

辐射致癌危险模型及人群危险转移研究概况

陈景云 赵永成

【摘要】 对日本原子弹爆炸幸存者队列的流行病学研究,是各国进行辐射危害评价及赔偿的主要依据。依据流行病学数据建立模型,定量计算辐射危险,使该结果的应用更加明确。近年来随着日本原子弹爆炸幸存者队列数据资料的进一步搜集、方法学的不断完善,模型的研究也取得了新的进展。该文对迄今为止各个主要致力于辐射致癌研究的机构给出的辐射致癌模型及人群危险转移进行综述,简要介绍建立模型及转移时考虑的因素,以期为我国辐射致癌赔偿相关应用提供参照。

【关键词】 肿瘤,辐射性;模型,统计学;病因概率;人群危险转移

Research advances on risk models of radiogenic cancer and risk transfer models between population Chen Jingyun, Zhao Yongcheng, Tianjin Key Laboratory of Radiation Medicine and Molecular Nuclear Medicine, Institute of Radiation Medicine, Chinese Academy of Medical Sciences, Tianjin 300192, China

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

【Abstract】 The epidemiology study on Japanese Life Span Study Cohort is the main basis of radiation risk assessment and compensation for many countries. The models based on epidemiology data can calculate risk quantitatively, and provide explicit result for application. Recent years, with the data collection of Japanese Life Span Study Cohort and advancement of methodology, studies on risk model have made a great progress. The paper summarizes the models of radiogenic cancer and risk transfer models between populations which are established by the main institutions of radiation related cancer research, and briefly introduces the main considerations when establishes the model and transfers the risk between populations. In order to provide reference for the application of carcinogenic compensation related to radiation in china.

【Key words】 Neoplasms, radiation-induced; Models, statistical; Probability of causation; Risk transfer between population

辐射致癌是一种随机性效应^[1],目前还没有临床特异性的鉴别方法来判断癌症是否由辐射诱发^[2],这给受职业照射的患癌人员的职业赔偿带来了困难。目前,各国普遍采用 Bond 于 1959 年在美国第 13 届索赔律师年会报告中提出的病因概率(probability of causation, PC)概念作为赔偿依据^[3]。PC 的计算涉及到超额相对危险(excess relative risk, ERR)或超额绝对危险(excess absolute risk, EAR),而其得出需要根据大量流行病学资料,建立合理的

估计模型及模型参数。

辐射致癌的流行病学资料,特别是低剂量辐射致癌的人群流行病学资料缺乏。日本原子弹爆炸幸存者终身队列研究(life span study, LSS)是各个机构建立模型、拟合参数使用的主要数据。然而,建立的模型并不能直接应用到生活方式、环境和人种遗传背景等因素不同的其他国家,因此各个机构及组织在结合以往研究成果的基础上,提出了基于相加模型和相乘模型的人群转移模型及转移系数。下面就对各个机构提出的辐射致癌及人群转移模型进行综述。

1 两种辐射致癌危险模型

20 世纪 80 年代以来,美国环境保护署和国际

DOI: 10.3760/cma.j.issn.1673-4114.2014.05.015

基金项目:国家卫生和计划生育委员会标准项目(20130702);
协和青年基金(33320140032)

作者单位:300192 天津,中国医学科学院放射医学研究所,
天津市放射医学核医学重点实验室

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

放射防护委员会(international commission on radiological protection, ICRP)等机构开始系统地研究辐射致癌危险模型,迄今已提出多个模型。目前,认为与辐射致癌超额危险相关的因素有性别、受照剂量、受照年龄、发病年龄(到达年龄)等。对某特定肿瘤,有两种模型,即绝对危险模型和相对危险模型,分别由相加模型和相乘模型得出^[4]。相加模型假设辐射致癌的超额危险不依赖于人群的基线率,相乘模型中辐射致癌超额危险与基线率成比例^[5]。

