

## 医用 X 射线工作者回顾性剂量估算进展

张欣 孙志娟 赵永成

300192, 中国医学科学院北京协和医学院放射医学研究所, 天津市放射医学与分子核医学重点实验室

通信作者: 赵永成, Email: zhaoyc60@irm-cams.ac.cn

DOI: 10.3760/cma.j.issn.1673-4114.2016.05.009

**【摘要】** 随着 X 射线的广泛应用, 其对医用工作者的辐射致癌效应越来越受到人们关注。准确的辐射致癌危险评价应建立在完整的个人剂量信息的基础之上。然而在 X 射线应用的早期并没有医用 X 射线工作者的个人剂量信息, 因此需要通过进行剂量重建来估算早期的个人剂量信息。笔者对国内外早期医用诊断 X 射线工作者的剂量估算的现状和进展进行了综述。

**【关键词】** X 线; 辐射剂量; 医用 X 射线工作者; 剂量估算

基金项目: 国家自然科学基金 81502760

**Advances in retrospective dose estimation for medical X-ray workers** Zhang Xin, Sun Zhijuan, Zhao Yongcheng

Tianjin Key Laboratory of Radiation Medicine and Molecular Nuclear Medicine, Institute of Radiation Medicine, Chinese Academy of Medical Science, Peking Union Medical College, Tianjin 300192, China

Corresponding author: Zhao Yongcheng, Email: zhaoyc60@irm-cams.ac.cn

**【Abstract】** With the widely application of the X-ray, the radiation carcinogenesis to the medical workers attracts more and more people's attention. Accurate radiation carcinogenesis dose-response assessment is based on complete personal dose information. But early in the application of X-ray, there are no personal dose information of medical X-ray workers, so it needs dose reconstruction to estimate the early personal dose information. The dose estimation status and progress of early medical diagnostic X-ray workers at home and abroad paper were reviewed in this paper.

**【Key words】** X-Rays; Radiation dosage; Medical X-ray workers; Dose estimation

**Fund program:** National Natural Science Foundation of China(81502760)

随着我国对核能和辐射技术的应用越来越广泛, 受到低水平辐射的人群也越来越多。因此小剂量电离辐射多次反复性照射的危险评价已经成为当前人们最关心的公共卫生问题之一。它不仅关系到辐射防护标准的制定, 也关系着核能、放射性核素和放射源的开发和利用<sup>[1-2]</sup>。

### 1 医用 X 射线工作者回顾性剂量估算应用背景

1895 年伦琴发现了 X 射线, 不久便在医学领域得到了应用。之后 X 射线被用于人体检查以诊断疾病。随着 X 射线诊断的普及, 其危害也渐渐引起了人们的重视。为了评价医用 X 射线工作者的致癌危害, 国内外做了很多研究。但是真正意义上的辐射致癌评价是建立在队列成员的个人累积剂

量和器官剂量之上。剂量信息越准确, 辐射致癌危险评价越可靠。因此医用诊断 X 射线工作者所接受的受照剂量也越来越受到关注。由于在 1950 年之前各国并没有剂量监测设备, 各个队列缺乏完整的剂量信息, 队列个人剂量的质量影响了辐射致癌危险评价结果的准确性和把握度。因此早期医用 X 射线工作者的个人剂量估算及其基础上的剂量效应分析显得尤为重要。在以往的剂量重建研究中, 有的研究者采用工龄来反映放射工作者的受照剂量, 认为工龄越长受照剂量越大, 然而每个工作者的工作量、检查的类型和防护条件等并不相同<sup>[3-4]</sup>。目前, 国内外基本上都是通过建立统计模型和物理方法来估算剂量。同时根据查阅历史记录及档案资料, 或者问卷调查来获得队列成员的职业史信息和

设备信息,例如工作史、工作设备、防护措施等,利用这些数据与模型相结合进行回顾性剂量估算。目前以医用放射性工作者为研究对象的队列研究主要在美国、日本、加拿大、丹麦和中国。本文通过对国内外的医用 X 射线工作者的回顾性剂量估算研究进展情况进行综述,为我国今后开展相关研究提供参考。

