \text{ cm}$ ,最大出源长度为 $85 \text{ cm}$ ,后装治疗床宽度为 $90 \text{ cm}$ 。

图1中的监测点a、b、c、d依次分别为电缆孔、控制台、防护门、候诊位。电缆孔距离地表的垂直高度为 $0 \text{ cm}$ ;控制台,防护门,候诊位距离地表的垂直高度为 $120 \text{ cm}$ 。监测点a、b、d的周有效剂量计算公式为 $p = \frac{3.4 \times 10^5 \mu\text{Gy} \cdot \text{m}^2/\text{week}}{d^2 10^{\left(\frac{S_{\text{混}}}{14.7}\right)}}$ ,监测点c的周有效剂

量计算公式为 $p = \frac{3.4 \times 10^5 \mu\text{Gy} \cdot \text{m}^2/\text{week}}{d^2 10^{\left(\frac{S_{\text{混}}}{14.7} + \frac{S_{\text{铅}}}{2}\right)}}$ , $d$ 的单位

是 $\text{m}$ , $S_p$ 的单位是 $\text{cm}$ 。图1中①、②、③、④、⑤、⑥、⑦、⑧、⑨、⑩是后装治疗机放射源的位置。放射源处于不同位置时,放射源与各监测点之间的距离见表1。

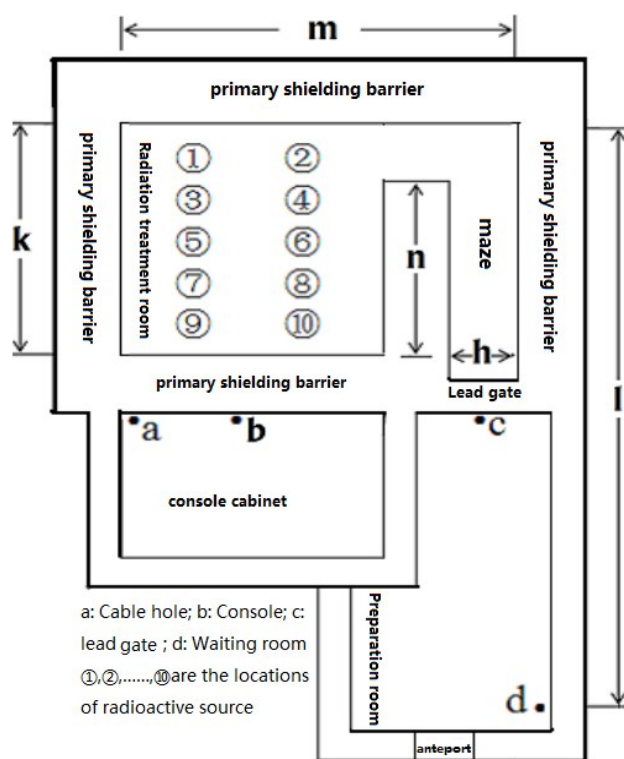


图1 放射源可能位置与4个监测点位位置关系

Fig.1 Relationship between the locations of radioactive source and 4 monitoring sites

### 1.3 实验测量

$\text{Ir}^{192}$ 源的出厂活度为 $10 \text{ Ci}$ ,运送至甘肃省人民医院时其活度衰减为 $8.9 \text{ Ci}$ ,活度为 $10 \text{ Ci}$ 时每个病人的最大治疗时间为 $10 \text{ min}$ ;治疗时间与显活度之积保持不变<sup>[6]</sup>,

表1 放射源处于不同位置时放射源与监测点之间的距离(m)

Tab.1 Distance between radioactive source and monitoring sites with radioactive source in different locations (m)

Radioactive source in different locations	Distance between radioactive source and monitoring sites			
	a	b	c	d
1	6.78	6.54	8.08	13.19
2	7.33	6.58	7.36	12.69
3	5.74	5.34	7.15	12.10
4	6.28	5.39	6.32	11.56
5	4.65	4.15	6.3	11.05
6	5.31	4.21	5.35	10.44
7	3.62	2.96	5.59	10.02
8	4.45	3.05	4.50	9.360
9	2.75	1.78	5.07	9.040
10	3.77	1.94	3.82	8.290