2 美国电离辐射生物效应委员会(biological effects of ionizing radiation, BEIR)主要模型

BEIR 主要致力于低剂量照射对人类辐射效应的研究,迄今已发表 7 版报告。其中主要模型有以下 4 种:

2.1 1988 年 BEIR IV 氡致矿工肺癌 ERR 模型

BEIR 基于 4 组氡照射矿工数据,包括 459 例肺癌死亡者,受调查人员追踪达 50 万人/年,最终建立了受照后经过时间修正的相对危险模型^[6],该模型认为肺癌超额危险度同受照年龄和停止照射时间相关^[7],肺癌总危险度 $r(a)$ 的危险模型如下:

$$r(a) = r_0(a)[(1+0.025\gamma(a)(W_1+0.5W_2)]$$

$r_0(a)$ 为危险度基线值,随性别、吸烟状况和时间变化; $\gamma(a)$ 为年龄相关因子; W_1 、 W_2 分别代表累积照射量。

BEIR IV 报告中的受照后经过时间修正的模型认为氡的影响随着年龄增加而下降,反映了照后经过时间以及发病年龄(到达年龄)的影响^[6]。

2.2 1990 年 BEIR V ERR 模型

BEIR V^[8]于 1990 年提出新的危险估计模型和 PC 计算模型,利用日本放射线影响研究所原子弹爆炸幸存者 1950-1985 年的病死率数据,使用 DS86 器官剂量体系,采用 Cox 回归分析。BEIR V 模型是改良的相乘模型,用年龄和照射后经过时间等因素修饰剂量增加函数。基本公式为:

$$R(d) = R_0[1+f(d)g(\beta)]$$

$R(d)$ 为年龄别癌症危险, R_0 为年龄别基线率; $f(d)$ 为剂量 d 的函数; $g(\beta)$ 为受照年龄、发病年龄(到达年龄)、照后经历时间、性别等变量对 $f(d)$ 的修饰因子。白血病剂量外推用线性平方模型^[9]: $f(d) = a_1d + a_2d^2$, 其中, a_1 、 a_2 为常量; 其余使用线性模型: $f(d) = a_3d$, 其中, a_3 为常量。

BEIR V 中采用改良的受照后经过时间修正的相对危险模型,采用新的危险估计资料,便于分层分析,较少受到癌症登记遗漏和基线率差别的影响,便于人群转移^[8]。其缺点是给出的癌症种类少,PC 参数少,有待继续补充^[10]。

2.3 1999 年 BEIR VI 氡致肺癌模型及其改进模型

1999 年的 BEIR VI 报告^[11]基于 11 个地下矿工队列 2700 例肺癌患者的流行病学资料,受调查者达 120 万人/年。该报告把系数 K 调整为 1。该模型能够计算在不同氡暴露浓度或暴露持续时间下单位危险度的增加。模型如下:

$$ERR = \beta(a)(W_{5-14} + \theta_{15-24}W_{15-24} + \theta_{25+}W_{25+})$$

$\beta(a)$ 为发病年龄(到达年龄) a 的危险系数; 暴露窗口 W_{5-14} 、 W_{15-24} 和 W_{25+} 分别表示各时间长度氡累积暴露量; θ_{15-24} 和 θ_{25+} 为氡累积暴露量对总危险度的相对贡献。

为了解决 BEIR IV 以及 BEIR VI 中浓度模型和间期模型在估算危险度时带来的差异,2003 年美国环境保护署根据 BEIR VI 的报告将两种模型进行平均化处理,提出改进模型^[12]:

$$ERR(a) = \beta(a)(W_{5-14} + \theta_{15-24}W_{15-24} + \theta_{25+}W_{25+})\phi_{age}(a)\gamma_z$$

$\beta(a)$ 为发病年龄(到达年龄) a 的危险系数; W_{5-14} 、 W_{15-24} 和 W_{25+} 表示各段年龄的氡累积暴露量; θ_{15-24} 和 θ_{25+} 为各段暴露后经过时间的效应修正因子; $\phi_{age}(a)\gamma_z$ 为暴露率和暴露间期的效应修正因子。