## 2 国外回顾性剂量估算研究现状

加拿大和丹麦医用 X 射线工作者队列研究分别在 1951-1987 年和 1968-1985 年对 73 100 名和 4200 名医用工作者进行了随访,对于缺失的早期剂量信息没有进行估算<sup>[5-7]</sup>,仅利用了后期剂量监测设备得到的剂量数据。然而忽略早期放射工作者的高剂量信息,可能会对辐射致癌危险评价造成低估。

日本的医用 X 射线技师队列包括约 12 000 名技师,开始工作的时间在 1918-1971 年之间,但在 1960 年之前并没有可用的剂量数据。对于缺乏的剂量信息,他们利用队列成员的工作史等相关信息和模型相结合来估算不同工作时期的个人剂量。每个成员的累积剂量是将整个工作时期的剂量加和得到的。剂量估算公式包括两个参数  $\alpha$ 、 $\beta$ ,具体参数值是基于有效的监测剂量数据的回归分析得出的。

$\alpha$  值取决于防护状态,取值范围为 0.06(防护状态最好)~0.36(防护状态最差)。 $\beta$  值取决于设备类型,工作设备被分为 3 类:高校医院、综合性医院、公共卫生中心, $\beta$  取值范围为 0.05~0.09。通过这一方法得出了 1968-1978 年间的剂量信息。同时,在日本,1979-1993 年间有了利用胶片剂量测量法的个人剂量数据。将模型估算的剂量数据和实际测得的剂量数据对比后发现,通过模型估算出的受照剂量要高于胶片剂量监测得到的剂量,但是剂量随年代变化的趋势是一致的<sup>[8]</sup>。因此,日本模型进行剂量重建的方法可能会导致实际剂量的高估,需要进一步对剂量估算模型进行改善。但是近几年日本队列的剂量重建并没有新的进展。

美国的放射技师队列共包括 146 000 名医用放射工作者,他们参加工作的时间在 1916-1982 年之间,在 1960 年之前同样没有可用的个人剂量监测信息。1983-2004 年对该队列共进行了 3 次回顾性随访,对于相关人员的职业史、吸烟饮酒等生活

习惯、医疗状况、工作单位性质(民营还是军用)、工作设备类型、设备的使用频率和工作场所防护测定等信息进行了调查。2006 年 Simom 等<sup>[9]</sup>对 1916-1984 年之间的剂量进行了回顾性重建,根据时代发展特征划分成了 3 个时间段(1960 年之前、1960-1976 年、1977-1984 年),各时间段分别采用不同的模型进行剂量估算。1960 年之前,由于缺乏胶片个人剂量数据且队列成员的个人剂量确定信息极其稀少,主要利用综合不同的历史记录、档案资料等出版物中的剂量信息,进行加权得到 1916-1960 年的剂量信息及其概率密度分布图。1960-1976 年,只有一小部分队列成员的胶片个人剂量信息,根据有限的个人剂量数据得出了一个简单的模型并得出分布图。1977-1984 年,这一时间段的剂量估算方法主要是依靠个人剂量监测记录。由于大部分队列成员都有胶片剂量数据,根据可用剂量数据和工作史信息得出了一个线性模型,通过该模型再来估算缺乏胶片剂量信息的队列成员的个人剂量信息。2014 年 Simon 等<sup>[10]</sup>将剂量重建从 1916-1984 年扩展到 1916-1997 年,并且利用 2004 年最新随访得到的关于工作史、胶片剂量的新数据以及防护措施相关信息对模型不断完善,同时对不确定因素和可能存在的偏倚做了进一步的处理<sup>[9-10]</sup>。

## 3 国内回顾性剂量估算研究现状

我国医用 X 射线工作者队列包括 1950-1980 年间在职的共 27011 名医用 X 射线工作者,1980 年、1986 年、1991 年和 1995 年分别对队列成员进行了 4 次随访调查<sup>[11]</sup>。在我国,1985 年前没有对医用 X 射线工作者开展个人剂量监测,随后虽开始了个人剂量监测,但直到 1990 年,这一人群的个人剂量监测信息还是很缺乏。为对这一人群进行流行病学队列研究,我国早期医用诊断 X 射线工作者的剂量重建就十分必要,为此,张良安提出了基于工作量、工作类型及防护条件等相关信息进行个人剂量重建的剂量学估算模型,即归一化工作量剂量估算方法<sup>[12]</sup>。这一估算模型的基本公式如下:

$$D_i = PW_i \quad (1)$$

式中: $D_i$ :研究队列中某一医用诊断 X 射线工作者在第  $i$  年中个人剂量计佩戴位置的皮肤吸收剂量,单位为 mGy; $P$ :单位归一化工作量下,研究队列中某一医用诊断 X 射线工作者在个人剂量计

