

供五年制放射医学专业、七年制临床医学专业(放射医学方向)用

高等院校放射医学专业系列教材

放射卫生学

姜德智 主 编
朱昌寿 审 校



苏州大学出版社

高等院校放射医学专业系列教材

供五年制放射医学专业、七年制临床医学专业(放射医学方向)用

放射卫生学

主 编：姜德智

审 校：朱昌寿

编写者：姜德智 涂 彧 刘 犁

苏州大学出版社

内 容 简 介

本书是供高等学校放射医学专业及核医学专业方向本科教学用的教材。内容包括作用于人体的电离辐射源、医疗照射中对职业照射工作人员和对患者的防护、工业辐照装置及其安全与防护、发电用压水反应堆及其安全与防护、辐射监测、放射性废物的安全管理、职业照射工作人员的健康管理、核武器和辐射布放器袭击的防护。书中引入了近 10 年来国内外放射防护的新概念,系统地阐述了放射卫生学的基本理论、基本知识和基本技能,内容丰富,深入浅出,重点突出,实用性强,有可读性。

本书亦可供放射卫生防护工作人员和医疗照射职业工作人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

放射卫生学/姜德智主编. —苏州:苏州大学出版社,
2004. 5
高等院校放射医学专业系列教材 供五年制放射医学
专业、七年制临床医学专业(放射医学方向)用
ISBN 7-81090-252-0

I. 放… II. 姜… III. 放射卫生学 IV. R14

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 014840 号

放射卫生学

姜德智 主编

责任编辑 倪 青

苏州大学出版社出版发行

(地址:苏州市干将东路 200 号 邮编:215021)

常熟高专印刷厂印装

(地址:常熟市元和路 98 号 邮编:215500)

开本 787×1092 1/16 印张 24.5 字数 565 千

2004 年 5 月第 1 版 2004 年 5 月第 1 次印刷

ISBN 7-81090-252-0/R·6(课) 定价:39.00 元

苏州大学版图书若有印装错误,本社负责调换
苏州大学出版社营销部 电话:0512-67258835

前 言

放射卫生学是预防医学的分支。随着核科学的发展和核技术的进步,放射卫生学逐渐发展成为一门独立的学科,成为放射医学专业和核医学专业方向本科生课程群的主干课程之一。放射卫生学是研究保护人类免受或少受电离辐射危害的应用性学科。学习放射卫生学须具备某些基础医学、临床医学和公共卫生学等相关学科的基本知识,应具备放射物理学、电离辐射剂量学、放射化学、放射毒理学、放射生物学和辐射损伤等学科的基本知识,并熟识国家的相关法规和标准,以及国际上与放射防护相关的新概念和防护标准的进展及动态。

由于教学的需要,在学校和学院两级领导的关怀和支持下,我们编写了这本《放射卫生学》教材。本教材是以原子能出版社 1995 年出版的、由刘克良和姜德智编写的《放射损伤与防护》教材中的防护篇为基础,经过认真修改和补充而写成的。全书共 14 章,其中第一至第五章、第九至第十一章、第十二章中的第一、二节和第十四章由姜德智编写;第六至第八章和第十三章由涂彧编写;第十二章中的第三、四节由刘犁编写。本书由中国疾病预防控制中心辐射防护与核安全医学所的朱昌寿教授审校。

在编写过程中,我们充分注意到对基本理论、基本知识和基本技能的阐述,并引用了近 10 年来国内外与放射防护相关的新内容和进展情况,力求内容系统,深入浅出,重点突出,具实用性和可读性。

在本书文稿的打印和准备过程中,硕士研究生徐国千等同志给予了很大的帮助,在此谨致衷心感谢。限于编写能力和水平,加上编写和出版时间仓促,书中难免有疏漏和不妥之处,诚恳地希望读者批评和指正。

编 者

2003 年 11 月于苏州大学

目 录

第一章 作用于人体的电离辐射源

第一节 天然辐射源	(1)
一、宇宙辐射	(1)
二、陆地辐射	(5)
三、人类活动给公众增加的天然辐射照射	(21)
第二节 人工辐射源	(22)
一、人工辐射源对公众产生的照射剂量	(22)
二、人工辐射源对职业人员产生的照射剂量	(27)