2.4 2006 年 BEIR VII ERR 模型

在 2006 年发布的新的低剂量电离辐射健康效应报告^[13]中,实体癌模型的建立主要基于 1958-1998 年 LSS 数据,使用 DS02 剂量体系。除甲状腺癌和非黑色素瘤皮肤癌以外的实体癌超额危险模型为:

$$ERR(d, s, e, a) \text{ 或 } EAR(d, s, e, a) = \beta_s d \exp(\gamma e^*) a^n$$

d 为剂量; β_s 为性别 s 相关参数; e 为受照年龄; a 为发病年龄(到达年龄); $e^* = \min(e-30, 0)$ 。该模型与日本放射线影响研究所实体癌风险模型相似^[13]。

针对女性乳腺癌和甲状腺癌,基于包括 LSS 数据在内的多个数据样本,使用类似的模型进行分析,并给出了拟合的参数。女性乳腺癌 ERR 模型如下:

$$ERR/Sv = \beta(a/60)^{-2}$$

a 是发病年龄(到达年龄),基于 LSS 和美国人

群分析得到的 β 值分别为 1.46 和 0.51^[13]。以 Preston 等^[14]关于女性乳腺癌研究为基础的 EAR 模型如下:

$$EAR/(10^4 \text{ 人} \cdot \text{年} \cdot \text{Gy}) = 9.9 \exp[-0.25(e-30)](a/50)^\eta$$

e 代表受照年龄; a 代表发病年龄(到达年龄); $a \geq 50$ 时, η 为 3.5; 9.9 代表总体风险水平。该报告在计算终生危险时, 更倾向于使用 EAR 模型。

甲状腺癌的 ERR 模型如下:

$$ERR/Gy = \beta \exp[\gamma(e-30)]$$

e 是受照年龄; $\gamma = -0.083$; β 为性别相关系数, 男性和女性分别为 0.53 和 1.05。

对于白血病, 基于 1950-2000 年 LSS 队列中白血病的病死率数据, 模型如下:

$$ERR(d, s, e, t) = \beta_s d(1 + \theta d) \exp[\gamma e^* + \delta \log(t/25) + \Phi e^* \log(t/25)]$$

d 为骨髓剂量; s 为性别; e 为受照年龄; $e^* = \min[(e-30)/10, 0]$; t 是照后经历时间; β_s 为性别相关系数; θ 为曲线曲率, 同性别、受照时间、照后经历时间无关; θ 、 γ 、 δ 、 Φ 为相关参数, 通过数据拟合得到。

3 ICRP 主要模型

ICRP 是一个咨询机构, 主要提供适当放射防护能够依据的基本原则指导, 其推荐的模型如下:

3.1 ICRP 1991 年建议书

1991 年 ICRP^[15]在总结联合国原子辐射效应科学委员会(United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, UNSCEAR)(1988)和 BEIR V(1990)的 report 的基础上, 推荐使用 UNSCEAR 的恒定相加-相乘模型。

该模型基于 1950-1985 年 LSS 队列数据并结合 1982 年日本的人口统计数据, 对各实体癌使用统一的模型。对白血病使用 EAR 模型, EAR 和受照射年龄相关, 分为 0~9 岁、10~19 岁、20+ 岁 3 组分别进行危险估计, 并且假设 EAR 在照后 40 年持续存在。对白血病以外的实体癌使用 ERR 模型, 年龄分组和白血病相同, ERR 从照后 10 年起至死亡保持不变。

3.2 ICRP 2007 年建议书

ICRP 2007 年建议书中给出了各组织和器官的标称危险系数, 采用考虑了性别、受照年龄、发病年龄(到达年龄)的修正作用的超额危险模型, 模型主要基于 1958-1998 年 LSS 发病率数据, 对食道、

