

孙世荃 编著

人类辐射危害评价

RISK ASSESSMENT OF HUMAN RADIATION EXPOSURE

原子能出版社

前 言

随着核能的广泛应用,使人类接受各种辐射照射的机会明显增加。对人类接受辐射照射后出现的生物效应与健康危害进行定量评价是放射医学与辐射防护科学研究中的重点,它涉及能源、环境与战争,因而具有重要的社会与政治经济意义。为此,早自 1955 年成立了联合国原子辐射效应科学委员会(UNSCEAR),对人类接受的照射水平与生物效应的最新成就不断进行综述与研究,国际放射防护委员会(ICRP)主要利用 UNSCEAR 的研究结果,提出辐射照射的危险系数,即单位剂量照射的危险,为制定辐射防护剂量限值提供生物学判断的基础。与上述两个国际机构相对应,美国建立了电离辐射生物效应委员会(BEIR)和辐射防护与测量国家委员会(NCRP)。本书旨在以上述这些学术机构的系列报告,特别是 1991 年发表的 ICRP 第 60 号出版物为主线,介绍国外和国内辐射危害评价科学的新进展,这些进展对研究非辐射原因引起的人类健康危害,例如职业与环境污染造成的化学致癌效应和遗传效应的定量评价也有参考价值。

人类辐射危害评价以辐射剂量评价为基础,对照射后出现的不同种类的生物效应进行定量分析。为了建立人类辐射危害评价的概念体系,本书首先对辐射危害评价的目的、任务与发展进行讨论(第 1 章);接着介绍辐射危害评价的剂量学基础(第 2 章)和辐射效应研究的生物学基础(第 3 章)。辐射危害评价的主要对象是受到社会广泛关注的长期低剂量照射引起的随机性效应,即辐射遗传效应(第 4 章)和辐射致癌效应。辐射致癌效应是辐射危害评价的重点,所以分为三章:辐射致癌评价模型(第 5 章),不同受照人群的癌症危险(第 6 章)和辐射致癌危险的个体评价与病因判断(第 7 章)。然后介绍另一类辐射效应即必然性效应的危害评价(第 8 章),其中包括局部组织损伤,放射病以及胚胎和胎儿在出生前受到照射时出现的损伤。辐射危害评价研究的重要目的是利用其所得到的辐射危险系数为制定辐射防护剂量限值提供生物学基础,为此需要对辐射危害进行综合评价和多属性分析,这是本书最后一章(第 9 章)的内容。

人类辐射危害评价是放射医学与辐射防护研究中相当活跃的新领域,它专业覆盖广,观念更新快,本书力求循序渐进,收集和引用 1995 年 10 月前可以得到的最新资料与观点,在各种概念与结论的历史发展变化与相互衔接中向不同专业读者介绍他们所关心的并能理解的辐射危害评价的概念、方法与结论。由于受到本人专业的限制,很难做到对每一个方面的问题都能给以准确的描述与中肯的讨论,不当之处敬请读者指正。

本书蒙魏履新教授担当主审,马如维同志参加剂量学、王建之和孙全富同志参加致癌危险模型的审校,在此一并表示衷心感谢。在本书编写过程中得到尤占云同志在资料收集整理及加工方面的全力协助,本书的出版将使我们共同分享紧张劳动后的欣慰。

孙世荃

1995 年 10 月

编著者通讯地址:中国辐射防护研究院,太原市 120 信箱,邮编:030006。

注 释

1 引用插图的说明

本书引用的插图得到保留版权的原出版部门的同意,其中包括 Editorial office, Journal of the Health Physics Society, USA; Taylor & Francis Ltd, International Journal of Radiobiology, UK; Medical Research Council, Radiology Unit, UK; Public Health Service, NIH, USA; IOP Publishing Ltd, Journal of Radiation Protection, UK; American Association for Cancer Research, USA; Society for Mining, Metallurgy and Exploration Inc, USA; Academic Press Inc; 另外还引用了 UNSCEAR, ICRP, NCRP 和 RERF 出版物中的插图,在此对他们的支持表示感谢。

2 学术机构的缩写名称和全称

UNSCEAR: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (联合国原子辐射效应科学委员会)

ICRP: International Commission on Radiological Protection (国际放射防护委员会)

ICRU: International Commission on Radiation Units and Measurements (国际辐射单位与测量委员会)

IAEA: International Atomic Energy Agency (国际原子能机构)

BEIR: Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiations (电离辐射生物效应委员会, 美国)

NCRP: National Council on Radiation Protection and Measurements (辐射防护与测量国家委员会, 美国)

RERF: Radiation Effects Research Foundation (放射线影响研究所, 日本)

NIH: National Institute of Health (国立卫生研究院, 美国)

NCI: National Cancer Institute (国立癌症研究所, 美国)

EPA: Environmental Protection Agency (环境保护署, 美国)

NRPB: National Radiological Protection Board (国家放射防护委员会, 英国)

3 引用文献的方式

引用文献列于各章之后。第6章内容庞杂,按节列出。英文文献按作者姓名字母排序,中文文献按出现先后排序。文内引用 UNSCEAR 报告用 UN 代表,附以报告发表年份,附件标号或该附件的段落号。如不写附件标号则为该年报告正文。各章引用的 UNSCEAR, ICRP, ICRU, BEIR 和 NCRP 科学综述统一列在下边,不在各章之后另列。

4 引用的科学综述及其附件

UNSCEAR 报告:

1972—A Report of UNSCEAR to the General Assembly, with Annexes, vol II, Effects, United Nations 1972. 电离辐射:水平与效应,第二卷,效应。附件 H:辐射对人体的致癌作用(原子能出版社,1977)