佩戴位置的皮肤吸收剂量  $P=0.263$  mGy/千人次) ;  $W_i$ : 研究队列中某一医用诊断 X 射线工作者在第  $i$  年的归一化工作量, 计算公式如下:

$$W_i = \sum_j \sum_k \gamma_{jk} W_{ijk} \quad (2)$$

式中:  $W_{ijk}$ : 研究队列中某一医用诊断 X 射线工作者在第  $i$  年中, 在  $k$  类防护条件下( 机器类型、机器年代、防护设施或设备的使用状态等), 开展  $j$  类 X 射线诊断工作( 胸透、拍片和胃肠检查等) 的年工作量, 单位为人次/年;  $\gamma_{jk}$ : 归一化系数, 是由于防护条件类型和 X 射线诊断工作类型不同引起接受剂量不同而引入的修正。

首先选定计算的年  $i$ , 再选定 X 射线诊断工作类型  $j$ ( 例如胸透等), 用公式 (2) 对这一年里该类诊断在不同防护条件类型  $k$  的归一化工作量分别进行计算, 直到计算完所有类型  $k$  ( 即首先对  $k$  求和); 再选定另一类工作类型, 对所有可能的防护条件求和, 直到完成该年所有的归一化工作量计算。再用公式 (1) 计算该年的年剂量, 累加每一年的剂量估算结果, 就可得出被估算人员的累积个人剂量。

只要研究者对诊断类型  $j$  和防护类型  $k$  选定合理, 就不难从相关文献中查得  $\gamma_{jk}$  的值; 诊断类型  $j$  和防护类型  $k$  选定后, 其工作量  $W_{ijk}$  ( 诊断人数) 最好能由被估算人员自己准确提供, 若被估算人员无法准确提供, 可以粗略采用相关资料的默认值。根据参加工作时间的不同和工作医院类型( 按门诊量分类) 将  $W_{ijk}$  的默认值分为 27 种, 只要知道被估算人员参加工作的时间和工作医院类型就可以使用相应的默认值。

为了得到相对合理的归一化工作量剂量估算方法中的主要参数  $\gamma_{jk}$ , 在全国范围内采用分层抽样的方法, 使调查具有普遍性和代表性, 对大型综合医院、专科医院及区县级中、小型医院的胸透、胃肠造影和拍片等主要诊断类型进行了不同年代机器、不同防护措施和实施的防护水平调查, 这次调查在 1632 个不同的工作类型和防护条件场所中对 608 台不同时期生产的不同容量的 X 射线机进行了模拟测量<sup>[13]</sup>。这些防护调查结果基本代表

了我国 1985 年以前医用 X 射线诊断工作场所的防护水平, 基于这些调查数据得出的  $\gamma_{jk}$  确保了归一化工作量剂量估算方法的合理性。

为了得到归一化工作量剂量估算方法中的工作量默认值  $W_{ijk}$ , 在我国 19 个省、市、自治区中, 采用分层抽样的方法, 共调查了 200 多所医院的工作量登记资料, 在此基础上得出了相对可信的工作量默认值  $W_{ijk}$ <sup>[14]</sup>。

为了得到相对合理的归一化工作量剂量估算方法中的主要参数  $P$ , 在我国 14 个省、市、自治区中的 200 多所医院中, 对各医院中在岗的 X 射线诊断工作人员左胸位置佩戴个人剂量计[可得出公式 (1) 中的  $D_i$  值]; 与此同时, 对这些人员不同诊断类型的工作量[可得到公式 (2) 中的  $W_{ijk}$ ]、使用机器的基本情况、防护设施和措施使用情况进行了严格的登记[可得出公式 (1) 中的  $W_i$  值]; 基于这些数据, 可利用公式 (1) 得出有代表性的  $P$  值<sup>[15]</sup>。调查范围遍及全国, 样本数较大, 基本上反映了我国当时的实际情况。