胃、结肠、肝、肺、乳腺、卵巢、膀胱、甲状腺和白血病(骨髓)分别建立了 ERR 和 EAR 模型, 其他实体癌单独作为一类建立模型^[16]。

分别对实体癌使用了线性剂量响应、对白血病使用线性平方剂量响应的 EAR 模型。对皮肤癌的危险估计采用 ICRP Publication 59^[17]中的标称皮肤癌危险估计值, 并给出了各个部位 ERR 和 EAR 模型的系数。

4 UNSCEAR 主要模型

UNSCEAR 主要致力于评估暴露于电离辐射的水平和效应, 其模型如下:

4.1 UNSCEAR 2000 年报告书

UNSCEAR 2000 b 报告基于 LSS 发病率和病死率数据, 评价了白血病、食道癌、胃、结肠、肝、肺、乳腺、膀胱、甲状腺以及其余组织的超额危险^[4]。基于 Preston 等^[18]对 1950-1987 年 LSS 队列发病率数据的研究, 得出白血病模型如下:

$$EAR(d, s, e, t) = \beta_s(d + \theta d^2) \exp[\gamma_t + (\delta_e + \varepsilon_t)(t-25)]$$

EAR 和剂量 d 、性别 s 、受照年龄 e 、照后经过时间 t 相关; e 分为 3 个年龄段: 0~19 岁、20~39 岁、40+ 岁; θ 反映曲线的曲率; δ_e 、 γ_t 和 ε_t 表示对性别相关参数。各年龄段参数值分别给出^[4]。

对实体癌, 该报告基于 LSS 队列 1950-1990 年病死率数据与 1958-1987 年发病率数据建立的 ERR 模型如下:

基于受照年龄:

$$ERR(d, s, e) = \beta d \exp[\Phi s + \gamma(e-30)]$$

基于发病年龄/到达年龄:

$$ERR(d, s, a) = \beta d \exp(\Phi s) a^\eta$$

d 为剂量; s 为性别; e 为受照年龄; a 为发病年龄(到达年龄), 其中, β 、 Φ 、 γ 、 η 为模型参数, 通过拟合得到。

4.2 UNSCEAR 2006 年报告书

UNSCEAR 2006 年报告书模型白血病基于 1950-2000 年的 LSS 数据, 实体癌基于 1950-1998 年的数据, 并且应用新的 DS02 剂量估算体系^[19]。相对 UNSCEAR 2000 年报告书, 增加了唾液腺、小肠、直肠、胰腺、子宫、卵巢、肾脏、皮肤黑色素等癌症的发病及病死危险评估。并且, 在一般危险模型基础上, 对每个部位分别给出 ERR、EAR 模型的参数。

5 美国国立卫生研究院 (national institutes of health, NIH)主要模型

5.1 NIH 1985 年报告模型

NIH1985 年的报告主要利用原子弹爆炸人群 1950-1974 年的随访数据, 采用 T65D 剂量体系, 除乳腺和甲状腺(两者为线性模型)外, 各部位剂量响应均采用线性平方模型^[20], 给出白血病、甲状腺癌、女性乳腺癌、唾液腺癌、食道癌、胃癌、结肠癌、肝癌、胰腺癌、肺癌、肾及膀胱癌和²²⁴Ra 致骨癌 12 种癌症的计算参数^[10]。相对危险度不随年龄和照后时间变化, 建立恒定的相加-相乘杂合模型。