1977—Sources and Effects of Ionizing Radiation, United Nations 1977. 电离辐射源与效应(上,下)。附件 A:评价人体所受照射时使用的概念和量;附件 G:辐射对人体的致癌作用;附件 H:辐射的遗传效应;附件 I:辐射致癌的实验研究;附件 J:子宫内照

射对发育的影响(原子能出版社,1986)

1982—Ionizing Radiation: Sources and Biological Effects, United Nations 1982. 电离辐射; 辐射源与生物效应。附件 A: 剂量评价模式; 附件 B: 天然辐射源照射; 附件 C: 技术发展造成的天然辐射照射; 附件 F: 核动力生产造成的照射; 附件 G: 医疗照射; 附件 H: 职业照射; 附件 I: 辐射遗传效应; 附件 J: 照射的非随机效应; 附件 L: 辐射与其它物理、化学和生物因素复合时的生物学效应。(《辐射防护通讯》编辑部翻译出版, 1983)

1986—Genetic and Somatic Effects of Ionizing Radiation, United Nations 1986, 电离辐射躯体效应与遗传效应。附件 A: 辐射的遗传效应; 附件 B: 辐射诱癌的剂量效应关系; 附件 C: 出生前受照的生物学效应。(《辐射防护通讯》编辑部翻译出版, 1987)

1988—Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation, United Nations 1988.

Annex A: Exposures from natural sources of radiation; Annex B: Exposures from nuclear power production; Annex C: Exposures from medical uses of radiation; Annex D: Exposures from the Chernobyl accident; Annex E: Genetic hazards; Annex F: Radiation carcinogenesis in man; Annex G: Early effects in man of high doses of radiation.

1993—Sources and Effects of Ionizing Radiation, United Nations 1993. Annex A: Exposures from natural sources of radiation; Annex B: Exposures from man-made sources of radiation; Annex C: Medical radiation exposures; Annex D: Occupational radiation exposures; Annex E: Mechanisms of radiation oncogenesis; Annex F: Influences of dose and dose rate on stochastic effects of radiation; Annex G: Hereditary effect of radiation; Annex H: Radiation effects of the developing human brain; Annex I: Late deterministic effects in children. (原子能出版社已于1995年翻译出版)

1994—Sources and Effects of Ionizing Radiation, United Nations 1994.

Annex A: Epidemiological studies of radiation carcinogenesis;

Annex B: Adaptive responses to radiation in cells and organisms. (原子能出版社将于1996年翻译出版)

ICRP 报告, Pergamon Press, Oxford 出版, 绝大部分已由原子能出版社翻译出版。横线后数字为 ICRP 出版物编号, 括弧内为出版年份。

ICRP—2 (1959): Reports of Committee 2 on Permissible Dose for Internal Radiation.

ICRP—11 (1968): A Review of the Radiosensitivity of the tissue in Bone.

ICRP—17 (1971): Protection of the Patient in Radionuclide Investigation.

ICRP—26 (1977): Recommendations of the ICRP.

ICRP—27 (1977): Problems Involved in Developing an Index of Harm.

ICRP—30 (1979): Limit for the Intake of Radionuclides by workers, part 1.

ICRP—31 (1980): Biological Effects of Inhaled Radionuclides.

ICRP—32 (1981): Limits for Inhalation of Radon Daughters by Workers.

ICRP—35 (1982): General Principles of Monitoring for Radiation Protection of Workers.

ICRP—37 (1983): Cost Benefit Analysis in the Optimization of Radiation Protection.

- ICRP-41 (1984): Non-stochastic Effects of Ionizing Radiation.
- ICRP-42 (1984): A compilation of the Major Concepts and Quantitatives in Use by ICRP.
- ICRP-45 (1985): Quantitative Bases for Developing a Unifid Index of Harm.
- ICRP-50 (1987): Lung Cancer from Indoor Exposures to Radon Daughters.
- ICRP-54 (1988): Individual Monitoring for Intakes of Radionuclides by Workers.
- ICRP-55 (1989): Optimization and Decision-Making in Radiological Protection.
- ICRP-58 (1989): RBE for Deterministic Effects.
- ICRP-60 (1991): 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection.
- ICRP-65 (1993): Protection Against Radon-222 at Home and at Work.
- ICRP-66 (1994): Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection.
- ICRU 报告; ICRU, Bethesda 出版
- No. 33 (1980): Radiation Quantities and Units.
- No. 36 (1983): Microdosimetry.
- No. 39 (1985): Determination of Dose Equivalents Resulting from External Radiation Sources.
- No. 40 (1986): The Quality Factor in Radiation Protection.
- No. 43 (1988): Determination of Dose Equivalents from External Radiation Sources, part 2.
- NCRP 报告; NCRP, Bethesda 出版
- No. 64 (1980): Influence of Dose and its Distribution in Time on Dose-Response Relationship for Low-LET Radiations.
- No. 78 (1984): Evaluation of Occupational and Environmental Exposures to Radon and Radon Daughters in the United States.
- No. 80 (1985): Induction of Thyroid Cancer by Ionizing Radiation.
- No. 93 (1987): Ionizing Radiation Exposure of the Population of the United States.
- No. 101 (1989): Exposure of the U. S. Population from Occupational Radiation.
- No. 103 (1989): Control of Radon in Houses.
- No. 104 (1990): The Relative Biological Effectiveness of Radiations of Different Quality.
- No. 115 (1993): Risk Estimation for Radiation Protection.
- No. 116 (1993): Limitation of Exposure to Ionizing Radiation.
- BEIR 报告; Washington, D. C., Nat. Acad. Press 出版
- BEIR III (1980): The Effects on Population of Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation.
- BEIR IV (1988): Health Risks of Radon and other Internally Deposited Alpha-emitters.
- BEIR V (1990): Health Effects of Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation.