活度为8.9 Ci时每个病人的最大治疗时间为11 min。设计一治疗时间为11 min的后装治疗计划,移动后装治疗机使其治疗管中心分别位于图1中①、②、③、…、⑩的位置,执行此治疗计划。用MEDCOM射线检测仪分别测量各监测点(a、b、c、d)的空气比释动能率,以每天治疗10个病人,每人最大治疗时间为11 min,每周工作5 d,计算各监测点(a、b、c、d)的周空气比释动能,其

值即等于周有效剂量 $p^{[6]}$ 。

## 2 结果

甘肃省人民医院后装机房各监测点原射线的周有效剂量理论值列于表2。表2表明,当后装机放射源远离控制台时(图1中的①),各监测点周有效剂量的理论值比放射源靠近控制台时(图1中的⑨)低很多。

表2 各监测点周有效剂量的理论值( $\mu\text{Sv/week}$ )Tab.2 Theoretical value of weekly effective dose at each monitoring site ( $\mu\text{Sv/week}$ )

Radioactive source in different locations	Theoretical value of weekly effective dose at different monitoring sites			
	a	b	c	d
1	2.08	2.29	0.004 75	0.564
2	1.83	2.26	0.005 72	0.609
3	2.98	3.44	0.006 07	0.670
4	2.49	3.38	0.007 76	0.734
5	4.53	5.69	0.007 81	0.803
6	3.48	5.53	0.010 80	0.900
7	7.48	11.20	0.009 92	0.977
8	4.95	10.50	0.015 30	1.120
9	13.00	30.90	0.012 10	1.200
10	6.90	26.10	0.021 30	1.430

甘肃省人民医院后装机房各监测点的周有效剂量的实验结果见表3。表3表明,当后装机放射源远离控制台时(图1中的①),各监测点周有效剂量的

实验值比放射源靠近控制台时(图1中的⑨)低,控制台的周有效剂量差别更为显著(理论结果⑨约是①的13.5倍,实验结果⑨约是①的8.6倍)。

表3 各监测点的周有效剂量的实验值( $\mu\text{Sv/week}$ )Tab.3 Experimental value of weekly effective dose at each monitoring site ( $\mu\text{Sv/week}$ )

Radioactive source in different locations	Experimental value of weekly effective dose at different monitoring sites			
	a	b	c	d
1	2.16	2.96	1.55	1.41
2	1.83	2.87	1.59	1.48
3	2.95	5.58	1.66	1.55
4	2.63	5.51	1.79	1.68
5	3.24	7.99	1.84	1.74
6	3.06	7.68	1.97	1.82
7	3.97	13.30	1.94	1.87
8	3.67	11.20	2.06	1.94
9	4.32	25.60	2.01	1.96
10	3.82	18.20	2.25	2.05

None of the above detected values deducts the background value,(1.09-1.20)  $\mu\text{Sv/week}$

理论与实验结果均表明,考虑距离因素后可有效降低职业人员的周有效剂量。剂量较低时,职业人员辐射致癌症危险的标称概率系数为  $4.1 \times 10^{-2} \text{Sv}^{-1}$ ,而遗传效应的标称概率系数为  $0.1 \times 10^{-2} \text{Sv}^{-1}$  [12]。考虑辐射防护时,假设职业人员一直在控制室剂量最大的位置[6],即指控制台。将后装机从靠近控制台的地方(图1中的⑨)移动到远离控制台的地方时(图1中的①),可以使职业人员辐射致癌症概率及遗传效应概率均降低为原来的1.0/8.6。

### 3 讨论

理论与实验结果有差异,是因为理论计算时假设  $\text{Ir}^{192}$  源是点源,而且严格地固定在图1中的①、②、③、…、⑩等位置;同时忽略了空气及附着在屏蔽墙上的装修材料对射线的衰减,也不考虑施源器壁对射线的衰减,并只考虑原射线,不考虑散射线的影。而实际的  $\text{Ir}^{192}$  源是有一定的物理体积的,同时,施源器壁、机房中的空气及附着在屏蔽墙上的装修材料对原射线均有衰减作用,而且测量过程中放射源是在各驻留点之间运动的,治疗管的中心固定在图1中的①、②、③、…、⑩等位置,测量结果中同时包含了原射线和散射线。防护门处的理论值和实验值相差较大,是因为理论计算时认为防护门中缝处原射线没有泄漏,而实践中即使防护门中缝采用如牙齿啮合一样的设计,仍然免不了射线泄漏。与放疗室相邻的居留区域职业人员周有效剂量  $p$  的设计值为  $0.2 \text{ mSv/week} = 200 \mu\text{Sv/week}$  [6],表2表明,