为了验证剂量估算的结果, 有研究者用热释光剂量法、染色体 G 分带技术和荧光原位杂交方法等做了比较, 结果提示这一方法可用于诊断 X 射线工作者的致癌危险评价<sup>[16-17]</sup>, 与后期的牙釉质剂量重建方法得到的结果基本一致<sup>[18]</sup>。

基于归一化剂量估算方法, Wang 等<sup>[19]</sup>利用问卷调查结果中 3805 名队列成员的工作史、防护情况等信息, 得出了我国医用 X 射线工作者不同时期的平均年剂量( 表 1)。由于该剂量信息是由 3805 人的平均剂量外推到整个队列得到的, 因此只适用

表 1 不同年代开始从事 X 射线工作的各组平均累积剂量和平均年剂量及 95%CI<sup>[19]</sup>

Table 1 Average of the cumulative and annual dose by calendar year of initial employment, 95%CI<sup>[19]</sup>

开始工作的年代	总人数	被监测人数	累积剂量/mGy		年剂量/mGy	
			平均值	95%CI	平均值	95%CI
1949 年以前	463	159	1813.0	1536.0~2090.0	36.9	31.6~42.2
1950~1954 年	1999	428	865.0	765.0~964.0	20.0	17.8~22.2
1955~1959 年	2487	526	524.0	485.0~563.0	13.7	12.8~14.6
1960~1964 年	3265	667	302.0	181.0~323.0	9.0	8.4~9.6
1965~1969 年	1993	393	189.0	169.0~209.0	6.6	6.0~7.2
1970~1974 年	6913	777	83.5	76.6~90.4	3.5	3.3~3.7
1975~1980 年	9891	855	48.5	44.5~51.5	2.9	2.7~3.1
总计	27 011	3805	-	-	-	-

注: 表中, “-” 表示无此项数据。

于医用 X 射线工作者的群体, 然而群体剂量造成剂量分组不全, 难以进行辐射致癌危险评价。之后, Sun 等<sup>[20]</sup>通过曲线拟合方法估算了个体的剂量信息。

#### 4 医用诊断 X 射线工作者回顾性剂量估算的优势与不足

通过对各国医用诊断 X 射线工作者的回顾性剂量估算方法的比较, 可以看出日本的剂量重建方法与美国的方法有相似之处, 主要是通过有限的实测胶片剂量数据得出的剂量估算模型参数。然而胶片剂量个人监测方法是国际上早期使用的一种方法, 其灵敏度较低, 胶片剂量法所得出的数据可能与实际剂量存在一定的偏差, 因此得到的剂量估算模型参数准确性较差。而我国的归一化工作量法是通过不同时期的机器进行大量模拟测量得到的剂量数据而建立的, 所得的估算模型参数代表性较高, 基本反映了我国当时的情况。得出的模型再与过去的工作史等相关信息相结合来进行回顾性剂量估算。只要归一化工作量调查和计算合理, 便可得出合理可靠的估算结果。然而这一方法存在一定的不确定性, 不确定性主要是来源于职业史的信息偏倚较大。在我国和日本, 早期几乎没有完整的有关工作史信息登记的相关机构和组织, 主要根据医师回忆过去的工作史等相关信息来选取归一化系数, 再得出相应类型和防护条件下的工作量, 因此存在信息偏倚, 结果必然会影响重建剂量的准确性。

#### 5 医用诊断 X 射线工作者回顾性剂量估算的研究展望

在流行病学剂量与效应关系的研究中, 剂量是评价效应的依据, 剂量信息越准确, 效应评价越可靠, 同时准确的个人剂量也可以用于辐射致癌病因概率的计算。因此, 要想得到更新的、更坚实可靠的辐射致癌风险估计需要更为精确的剂量信息<sup>[21]</sup>。所以根据我国早期医用 X 射线工作者的研究现状, 通过归一化工作量法得到我国医用 X 射线工作者的早期个人剂量是辐射流行病学研究的首要任务。虽然 Sun 等<sup>[20]</sup>通过曲线拟合方法估算了个体的剂量信息, 但是此方法是通过 3805 名队列成员的群体年均剂量进一步曲线化得出的个人虚拟剂量, 将直接影响致癌危险评价的准确性。为了使最终估算的