目 录

CONTENTS

前言

第 1 章 绪论

- 1.1 电离辐射和辐射危害
- 1.2 辐射危害评价的目的、任务与发展
- 1.3 辐射危害评价的内容

第 2 章 辐射危害评价的剂量学基础

- 2.1 电离辐射的量
 - 2.1.1 照射量、比释动能和吸收剂量
 - 2.1.2 当量剂量和辐射权重因子
 - 2.1.3 有效剂量和组织权重因子
 - 2.1.4 辅助剂量学量
- 2.2 辐射剂量监测与剂量估算
 - 2.2.1 外照射的剂量监测与剂量估算
 - 2.2.2 内照射的剂量监测与剂量估算
 - 2.2.3 氡子体及其照射剂量估算
- 2.3 人类接受的辐射照射水平
 - 2.3.1 天然本底辐射水平
 - 2.3.2 核试验使人类受到的照射
 - 2.3.3 核动力生产
 - 2.3.4 职业性照射
 - 2.3.5 医疗照射
 - 2.3.6 因技术发展使公众受到的照射
 - 2.3.7 综合评价
- 参考文献

第 3 章 辐射效应研究的生物学基础

- 3.1 电离辐射引起的 DNA 损伤与修复
 - 3.1.1 电离辐射、DNA 和染色体
 - 3.1.2 基因突变和染色体畸变
 - 3.1.3 细胞死亡和细胞变异
 - 3.1.4 细胞凋亡

PREFACE

INTRODUCTION (1)

- Ionizing radiation and its risks (1)
- Objects and development of risk assessment (2)
- Contents of risk assessment (4)

DOSIMETRIC BASIS OF RISK

ASSESSMENT (6)

- Quantities of ionizing radiation (6)
- Exposure, kerma and absorbed dose (6)
- Equivalent dose and w_R (9)
- Effective dose and w_T (12)
- Subsidiary dosimetric quantities (14)
- Exposure; monitoring and assessment (16)
- External exposure (17)
- Internal exposure (24)
- Radon progeny exposure (28)
- Levels of radiation exposure (33)
- Natural background exposure (33)
- Nuclear weapons testing (36)
- Nuclear power production (37)
- Occupational exposure (38)
- Medical exposure (41)
- Public exposure (43)
- Comprehensive assessment (44)
- References (45)

BIOLOGICAL BASIS OF RISK

ASSESSMENT (47)

- Radiation induced DNA damage (47)
- DNA and chromosome (47)
- Mutation and chromosome aberration (48)
- Death and modification of cells (48)
- Apoptosis of cells (49)

3.2 辐射剂量的时间分布和空间分布
3.2.1 剂量率效应和 DDREF
3.2.2 低剂量照射及其微观剂量分布
3.3 低剂量照射刺激效应
3.3.1 低剂量刺激效应的研究历史与例证
3.3.2 刺激效应的机制和意义
3.4 辐射生物效应的类别与概念
3.4.1 危险及危害
3.4.2 随机性效应及必然性效应
参考文献

第4章 辐射遗传效应的评价

4.1 概述
4.2 人类辐射遗传危险的估算方法
4.2.1 倍加剂量法(间接法)
4.2.2 直接法
4.3 辐射遗传危险倍加剂量的实验研究
4.3.1 动物实验研究的概况
4.3.2 不同遗传学终点及其倍加剂量
4.4 UNSCEAR 和 BEIR 对人类辐射遗传危险估计的结果
4.4.1 遗传病的自然发生率和突变份额
4.4.2 辐射遗传危险估计的结果
4.5 ICRP 推荐的辐射遗传效应危险系数
4.5.1 ICRP 第 26 号出版物(1977)的遗传危险系数
4.5.2 ICRP 第 60 号出版物(1991)的遗传危险系数
4.6 辐射遗传效应的人类观察资料
4.6.1 原爆人群研究概况
4.6.2 原爆遗传效应的观察指标及其变化
4.6.3 原爆遗传效应的倍加剂量
4.7 摘要
参考文献

第5章 辐射致癌效应及其评价模型

5.1 癌与辐射致癌

Spatial and temporal distribution	(50)
Dose rate effect and DDREF	(50)
Low level exposure microdosimetry	(53)
Hormesis from low level exposure	(58)
Evidences of hormesis	(58)
Mechanisms of hormesis	(60)
Kinds of radiation effects	(62)
Risk and detriment	(63)
Stochastic/deterministic effects	(63)
References	(64)

CENETIC EFFECTS OF

RADIATION	(67)
General description	(67)
Assessment methods of genetic risks	(69)
Doubling dose (indirect) method	(69)
Direct method	(71)
Animal studies on doubling dose	(73)
Introduction on animal studies	(73)
Doubling doses of some endpoints	(74)
Estimations of genetic risks in human from UNSCEAR and BEIR	(77)
Natural rates and mutation component	(77)
Results of genetic risk estimation	(79)
Genetic risk coefficient of ICRP	(81)
Risk coefficient of ICRP Publication 26 (1977)	(81)
Risk coefficient of ICRP Publication 60 (1991)	(83)
Data of genetic effect from human	(84)
Studies on atomic bomb survivors	(84)
Changes of indexes of observation	(85)
Doubling dose in survivors	(87)
Summary	(90)
References	(91)

ASSESSMENT MODEL OF

RADIOGENIC CANCER	(93)
Cancer and radiation carcinogenesis	(93)