5.2 NIH 2003 年报告模型

2003 年, NIH/CDC(Centers for Disease Control)工作组利用新的随访资料, 采用新的计算方法对 1985 年的 PC 表进行了更新, 采用当量剂量取代了原吸收剂量, 并且考虑了更多的癌症部位, 建立了交互式计算机程序^[21]。相较于 1985 年的报告, 2003 年的报告更多地使用了 LSS 队列研究数据, 除甲状腺癌以外, 大部分模型数据来源于 1958-1987 年。建立的除甲状腺癌和非黑色素瘤皮肤癌以外的所有实体癌 ERR 模型如下:

$$ERR(d, s, e, a) = \alpha \text{dexp}[\beta I_s(\text{sex}) + \gamma f(e) + \delta g(a)]$$

d 为剂量; s 为性别; e 为受照年龄; a 为发病年龄/到达年龄; $I_s(\text{sex})$ 为性别相关函数; 参数 α 为超额相对危险。在评估数个函数关系后, 最终 $f(e)$ 和 $g(a)$ 的函数关系式如下: $f(e) = \min[\max(-15, e-30), 0]$; $g(a) = \min[\log(a/50), 0]$; α 、 β 、 γ 、 δ 是未知参数, 通过数据拟合得到。实体癌分别给出参数 β 、 γ 和 δ 的估计值。肝癌两性的 ERR 值相同; 对除卵巢以外的女性生殖器官, 假设 γ 和 δ 均为 0。

6 其他研究

2006 年, 宁静等^[22]基于 LSS 人群 1958-1998 年实体癌发病率数据, 根据 BEIR VII 的一般危险评价方法, 得出 18 种器官或组织实体癌 ERR 模型, 并拟合得到相应参数, 模型如下:

$$ERR = \beta_s \text{dexp}\{[a(e-30)/10] + \omega \log(a/70)\}$$

d 为剂量, β_s 为性别相关参数, e 为受照年龄, a 为确诊年龄, β_s 、 ω 、 a 通过数据拟合确定。

2011 年, 孙志娟等^[23]基于 1950-1995 年期间中国 X 射线工作者队列发病率数据, 参照 BEIR VII 的辐射致癌危险模型, 考虑剂量、受照年龄和发病年龄(到达年龄)等因素, 得出中国 X 射线工作者各部位癌症相对危险系数和绝对危险系数, 并且估算了 5 种癌症的终身危险。

7 各机构人群危险转移研究

7.1 人群危险转移模型

辐射致癌危险估计模型有多方面的应用, 如为制定职业与环境照射辐射防护剂量限值、危险评估提供依据, 进行辐射致癌病因判断等。其中, 通过人群转移推算其他国家人群的辐射致癌危险为其中一个方面。

BEIR IV 的模型属于职业氡照射危险估计, 其调查对象是有限年龄和有限照射时间的男性。且没有持续追踪观察到终生, 并且引入一些假设, 应用于估计公众受照危险度时, 不确定度较大^[6]。

BEIR V^[8]在危险人群转移时, 假设电离辐射以“启动因子”的方式发挥作用, 癌症危险与基线率成比例, 在将日本原子弹爆炸人群危险转移到美国人群时采用了相乘模型。

BEIR VII^[13]在危险人群转移时, 对包括白血病在内的其他实体癌, 使用相加和相乘的组合来计算危险的转移。权重分配方面, 女性乳腺癌采用相加转移模型, 甲状腺癌采用相乘转移模型。除乳腺癌、甲状腺癌和肺癌外, 其他癌症都以对数尺度, 给予相乘模型 0.7 的权重, 相加模型 0.3 的权重。因为相乘模型对于病例的缺失等因素带来的偏倚更加稳定, 该报告更加支持相乘模型。肺癌相乘和相加模型的权重系数分别为 0.3 和 0.7(对数尺度)。对上述几类之外的其他癌症, 目前尚缺乏足够的资料来得到合适的转移模型, 因此归为“其他癌症”一类。

ICRP 1990 年建议书中提出, 在危险转移上, 对所有实体癌推荐使用两种转移模型的算术均值来实现人群间的危险转移^[15]。

ICRP 2007 年建议书中提出, 对骨髓癌(白血病属于此类)、乳腺癌拟定单一 EAR 模型^[16], 与美国全国辐射防护委员会第 126 号报告^[15]相同。甲状腺癌危险只依据相关危险集合分析建立 ERR 模型。对肺癌, 给予 0.7 的相加模型权重, 0.3 的相