当放射源处于不同位置时,甘肃省人民医院后装治疗机房周围各监测点的周有效剂量设计值均低于此值。国际放射防护委员会(ICRP)及国际原子能机构(IAEA)规定职业照射的年有效剂量限值为5 y内年平均有效剂量不大于  $20 \text{ mSv}$  [12-13],即周有效剂量不超过  $385 \mu\text{Sv}$ 。表3表明,放射源处于不同位置时,甘肃省人民医院后装机房所有监测点的周有效剂量均低于此值。剂量限值是控制不必要照射的一种手段。辐射的生物效应除了存在剂量阈值的确定性效应之外,还有发生概率随剂量的增大而增大的随机性效应[14]。有效剂量限值只是可以接受的上限,而不是危险与安全的分界限[12],不应该认为不超过剂量限值就是安全的[15-16]。实践中应保证有效剂量不超过剂量限值,在考虑了经济和社会因素后,依据放射防护的 ALARA (As Low As Reasonably Achievable Low)原则,将职业人员所受的剂量及可能受到的照射,均降低到可合理达到的尽可能低的水平。长期接受低剂量辐射的放射工作人员,晶状体及造血系统等会遭受一定损伤[17-21],本研究表明,不增加额外的防护成本,合理布局后装机房便可使职业人员的周有效剂量大大降低,从而大大降低职业人员的辐射致各种随机性效应的概率,也可降低对放射从业人员的晶体及造血系统的损伤。

### 【参考文献】

- [1] 蒋洪春,韩丹丹.医院医用X射线防护应当以人为本[J].中国辐射卫生,2013,22(3):303-304.  
JIANG H C, HAN D D. Hospital medical X ray protection should be