5.1.1 癌症的概念与起源	Concept of cancer	(93)
5.1.2 癌症的多阶段发生学说	Multistage carcinogenesis	(94)
5.1.3 人类辐射致癌危险的分析方法	Method of risk analysis	(99)
5.1.4 人类的放射性癌症	Radiogenic cancer in human	(105)
5.1.5 辐射致癌的剂量阈值	Dose threshold of radiogenic cancer	(106)
5.2 影响人类辐射致癌的因素	Factors influencing radiogenic cancer	(109)
5.2.1 性别与激素	Sex and hormones	(109)
5.2.2 遗传学易感性	Genetic susceptibility	(110)
5.2.3 年龄与时间因素	Age and time factor	(116)
5.2.4 环境及生活因素的复合作用	Combined effect from environment	(122)
5.3 辐射致癌危险估计模型	Risk model of radiogenic cancer	(127)
5.3.1 辐射致癌危险的外推模型	Risk extrapolation model	(127)
(1) 剂量外推和剂量-效应关系模型	Dose extrapolation model	(127)
(2) 时间外推和终生危险预测模型	Risk projection model	(134)
(3) 人群外推和人群危险转移模型	Population transfer model	(137)
5.3.2 ICRP 的辐射致癌危险系数与合计危害	ICRP risk coefficient and aggregated detriment	(140)
(1) 致死性癌症的危险系数	Lethal cancers	(140)
(2) 甲状腺、骨、皮肤和肝脏辐射致癌危险系数的来源	Thyroid, bone, skin and liver	(141)
(3) ICRP 提出的辐射合计危害	Aggregated detriment	(145)
5.3.3 BEIR V 辐射致癌危险估计模型	BEIR model of radiogenic cancer	(149)
5.3.4 辐射致癌危险估计的功效和不确定性	Power and uncertainty of risk estimation	(155)
5.3.5 氡致肺癌的危险估计模型和危险系数	Risk model and risk coefficient of radon induced lung cancer	(157)
(1) 氡致肺癌危险估计模型	Risk model of Rn-lung cancer	(158)
(2) 氡致肺癌危险系数	Risk coefficient of Rn-lung cancer	(161)
(3) 室内氡引起的居民肺癌危险	Lung cancer from indoor radon	(165)
5.4 摘要	Summary	(167)
参考文献	References	(169)

第6章 不同受照人群的辐射致癌危险

6.1 原爆幸存者的辐射剂量与致癌效应的研究	
6.1.1 原爆剂量体系	
6.1.2 原爆致癌危险分析的新进展	
6.2 核工厂工作人员的辐射流行病学研究	

CANCER RISK IN DIFFERENT POPULATIONS	(173)
Dose-effect study on atomic bomb survivors	(173)
Dose system of atomic bomb survivors	(173)
Progress of risk analysis	(177)
Radio-epidemiological studies in workers of nuclear plants	(182)

6.2.1 美国 Hanford 厂的调查结果	Studies on Hanford site, US	(182)
6.2.2 美国其它核设施的调查结果	Other nuclear installations in US	(186)
6.2.3 英国核工厂的调查结果	Nuclear plants in UK	(189)
6.2.4 俄罗斯核工厂的癌症危险	Nuclear plants in Russia	(191)
6.2.5 中国核工厂的调查结果	Nuclear plants in China	(192)
6.2.6 核工厂调查资料的联合分析和 职业性照射的致癌危险系数	Combined analysis and risk coefficient from occupational exposure	(193)
6.3 正常运行和事故后核设施周围 公众的癌症危险	Cancer risk in public around nuclear installation	(198)
6.3.1 正常运行的核设施对公众的影响	Public exposure in normal condition	(198)
6.3.2 核事故对公众的影响	Public exposure of nuclear accident	(201)
6.4 核试验落下灰受照人群的研究	Exposure of nuclear testing fallout ...	(204)
6.4.1 比基尼核试验对马绍尔群岛居民的健 康影响	Health effect in Marshall islanders after Bikini testing	(204)
6.4.2 核试验下风向居民的癌症危险	Cancer in residents of downwind	(204)
6.4.3 核试验参加人员的癌症危险	Cancer in participants of testing	(208)
6.5 氡子体照射与矿工肺癌研究的历史 和现状	History and present situation of Rn-induced miner lung cancer	(209)
6.5.1 欧洲 Erz 山区矿工肺癌的历史	Miner lung cancer in Erz mountains	(209)
6.5.2 美国的矿工肺癌研究	Miner lung cancer in US	(211)
6.5.3 其它西方国家的矿工肺癌	Miner lung cancer in other countries	(212)
6.5.4 中国的矿工肺癌	Miner lung cancer in China	(214)
6.5.5 矿工肺癌的组织学类型	Histology of miner lung cancer	(217)
6.5.6 氡致动物肺癌的实验研究和 危险系数	Animal experiment of radon induced lung cancer and risk coefficient	(221)
6.6 接受高本底天然辐射居民的癌症危险	Population in high background	(223)
6.6.1 陆地 γ 辐射高本底地区居民	Terrestrial γ rays high background	(223)
6.6.2 室内氡增加所致居民肺癌危险	Indoor radon and lung cancer	(224)
6.7 医疗照射和医用 X 线工作人员的 癌症危险	Cancer risk after medical exposure and in x-ray workers	(227)
6.7.1 医疗照射引起的癌症危险	Risk after medical exposure	(227)
6.7.2 医用 X 线工作者的癌症危险	Risk in x-ray workers	(236)
6.8 内照射的辐射致癌危险	Cancer risk of internal radiation	(237)
6.8.1 镭表盘工人骨恶性肿瘤	Bone cancer in Ra-dial workers	(237)
6.8.2 铀作业人员的癌症危险	Risk of cancer in plutonium workers	(242)
6.8.3 铀的辐射致癌危险	Risk of cancer in uranium workers	(244)
6.9 出生前照射引起的癌症增加	Cancer after prenatal exposure	(245)
参考文献	References	(249)