乘模型权重。其他癌症相加模型和相乘模型权重均为0.5。

UNSCEAR 2000 年报告书中在考虑危险人群转移时,根据日本、美国、英国、波多黎各、中国5种人群的统计数据给出了相对和绝对转移模型的超额危险估计及参数,但未给出评价^[4]。

UNSCEAR 2006 年报告书中认为应选择合适相加和相乘模型的均数进行人群间的转移^[19]。

NIH 认为人群危险与基线率无关,应该采用相加转移模型^[20]。

在危险人群转移上,NIH/CDC 工作组 2003 报告主要关注点为:在两国基线率相差较大,并且无法得知哪个为正确模型的情况下,怎样估计美国人群具体部位和具体年龄的 ERR/Sv 值^[21]。在将危险向美国人群转移时,采用相加和相乘模型的随机线性合并。公式如下:

$$(ERR_{1Sv})_{美国} = y (ERR_{1Sv})_{相乘} + (1-y) (ERR_{1Sv})_{相加}$$

y 为随机变量,取值范围为 -0.1 ~ 1.1; $(ERR_{1Sv})_{相乘}$ 、 $(ERR_{1Sv})_{相加}$ 分别为相乘、相加模型的超额相对危险,并经两国基线率的调整。

宁静等^[22]在估算中国人群辐射致癌危险时,采用相加和相乘模型的加权线性合并方法:

$$ERR_{中国} = y ERR_{相乘} + (1-y) ERR_{相加}$$

y 为随机变量,取值范围为 0~1。

7.2 不确定性

利用辐射致癌模型进行人群转移时必然存在不确定性。来源有如下几个方面:

在转移方法上,目前较公认的转移方法为:假设相乘和相加模型为两个极端,人群真实危险值位于两极端值之间,因此在选择相加和相乘模型的系数时,不同的系数值会带来不同的估计结果;不同机构原始模型建立过程中存在不确定性;目标人群的统计数据、资料的完整性、代表性是不确定性的另一来源。

美国全国辐射防护委员会第 126 号报告认为人群转移的不确定性大约占总不确定性的 19.9%^[5],而 BEIR VII Phase 2 则认为,人群间转移不是不确定性的重要来源^[13]。在估算人群间转移不确定性时,美国全国辐射防护委员会采用对数正态分布来估算人群转移的不确定性。另外,蒙特卡罗模拟法也是多个机构在估算人群转移不确定度时常用的方法。

8 结语

随着流行病学资料的不断积累,方法学的不断完善,各个机构建立的模型考虑因素更加全面,得到的参数也更加稳定,并且从总体上看,其得出的模型有统一的趋势。

目前我国的放射性肿瘤判断标准主要根据美国 1985 年的 NIH-PC 表^[20]所编写,使用的人群资料较为陈旧,不确定性较大。并且随着生活方式、环境的改变等各方面的变化,人群肿瘤率也存在长期的变化趋势。各个机构的新模型,为辐射致癌在新的背景下的应用提供了参考。

但是,目前建立的辐射致癌预测模型以及与其他因素的交互作用研究仍不成熟,还有待进一步的数据积累和研究,特别是个体差异还不能很好地得到分析,因此通过高敏感的分子生物学等方法,对辐射致癌机理进行解释,并结合不断积累的剂量和效应的流行病学资料,逐渐完善辐射致癌模型是当前面临的主要课题。