- people-oriented[J]. Chinese Journal of Radiological Health, 2013, 22(3): 303-304.
- [2] 杨梓枢, 胡峻, 李加荣, 等. 后装治疗机机房及环境的放射防护质控评价[J]. 中国医疗设备, 2015, 30(6): 111-113.  
YANG Z S, HU J, LI J R, et al. QC evaluation of the radiation prevention in the breach-loading therapy machine room and its environment[J]. China Medical Devices, 2015, 30(6): 111-113.
- [3] 邓君, 曹磊, 王晓刊, 等. 高剂量率后装放疗辐射场的最优化研究[J]. 辐射防护, 2013, 33(3): 185-188.  
DENG J, CAO L, WANG X K, et al. Study on optimization of radiation field for high dose rate afterloading radiotherapy [J]. Radiation Protection, 2013, 33(3): 185-188.
- [4] 冯宁远, 谢虎臣, 史荣, 等. 实用放射治疗物理学[M]. 北京: 北京医科大学中国协和医科大学联合出版社, 1998: 290.  
FENG N Y, XIE H C, SHI R, et al. Practical radiation therapy physics [M]. Beijing: Beijing Medical University, Peking Union Medical College Press, 1998: 290.
- [5] 胡逸民, 张红志, 戴建荣. 肿瘤放射物理学[M]. 北京: 原子能出版社, 1999: 651.  
HU Y M, ZHANG H Z, DAI J R. Radiation oncology physics[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1999: 651.
- [6] PODGORSAK E B, SEUNTJENS J P, STRYDOM W, et al. Radiation oncology physics: a handbook for teachers and students[M]. Vienna: IAEA, 2005: 598.
- [7] PAWLICKI T, SCANDERBEG D J, STARKSCHALL G. Hendee's radiation therapy physics [M]. 4th Edition. Hoboken: Wiley-Blackwell, 2016: 258.
- [8] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 后装 $\gamma$ 源近距离治疗卫生防护标准: GBZ 121-2002[S]. 北京: 人民卫生出版社, 2002.  
National Healthy and Family Planning Commission of the People's Republic of China. Radiological protection standards for gamma-ray afterloading brachytherapy: GBZ 121-2002 [S]. Beijing: People's Medical Publishing House, 2002.
- [9] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 放射治疗机房的辐射屏蔽规范 第3部分:  $\gamma$ 射线源放射治疗机房: BZ/T 201.3-2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.  
National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. Radiation shielding specification for radiotherapy room third part: gamma ray source radiotherapy room: BZ/T 201.3-2014 [S]. Beijing: China Standard Press, 2014.
- [10] 中华人民共和国卫生部. 建设项目职业病危害放射防护评价规范 第2部分: 放射治疗装置: GBZ/T 220.2-2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.  
Ministry of Health of the People's Republic of China. Code for evaluation of radiation protection against occupational disease hazards in construction projects-part 2: a radiotherapy device: GBZ/T 220.2-2009 [S]. Beijing: China Standard Press, 2009.
- [11] 国家质量监督检验检疫总局. 医用 $\gamma$ 射线后装近距离治疗辐射源: JJG 773-2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Medical  $\gamma$ -ray afterloading for brachytherapy: JJG 773-2013 [S]. Beijing: China Standard Press, 2013.
- [12] International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. 2007 recommendations of the International Commission on Radiological Protection [R]. Oxford: Pergamon Press, 2008: 55, 94.
- [13] International Atomic Energy Agency. Radiation protection and safety of radiation sources: international basic safety standards[S]. Vienna: IAEA, 2014.
- [14] 国家质量监督检验检疫总局. 电离辐射防护与辐射源安全基本标准: GB 18871-2002[S]. 北京: 中国标准出版社, 2003.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Basic standards for protection against ionizing radiation and for the safety of radiation sources: GB 18871-2002 [S]. Beijing: China Standards Press, 2003.
- [15] 陈静媛. 正确理解放射工作人员和公众的剂量限值[J]. 中国辐射卫生, 2007, 16(4): 512.  
CHEN J Y. Correctly understand the dose limits of radiation workers and the public[J]. Chinese Journal of Radiological Health, 2007, 16(4): 512.
- [16] 刘长安. 职业照射个人剂量限值的理解和应用[J]. 中国工业医学志, 2009, 22(5): 387-389.  
LIU C A. Understanding and application of personal dose limits for occupational exposure[J]. Chinese Journal of Industrial Medicine, 2009, 22(5): 387-389.
- [17] 曾庆民, 陈国雄, 陈才, 等. 低剂量X线暴露人群外周血细胞效应的调查[J]. 华南预防医学杂志, 2004, 30(1): 77.  
ZENG Q M, CHEN G X, CHEN C, et al. Peripheral blood cell count among low-dosage X-ray exposed population [J]. South China Journal of Preventive Medicine, 2004, 30(1): 77.
- [18] 王焱, 邵云平, 付颖华, 等. 五省放射工作人员眼晶状体混浊状况调查[J]. 中华放射医学与护杂志, 2015, 35(8): 616-618.  
WANG Y, SHAO Y P, FU Y H, et al. Investigation of ocular lens opacity among radiation workers in five provinces [J]. Chinese Journal of Radiological Medicine and Protection, 2015, 35(8): 616-618.
- [19] 熊成育. 青海省放射工作人员眼晶状体的调查与分析[J]. 工业卫生与职业病, 2017, 43(1): 40-42.  
XIONG C Y. The investigation and analysis of eye lens among radiation workers in Qinghai province [J]. Industrial Health and Occupational Diseases, 2017, 43(1): 40-42.
- [21] 赵锡鹏, 刘晓惠, 刘建香, 等. 全国放射工作人员2015年职业健康监测结果分析[J]. 中国职业医学, 2017, 44(4): 473-477.  
ZHAO X P, LIU X H, LIU J X, et al. Analysis on occupational health surveillance results of national radiation workers in 2015 [J]. China Occupational Medicine, 2017, 44(4): 473-477.
- [21] 王丽东, 那向杰, 付丽丽, 等. 低剂量射线长期暴露对人群健康影响[J]. 中国公共卫生, 2018, 31(1): 130-133.  
WANG L D, NA X J, FU L L, et al. Influence of low-dose and long-term radiation exposure on population health [J]. Chinese Journal of Public Health, 2018, 31(1): 130-133.

(编辑:谭斯允)