第7章 辐射致癌的病因概率 与病因判断

7.1 辐射致癌的病因判断与病因概率 概念的发展

7.1.1 职业癌病因赔偿的历史与现状

7.1.2 病因概率概念的产生与发展

7.2 病因概率及其计算方法

7.2.1 决定病因概率的因素

7.2.2 病因概率的概念与计算方法

7.2.3 病因概率的计算参数与计算例

7.2.4 BEIR V 的 PC 计算方法

及其与 NIH PC 的比较

7.3 病因概率的赔偿界限

参考文献

PROBABILITY OF CAUSATION(PC) OF RADIOGENIC CANCER (260)

Development of etiological
adjudgement of radiogenic cancer
and concept of PC (260)

History of occupational compensation (260)

Development of the concept of PC (262)

PC and PC calculation (264)

Factors influencing PC (264)

Method of PC calculation (267)

Parameters of PC calculation (270)

Comparison of BEIR V PC and NIH PC (273)

Limit of PC compensation (276)

References (279)

第8章 辐射必然性效应和出生前照 射的危险

8.1 必然性效应的一般原理

8.1.1 必然性效应的概念与细胞 存活曲线

8.1.2 影响必然性效应的因素

8.2 必然性效应的剂量阈值与剂量限值

8.2.1 不同器官与组织的反应

8.2.2 必然性效应的辐射防护剂量限值

8.2.3 放射病

8.3 出生前照射的危险

8.3.1 胚胎的致死效应

8.3.2 畸形和脑发育异常

8.3.3 严重智力迟钝和智商下降

8.3.4 出生前照射的危险与剂量限值

参考文献

DETERMINISTIC EFFECTS(DE)AND RISK OF PRENATAL EXPOSURE (282)

General principle of DE (282)

Concept of DE and cell survivor
curve (282)

Factors influencing DE (284)

Threshold and dose limit of DE (286)

Effects in organs and tissues (286)

Dose limit of DE (292)

Radiation sickness (294)

Risk of prenatal exposure (297)

Lethal effect of embryo (297)

Malformation of brain (297)

Mental retardation and decrease of IQ (298)

Risk and dose limit of prenatal exposure (300)

References (301)

第9章 辐射危害综合评价 与辐射防护剂量限值

9.1 辐射防护的危害概念与危害定量

COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF DETRIMENT AND DOSE LIMIT (302)

Detriment; concepts and
quantification (302)

9.1.1 辐射防护及其概念体系	Radiation protection concept framework	(302)
9.1.2 辐射防护的原则	Principles of radiation protection	(303)
9.1.3 危害的概念与危害的定量	Cost of detriment and quantification of detriment	(304)
9.1.4 主观危害代价与扩展的代价 利益分析	Subjective cost and extended cost-benefit analysis	(305)
9.1.5 健康状态的定量与健康指数	Quantification of health status and health index	(306)
9.1.6 危险量级与危险感知	Risk scale and risk perception	(307)
9.2 辐射危害的多属性分析 与个人剂量限值	Multiaattributes analysis of risk and dose limit	(310)
9.2.1 辐射防护剂量限值的历史	History of dose limit of protection	(311)
9.2.2 辐射危险及其可接受水平	Acceptable level of radiation risk	(312)
9.2.3 照射后的危险增加	Risk increment after radiation	(313)
9.2.4 选择剂量限值的多属性分析方法	Multiaattributes analysis and dose limit	(318)
9.2.5 ICRP 的辐射防护个人剂量限值	Individual dose limit of ICRP	(320)
9.2.6 氡及氡子体的职业性照射剂量 限值	Dose limit of radon and its decay products	(323)
9.2.7 辐射防护限值与化学致癌物 防护限值的比较	Comaprison of protection limit for radiation and chemical carcinogens	(325)
9.3 损害指数的概念与应用	Harm index; concept and application	(327)
9.3.1 职业性损伤和职业病	Occupational injuries and diseases	(327)
9.3.2 辐射照射的影响与时间损失	Effect and life lost of exposure	(329)
9.3.3 职业性照射与其它 职业危害的比较	Comparison between radiation and other occupational detriment	(331)
参考文献	References	(333)

第1章 绪论

1.1 电离辐射和辐射危害

辐射(radiation)在本书中是电离辐射(ionizing radiation)的简称,电离辐射是能引起物质电离的带电粒子或不带电粒子构成的辐射。具有一定能量的带电粒子例如 α 和 β 粒子可以与原子中的电子直接碰撞后将其击出,形成一个离子对,称为直接电离。不带电粒子例如 γ 射线、X射线和中子引起的电离是它们与物质相互作用后产生的次级带电粒子引起的,称为次级电离。机体受到各种电离辐射的作用称为辐射照射(radiation exposure),或简称照射(exposure)。人类受到的照射可以来自体外,称为外照射;也可来自进入体内的放射性核素,称为内照射。

各种辐射照射对人类的健康危害是在人类不断利用各种电离辐射源的过程中被认识的。1895年伦琴发现X射线。时过一年Stone—Scott就报告操作人员手部皮肤损伤共96例。后来发现它不但可以引起皮肤溃疡还可最后导致皮肤癌。与此同时,贝可勒尔发现天然放射性,其后不久居里夫人发现镭,她因手持含镭容器使自己的手指受到烧伤。镭用于发光涂料之后,一些表盘涂镭的女工死于骨恶性肿瘤。第二次大战末期原子能被用于战争,结果造成空前的核灾难,原子弹爆炸(简称原爆)引起的癌症病例至今仍在陆续出现。为制造原子弹而采铀的一些美国、德国、捷克等国家的矿工由于受到矿井下氡子体的作用死于肺癌。今天,随着辐射源和核能的广泛和平利用在给人类带来莫大利益的同时,也使人类接触各种射线的机会明显增加。其中包括在从事某种职业的过程中受到的职业性照射,因接受医学诊断和治疗而受到的医学照射,以及一般居民从所有其它辐射源受到的公众照射。因此,人类应该在最大限度利用电离辐射源和核能的同时加强辐射防护,尽量避免和减少电离辐射可能引起的健康危害。