参 考 文 献

- [1] Annals of the ICRP. ICRP publication 26: 1977 recommendations of the International Commission on Radiological Protection[R]. New York: Pergamon Press, 1977: 21.
- [2] Mummery PW, Alderson BA. The BNFL Compensation Agreement for radiation linked diseases[J]. J Radiol Prot, 1989, 9(3): 179-184.
- [3] 孙世荃. 辐射致癌病因概率的赔偿界限[J]. 中华放射医学与防护杂志, 1980, 9(3): 150-154.
- [4] Charles M. UNSCEAR Report 2000: sources and effects of ionizing radiation[J]. J Radiol Prot, 2001, 21(1): 83-86.
- [5] National Council on Radiation Protection and Measurements. NCRP Report No. 126, Uncertainties in fatal cancer risk estimates used in radiation protection[R]. Bethesda: National Council on Radiation Protection and Measurements Press, 1997: 40-50.
- [6] Fabrikant JI, 于水. BEIR IV 报告: 氡与肺癌[J]. 国外医学放射医学核医学分册, 1991, 15(4): 161-164.
- [7] 孙世荃. BEIR IV 估计氡致肺癌危险的 TSE-RR 模型和氡致肺癌危险度[J]. 辐射防护, 1991, 11(4): 255-260.
- [8] Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiation (BEIR V), Commission on Life Sciences, Division on Earth and Life Studies, et al. Health effects of exposure to low levels of ionizing radiation: BEIR V[R]. Washington DC: National Academy of Sciences, 1990: 161-241.
- [9] 孙世荃. BEIR V 辐射致癌危险系数估算的方法和结果[J]. 辐射防护, 1991, 11(5): 394-398, 393.

- [10] 孙世荃. 人类辐射危害评价[M]. 北京: 原子能出版社, 1996: 149-276.
- [11] Committee on Health Risks of Exposure to Radon (BEIR VI), Commission on Life Sciences, Division on Earth and Life Studies, et al. Health effects of exposure to radon; BEIR VI[R]. Washington DC: National Academy Press, 1999: 1-516.
- [12] 童建. 氡致肺癌的危险度评价模型[J]. 中华劳动卫生职业病杂志, 2007, 25(6): 372-374.
- [13] Committee to Assess Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation, Board on Radiation Effects Research (BRER), Division on Earth and Life Studies (DELS), et al. Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation; BEIR VII Phase 2[R]. Washington DC: National Academies Press, 2006.
- [14] Preston DL, Mattsson A, Holmberg E, et al. Radiation effects on breast cancer risk: a pooled analysis of eight cohorts[J]. Radiat Res, 2002, 158(2): 220-235.
- [15] International Commission on Radiological Protection. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection[R]. Ann ICRP, 1991, 21(1-3): 1-201.
- [16] International Commission on Radiological Protection. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103[R]. Ann ICRP, 2007, 37(2-4): 1-332.
- [17] International Commission on Radiological Protection. The Biological Basis for Dose Limitation in the skin. A report of a Task Group of Committee 1 of the International Commission on Radiological Protection[R]. Ann ICRP, 1991, 22(2): 1-104.
- [18] Preston DL, Kusumi S, Tomonaga M, et al. Cancer incidence in atomic bomb survivors. Part III: Leukemia, lymphoma and multiple myeloma, 1950-1987[J]. Radiat Res, 1997, 137(2S): S68-97.
- [19] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Effects of ionizing radiation: UNSCEAR 2006 Report to the General Assembly, with scientific annexes [R]. New York: United Nations Publications, 2009: 17-120.
- [20] 美国国立卫生研究院. 放射流行病学表-美国国立卫生研究院特别工作组报告(NIH 85-2784)[M]. 北京放射医学研究所, 译. 北京: 中华人民共和国卫生部卫生防疫司, 1987: 37-181.
- [21] Land CE, Gilbert E, Smith JM, et al. Report of the NCI-CDC Working Group to revise the 1985 NIH radioepidemiological tables. NIH Publication DHHS Publ No. 03-5387[R]. Bethesda: National Institute of Health, 2003: 5-65.
- [22] 宁静. 放射性肿瘤病因概率及其计算方法研究[D]. 北京: 中国人民解放军军事医学科学院, 2009.
- [23] 孙志娟. 中国 X 射线工作者辐射致癌危险估算[D]. 北京: 北京协和医学院, 2011.

(收稿日期: 2014-04-21)