剂量信息更加准确, 仍需进一步地从档案资料上获取更多的工作史相关数据。我国以往的 4 次随访对队列成员的职业史有过调查, 我们可以进一步挖掘档案资料, 尽量找到有关所有队列成员从事放射工作的起止时间、工作种类、门诊量、防护情况、防护设备变更情况、X 射线机年代等信息。同时可以利用最新的随访结果获得从事放射工作的时间等信息, 二者相结合, 尽量减少回忆偏倚, 再采用归一化工作量法估算出每一位队列成员每年的个人剂量信息。这一方法虽然工作量较大, 但是可以直接获得个人剂量信息, 将群体剂量个体化, 并且会极大提高个人剂量估算结果的准确性。同时可以利用得到的个人剂量进行剂量效应的研究, 为低剂量辐射致癌的危险评价和辐射防护标准的制定提供基础数据。同时得到的个人剂量通过器官剂量转化系数可求出其他器官的剂量, 从而对肿瘤做出放射性病因学判断。

利益冲突 本研究由署名作者按以下贡献声明独立开展, 不涉及任何利益冲突。

作者贡献声明 张欣负责收集文献, 撰写综述; 孙志娟、赵永成负责选题设计以及文章的审阅工作。

#### 参 考 文 献

- [ 1 ] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). Sources and effects of ionizing radiation[R]. United Nations, New York, 1994: 22-60.
- [ 2 ] Harry J Griffiths. 1990 Recommendations of the International Commission on radiological Protection. Annals of the ICRP Publication 60[J]. Radiology, 1992, 182(3): 692. DOI:http://dx. doi. org/10. 1148/radiology. 182. 3. 692-a.
- [ 3 ] 全国医用诊断 X 线工作者剂量与效应关系协作组, 工作量调查专题组. 我国医用诊断 X 线工作者受照剂量及其对健康的影响[J]. 中华放射医学与防护杂志, 1984, 4(5): 1-13.  
The collaborative group of Chinese medical diagnostic X-ray workers and the dose effect relationship, the task force of workload investigation. The radiation dose and health effects for Chinese medical diagnostic X-ray workers[J]. Chin J Radiol Med Prot, 1984, 4(5): 1-13.
- [ 4 ] Yoshinaga S, Mabuchi K, Sigurdson AJ, et al. Cancer risks among radiologists and radiologic technologists; review of epidemiologic studies[J]. Radiology, 2004, 233(2): 313-321. DOI:http://dx. doi. org/10. 1148/radiol. 2332031119.
- [ 5 ] Ashmore JP, Krewski D, Zielinski JM, et al. First analysis of mortality and occupational radiation exposure based on the National Dose Registry of Canada[J]. Am J Epidemiol, 1998, 148(6): 564-