人类接受辐射照射后出现的健康危害来源于各种射线通过电离作用引起组织细胞中原子及由原子构成的分子的变化。这些变化也是原子激发的结果。电离和激发主要通过对DNA分子的作用使细胞受到损伤,导致各种健康危害。危害的性质和程度因辐射的物理学特性和机体的生物学背景而有所不同。它可以是发生在受照者本人的躯体性效应(somatic effect),也可以是因生殖细胞受到照射引起发生在受照者后裔的遗传性效应(hereditary effect);可以是超过一定水平照射后必然出现的必然性效应(deterministic effect),也可以是受照水平虽低也不能完全避免的随机性效应(stochastic effect)。人们关心辐射照射引起的健康危害,希望知道多大水平的何种照射会产生多大程度的何种效应,以便考虑在不得利用和接触各种辐射源的情况下需要在防护上付出多大代价,使这些效应降低到什么水平才是可以被接受的。同时也希望知道假如已经发生某种健康危害,如何判断它是否或有多大可能性来源于既往受到的照射。为了上述这些目的,应该对不同照射引起的不同效应的危险在定性的基础上进行定量估计,这被称为危险估计(risk estimation)。危险估计常指对有害效应发生概率的估算。危害(detriment)和评价(assessment)的含义经常比危险和估计(或估算)的含义更广泛。本书把辐射危害评价看成是对辐射引起的各种危险的所有属性所做的综合定量评价。不过,国外更通用的称呼仍旧是危险评价(risk assessment)。

辐射危害评价是放射医学研究中的一个新领域。放射医学研究辐射照射引起的健康影响及辐射损害防治的原理与手段。放射医学研究的对象随着人类对射线和核能应用的发展而有所变迁。早年放射医学主要研究射线临床应用引起的局部放射损伤和肿瘤放射治疗的生物学原理,这时的放射医学实际是医学放射生物学,这是放射医学发展的第1阶段。二次大战末期核能被用于战争,这使原子弹爆炸高剂量全身性照射引起的必然性效应即急性放射病受到人们的更大注意。这时的放射医学被称为原子医学,这是放射医学发展的第2阶段。50年代中期之后核大国相继进行大当量大气层核试验,核试验落下灰环境污染引起的长期低剂量照射成为重要问题。社会和公众还关心辐射源和核能广泛应用后出现的低剂量照射。从此,人们对辐射健康危害的研究更大程度上从高剂量照射向低剂量照射扩展,从近期效应向远期效应扩展,从必然性效应向随机性效应扩展,从个体分析向群体分析扩展,从定性评价向定量评价扩展,通过辐射健康危害的定量评价,为制定辐射防护剂量限值提供医学证据。这是放射医学发展的第3个阶段,这个阶段的特点是放射医学与辐射防护科学之间的更密切的结合。放射医学发展的上述三个阶段并不是相继取代而是相互补充。医学放射生物学、必然性效应和急性放射病至今仍然是放射医学研究的重点。

1.2 辐射危害评价的目的、任务与发展

放射医学研究的这个新领域——辐射危害评价,以辐射剂量学、放射生物学、辐射流行病学和生物统计学为基础,并与一般预防医学、职业医学、环境医学、毒理学、肿瘤学、遗传学的发展保持密切联系。其任务是收集来自实验研究特别是人类实际观察获得的有关资料,对不同剂量水平和不同照射方式的各种辐射照射在不同个体与群体中引起的不同类别和不同程度的健康危害进行分析,建立辐射-效应相关的定量估计模式;确定单位剂量照射产生的危险即危险系数;通过所建立的危险模式和危险系数对受照群体已经发生的或将会发生的危害进行评价和预测;对受照个人发生的健康效应进行辐射病因判断;根据一定水平照射可能产生的后果,结合代价利益分析,危险比较分析和危险感知等社会判断,为建立辐射防护剂量限值和规章管理提供医学判断的基础。图1 可供了解辐射危害评价的框架结构及其在辐射防护和放射医学中的地位。

辐射防护的重点是对职业和环境照射的防护,它们是卫生学的一个部分。辐射危害评价大体上相当于一般卫生学中的管理毒理学(regulatory toxicology)。管理毒理学研究职业与环境有害因素所致人群健康危害的评价、控制和管理,为这些有害因素的暴露限值及卫生标准的制定,某一社会实践的代价-利益分析与决策选择,以及职业和环境有关疾病原因的判断提供医学证据。管理毒理学包括危险评价(risk assessment)和危险管理(risk management)两个部分。危险评价首先是定性的,然后进入定量的,给出一定暴露水平下的危险即危险度。通过危险评价获得的危险度是建立暴露限值和实行危险管理的基础。

电离辐射的危害评价是在比它更悠久的一般卫生学评价的基础上发展起来的。不过应该看到,电离辐射是人类受到的各种环境与职业有害因素中最容易定量的一种,近年开展的电离辐射危害定量评价的研究比对其任何有害因素的研究都更深入,因此辐射防护和辐射危害评价研究的成果及其思维体系对一般卫生学和管理毒理学领域中非放射性有害因素的危险评价与危险管理将会提供有益的借鉴。

像管理毒理学中的危险评价一样,对辐射危害的评价与对辐射危害的管理密切相关。这决定辐射危害评价作为一门科学是从辐射效应研究与辐射防护管理这两个不同的渠道发展起来并联系到一起的。

辐射危害评价发展的第一个渠道是辐射生物效应研究,其重要里程碑是1955年成立联合国原子辐射效应科学委员会(UNSCEAR)。UNSCEAR 的成立主要针对当时的核试验,要求对其可能造成的人类健康危害进行定量评价。UNSCEAR 曾经因其为起草部分停止核试验条约提供辐射危害评价资料而受到联合国的赞誉。UNSCEAR 从1958年起每隔2~3年发表一份技术报告,对人类从不同来源接受的照射和照射引起的各种效

应进行评述。1972年后的历次报告和科学附件都把危害评价的重点放在辐射致癌和辐射遗传效应的定量估计上。为了研究辐射照射特别是低剂量照射的危害,美国成立一个类似的组织,即美国科学院(NAS)负责的原子辐射生物效应委员会(BEAR),后改称电离辐射生物效应委员会(BEIR)。从1972年起陆续发表 BEIR 报告,提出一系列有价值的评述和辐射危害定量估计模型。UNSCEAR 和 BEIR 报告中的辐射危害评述都主要利用日本广岛、长崎原子弹伤害委员会(ABCC)亦即1975年后改称的放射线影响研究所(RERF)对原爆幸存者所做的长期系统观察结果。这些结果以 RERF 技术报告形式不断公开发表,并被世界各地进行的辐射危害评价研究所利用。

辐射危害评价发展的另一个渠道是国际放射防护委员会(ICRP)的工作。ICRP 的主要出版物是以辐射危害评价、防护剂量限值和辐射防护管理为核心的放射防护建议书。ICRP 致力于把放射防护建立在对辐射生物效应正确评价的基础上。ICRP 于1958年发表其第一个建议书,迄今做过4次修订。1977年建议书即其第26号出版物(ICRP-26)是制定我国1984年放射卫生防护基本标准(GB 4792-84)和1988年辐射防护规定(GB 8703-88)的基本依据。1991年

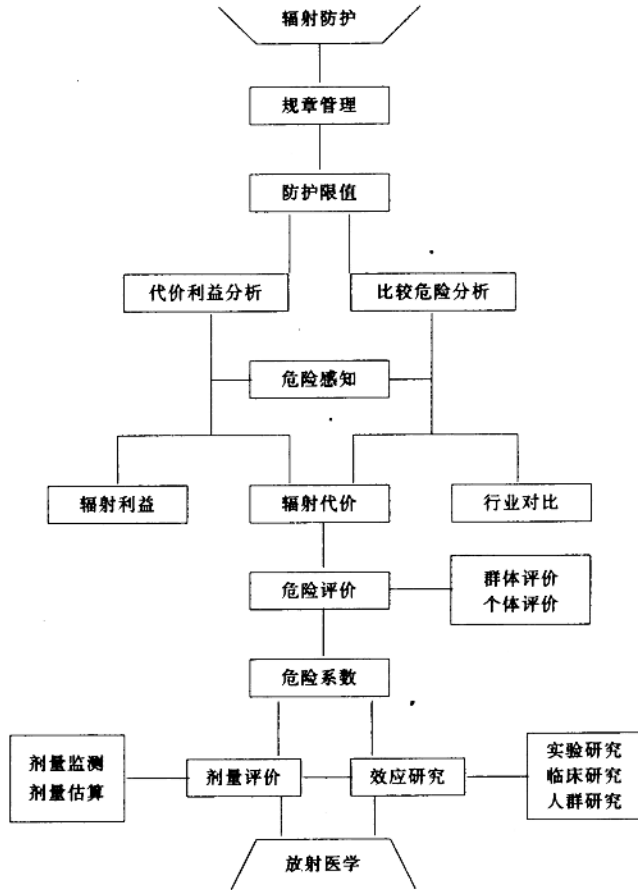


图1-1 辐射危害评价的概念体系

ICRP 发表了取代第26号出版物的新建议书,即 ICRP 第60号出版物。ICRP-60 引用了 UNSCEAR (1988)和 BEIR V(1990)关于辐射效应研究的最新评述,并对辐射危害的定量估计作出很多创新与发展。

与 ICRP 相类似的组织有美国辐射防护与测量国家委员会(NCRP)。NCRP 的系列报告对辐射剂量及辐射危害领域内有关专题的当代进展进行系统评述。不久前 NCRP 发表“辐射防护的危险估计”[NCRP-115, 1993],对 UNSCEAR 1988和 BEIR V 的有关内容进行汇总,作为 NCRP 提出“电离辐射照射的限制”[NCRP-116, 1993]的基础,其所提出的危险系数与 ICRP-60基本一致。ICRP 和 NCRP 的工作都与国际辐射单位与测量委员会(ICRU)有密切关系。辐射危害评价来源于对辐射剂量的正确评价。ICRU 的系列报告为辐射危害评价提供剂量学基础。辐射危害研究的上述发展背景决定了在编写本书过程中将着重参考 UNSCEAR, BEIR, RERF, ICRP, NCRP 和 ICRU 报告中的有关内容,特别是不久前发表的 ICRP-60 (1991)及其附件,以及附件中引用的某些原始文献。因为 ICRP 的这个新建议书精辟地总结、概括和发展了辐射危害评价的当代最新成就。

我国放射医学与防护的研究是在50年代末期建立和发展起来的。与国际上的发展过程相类似,最初把主要力量放在高剂量照射引起的急性放射损伤和放射病。从70年代末期开始,人群照射的剂量评价与健康危害评价受到越来越大的重视,相继开展了关于高本底地区居民和核试验下风向居民的公众照射,X线工作者、铀及有色金属矿山矿工、核工厂作业人员的职业性照射以及广大居民的医疗照射的健康危害评价的研究,在引用国外当代研究技术与评价模型的基础上,结合我国实际情况与现实需要,做出了自己的贡献。本书特别注意收集和引用国内报告的评价辐射危害的方法、结果与经验,以期有助于国内辐射危害评价的研究。