- 574.
- [ 6 ] Sont WN, Zielinski JM, Ashmore JP, et al. First analysis of cancer incidence and occupational radiation exposure based on the National Dose Registry of Canada [J]. *Am J Epidemiol*, 2001, 153(4): 309–318. DOI: 10. 1093/aje/153. 4. 309.
- [ 7 ] Andersson M, Engholm G, Ennow K, et al. Cancer risk among staff at two radiotherapy departments in Denmark[J]. *Br J Radiol*, 1991, 64(761): 455–460. DOI: 10. 1259/0007–1285–64–761–455.
- [ 8 ] Yoshinaga S, Yamamoto Y, Aoyama T, et al. Results and problems of occupational dose Reconstruction for Japanese radiological technologists[J]. *Radiat Prot Dosimetry*, 1998, 77(1/2): 73–78.
- [ 9 ] Simon SL, Weinstock RM, Doody MM, et al. Estimating historical radiation doses to a cohort of U. S. radiologic technologists[J]. *Radiat Res*, 2006, 166(1 Pt 2): 174–192. DOI: 10. 1667/RR3433. 1.
- [ 10 ] Simon SL, Preston DL, Linet MS, et al. Radiation organ doses received in a nationwide cohort of U. S. radiologic technologists: methods and findings[J]. *Radiat Res*, 2014, 182(5): 507–528. DOI: 10. 1667/RR13542. 1.
- [ 11 ] 王继先, 李本孝, 赵永成, 等. 中国医用诊断 X 射线工作者 1950~1995 年恶性肿瘤危险分析[J]. *中华放射医学与防护杂志*, 2002, 22(4): 234–238. DOI: 10. 3760/cma. j. issn. 0254–5098. 2002. 04. 002.
- Wang JX, Li BX, Zhao YC, et al. Risk analysis of malignant tumor among medical diagnostic X-ray workers in China, 1950–1995[J]. *Chin J Radiol Med Prot*, 2002, 22(4): 234–238.
- [ 12 ] 中华人民共和国卫生部. GB/T 16149–2012 外照射慢性放射病剂量估算规范[S]. 北京: 人民卫生出版, 2012.
- Ministry of Health of the People's Republic of China. GB/T 16149–2012 External dose estimation of chronic radiation sickness specification[S]. Beijing: People's Medical Publishing House, 2012.
- [ 13 ] 王继先, 张良安, 李本孝, 等. 中国医用 X 射线工作者恶性肿瘤危险评价[J]. *中国医学科学院学报*, 2001, 23(1): 65–68.
- Wang JX, Zhang LA, Li BX, et al. Cancer risk assessment among medical x-ray workers in China [J]. *Chin Med Sci J*, 2001, 23(1): 65–68.
- [ 14 ] 全国医用诊断 X 射线工作者剂量与效应关系协作组, 工作量调查专题组. 我国主要医用诊断 X 射线工作者的工作量调查[J]. *中华放射医学与防护杂志*, 1984, 4(5): 23–26.
- The collaborative group of Chinese medical diagnostic X-ray workers and the dose effect relationship, the task force of workload in-
- vestigation. The main workload survey of medical diagnostic X-ray workers in China[J]. *Chin J Radiol Med Prot*, 1984, 4(5): 23–26.
- [ 15 ] 全国医用诊断 X 射线工作者剂量与效应关系协作组, 剂量估算参数专题组. 我国主要医用诊断 X 射线工作者的工作量与受照剂量的关系[J]. *中华放射医学与防护杂志*, 1984, 4(5): 26–28.
- The collaborative group of Chinese medical diagnostic X-ray workers and the dose effect relationship, the task force of dose estimation of parameters. The workload and dose relationship between medical diagnostic X-ray workers in China[J]. *Chin J Radiol Med Prot*, 1984, 4(5): 26–28.
- [ 16 ] Zhang LY, Jia D, Chang H, et al. A retrospective dosimetry method for occupational dose for Chinese medical diagnostic X-ray workers [J]. *Radiat Prot Dosim*, 1998, 77(1/2): 69–72. DOI: 10. 1093/oxfordjournals. rpd. a032297.
- [ 17 ] Wang ZQ, Liu XP, Li J, et al. Retrospective dose Reconstruction for medical diagnostic X ray workers in China using stable chromosome aberrations[J]. *Radiat Prot Dosimetry*, 1998, 77(1/2): 87–89.
- [ 18 ] 丁艳秋, 周莉, 焦玲, 等. 牙釉质 EPR 剂量学方法应用于医用诊断 X 射线工作者剂量重建的方法研究[J]. *中国辐射卫生*, 2010, 19(1): 15–16. DOI: 10.13491/j.cnki.issn.1004–714x.2010.01.035.
- Ding YQ, Zhou L, Jiao L, et al. The study on method of dose Reconstruction of enamel EPR dosimetry for medical diagnostic x-ray workers[J]. *Chin J Radiol Health*, 2010, 19(1): 15–16.
- [ 19 ] Wang JX, Zhang LA, Li BX, et al. Cancer incidence and risk estimation among medical X-ray workers in China, 1950–1995 [J]. *Health Phys*, 2002, 82(4): 455–466.
- [ 20 ] Sun ZJ, Inskip PD, Wang JX, et al. Solid cancer incidence among Chinese medical diagnostic X-ray workers, 1950–1995; estimation of radiation-related risks[J]. *Int J Cancer*, 2016, 138(12): 2875–2883. DOI: 10. 1002/ijc. 30036.
- [ 21 ] 刘宇飞, 王福如, 余宁乐, 等. 江苏省医用 X 射线工作者 1997–2011 年队列随访恶性肿瘤发病风险研究[J]. *中华放射医学与防护杂志*, 2015, 35(6): 455–460. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254–5098.2015.06.012.
- Liu YF, Wang FR, Yu NL, et al. Risk analysis of malignant tumor among medical diagnostic X-ray workers during 1997–2011 in Jiangsu province[J]. *Chin J Radiol Med Prot*, 2015, 35(6): 455–460.

(收稿日期: 2016–06–22)