1.3 辐射危害评价的内容

辐射危害评价的核心内容是不同剂量水平辐射照射引起的健康危害的定量估计。定量估计的基本途径是根据人类观察资料建立辐射剂量与生物效应相关分析的数学模型。因此,辐射危害评价的研究应该首先掌握辐射危害评价的剂量学基础和生物学基础。这是本书第2和第3章的内容。然后于第4章介绍辐射遗传效应的危险评价。遗传学现象是理解辐射致癌效应的重要基础,所以放在致癌效应之前。辐射遗传和辐射致癌都属于随机性效应,是辐射危害定量评价的重点,其中辐射致癌是目前唯一得到确认的人类低剂量照射健康效应,内容较多,故分为3章。第5章为评价模型,第6章为人类辐射致癌效应,第7章为辐射致癌病因概率。接着介绍必然性效应的定量估计即第8章,其中包括出生前照射的健康影响。在对辐射可能引起的各种健康效应进行单一分析的基础上,需要对辐射合计危害进行多属性综合分析,以便为辐射防护剂量限值的确定提供综合证据,为职业性照射危害的行业间对比提供统一的定量指标,这是本书最后一章即第9章的内容。

辐射危害评价是放射医学与辐射防护研究中相当活跃的领域。过去30年特别是近10年的发展历史表明,一些概念、数据和结论因资料的积累和观念的更新而不断变化。不断涌现的大量文献和报道令人应接不暇。正如 UNSCEAR 1988年报告所述,在各种报告的数量和难度日益增大的情况下,读者遇到的困惑是不知如何把它们与既往的一个个报告相联系,从中理清不同观点产生与变迁的脉络。有鉴于此,本书希望能在各种概念与结论的发展变化与相互衔

接中向生物医学与辐射防护专业的读者介绍他们关心的并且都能理解的辐射危害评价的进展与现状。为了方便读者查证,文中标注重要内容的来源和详细出处。

人们的认识是不断发展的。1977年ICRP曾经发表其第26号出版物,取代原来的第9号出版物(1966)。结果导致ICRP在其后十多年中发表一系列出版物,以ICRP-26为基础,对辐射剂量与辐射危害评价中的有关专题进行评述、解释、补充和扩展。新建议书ICRP-60(1991)发表以后,又将根据新的概念、方法和参数对某些原来的ICRP出版物进行修订,并编写新的有关出版物作为新建议书的补充。本书力图收集为理解ICRP新建议书的辐射危害评价所需要的背景资料,特别是UNSCEAR(1988,1993,1994)报告和BEIR V(1990)报告,以及后来陆续发表的截至1995年定稿之前的重要文献报道。显然,即使本书能把当前可以得到的资料概括进去,还没有等到出版某些内容又会变得陈旧。因此本书只能向读者提供一个以当前认识为基础的关于辐射危害评价的框架。为了说明这个框架所利用的一些具体资料会随着时间的推移比框架本身更快被更新。

第2章 辐射危害评价的剂量学基础

2.1 电离辐射的量

为了对电离辐射引起的健康危害进行评价,建立辐射照射与健康危害相关的定量表达模型,首先要了解电离辐射的量。其中包括:描述辐射场使用的照射量和比释动能;受照对象接受的辐射吸收剂量;对不同类型辐射和不同受照组织或器官的吸收剂量进行加权的当量剂量和有效剂量;为满足某些特殊需要而建立的待积剂量、集体剂量、剂量负担和人均剂量;环境监测和个人监测使用的量;此外还要介绍为评价辐射危害所需要了解的外照射和内照射的剂量估算的基本原理。在讨论了这些剂量学概念的基础上,最后介绍人类接受的各种辐射照射的水平,它是评价人类各种辐射照射健康危害的基础。

2.1.1 照射量、比释动能和吸收剂量

照射量

照射量(exposure)是描述 X 和 γ 射线辐射场的量。辐射场是辐射源产生的存在电离辐射的空间。X 和 γ 射线的光子不带电,其所引起的电离来自一定能量光子与物质相互作用后产生的次级电子。因此测量 X 和 γ 射线照射量的最简单方法是测量光子与空气相互作用而释出的次级电子使空气电离后产生的离子的电荷量。照射量(X)的定义是 dQ 除以 dm 而得的商,即

$$X = dQ/dm \quad (2-1)$$

式中 dQ 是光子在质量为 dm 的空气中释出的全部电子完全被空气阻止时在空气中产生任何一种符号离子总电荷的绝对值。

照射量的国际单位(SI)用每千克空气中的电荷量库仑表示,即 $C \cdot kg^{-1}$ 。照射量的专用单位是 R(伦琴)。R 的定义是1937年提出的:在1伦琴 X 射线照射下,0.001293 g 空气中(标准状态下 $1 cm^3$ 空气的质量)释出的次级电子产生电量各为1静电单位的正离子或负离子。由于1静电单位为 $0.333 \times 10^{-9} C$,故

$$\begin{aligned} 1 R &= (0.333 \times 10^{-9} C / 0.001293 g) \times 10^3 \\ &= 2.58 \times 10^{-4} C \cdot kg^{-1} \end{aligned} \quad (2-2)$$

$$\text{或 } 1 C \cdot kg^{-1} = 3.877 \times 10^3 R \quad (2-3)$$

伦琴单位使用历史悠久,一度被误称为剂量和照射剂量。由于它不是受照物质吸收的能量,故改称为照射量。作为描述辐射场它只适用于空气,而且只能用于度量10 keV~3 MeV 能量范围的 X 或 γ 射线。

比释动能和能量注量

不带电电离粒子(如 X 和 γ 射线,中子)的能量授与物质的过程包括两个阶段。第一阶段是不带电粒子与物质相互作用,把能量授与释出的次级带电粒子;第二阶段是所产生的次级带电粒子通过电离和激发把从不带电粒子那里得到的能量授与物质。第一阶段的结果可以用比释动能表示,第二阶段的结果用吸收剂量表示。