第二章 放射防护的目的和应遵守的三项原则

第一节 放射防护的依据和目的	(28)
一、放射防护的生物学依据	(28)
二、放射防护的目的	(34)
第二节 放射防护应遵守的三项基本原则	(35)
一、实践正当化	(35)
二、放射防护最优化	(35)
三、个人剂量限值	(35)
第三节 放射防护三原则的应用	(36)
一、最优化的过程、方法和计划实施方案	(36)
二、放射防护三原则在医疗照射中的应用实例	(38)

第三章 放射防护标准

第一节 防护标准演变的历史回顾	(40)
一、国际防护标准的历史演变	(40)
二、我国放射防护标准的发展历程	(42)
三、与放射防护相关的几个重要国际机构	(43)
第二节 我国现行的放射防护标准	(43)
一、行为准则	(44)
二、剂量限值	(48)
三、辐射实践的豁免准则及豁免水平	(52)

第四章 辐射源的外照射防护

第一节 密封源的种类及其泄漏检验	(55)
------------------	------

一、密封源的种类	(55)
二、密封源的泄漏检验	(57)
第二节 密封源在医疗照射中的应用	(59)
一、近距离治疗用的密封源	(59)
二、远距离治疗用的密封源	(61)
第三节 医疗照射中应用的辐照装置	(62)
一、医用放射诊断装置	(62)
二、医用放射治疗装置	(67)
三、临床放射职业人员的年受照射剂量分布	(75)
第四节 医用照射源外照射的防护措施	(76)
一、工作场所的区域划分	(76)
二、减少医用照射源对人体外照射剂量的三项措施	(76)
三、屏蔽防护的原理	(78)
四、辐射源外照射剂量率的估算	(82)
五、屏蔽体厚度的估算	(84)
第五节 医用放射源易发事故及其预防对策	(91)
一、易发事故及其发生率	(91)
二、事故原因分析	(92)
三、事故预防对策	(92)
第六节 航天飞行时的辐射防护	(93)
一、宇宙辐射防护的特点	(93)
二、宇宙空间的主要辐射危险源	(94)
三、航天飞行的辐射安全	(97)

第五章 非密封源的内照射防护

第一节 操作非密封源场所的辐射危险	(99)
一、非密封源外照射	(99)
二、表面放射性物质污染	(100)
三、工作场所受到的空气污染	(101)
第二节 放射性核素进入人体的途径及其在体内的行为	(101)
一、放射性核素进入人体的途径	(101)
二、放射性气溶胶粒子在呼吸道内的沉积规律	(102)
第三节 操作非密封源时的综合防护措施	(104)
一、熟识常用放射性核素的毒性	(104)
二、工作场所的分级	(106)
三、工作场所的区域划分	(107)
四、工作场所建筑设计应符合的防护要求	(108)
五、非密封源包容和工作场所的通风换气	(109)
六、妥善收集和贮存放射性废物	(109)
七、安全稳妥地贮运放射源	(111)

八、注意个人防护	(111)
九、非密封源易发事故及其防护对策	(113)
十、去除表面放射性污染物	(113)

第六章 核医学诊断和治疗中对患者的防护

第一节 患者防护中应遵循的基本原则	(119)
一、核医学诊断检查的正当化	(119)
二、核医学诊断检查的最优化	(119)
三、给予患者放射性核素的活度控制	(120)
第二节 核医学诊断中患者的受照剂量	(122)
一、医疗保健水平的等级划分	(122)
二、核医学诊断检查频次	(123)
三、核医学诊断检查患者的年龄和性别构成	(123)
四、各项常规核医学检查致患者的有效剂量	(123)
五、PET 显像致患者的有效剂量	(124)
六、儿童核医学显像时典型的有效剂量	(125)
第三节 核医学诊断中对患者的防护	(126)
一、医生和物理技术人员的职责	(126)
二、核药物选择及检查程序监督	(127)
三、减少患者体内的辐射吸收剂量	(127)
四、对育龄妇女的防护	(127)
五、对孕妇的防护	(127)
六、对授乳期妇女的防护	(128)
七、对患者家属或陪护人员的防护	(128)
八、对儿童的防护	(129)
九、杜绝给药失误	(129)
第四节 核医学治疗中对患者的防护	(129)
一、治疗性核药物的选用	(129)
二、核药物治疗用药的活度	(132)
三、核医学治疗中的防护要求	(133)
四、核医学治疗中对患者的防护应考虑的几个问题	(134)
五、核医学治疗中对患者家属和同室患者的防护	(135)
六、治疗给药失误的应急处理原则	(136)
七、正确认识治疗性的远期效应	(136)
第五节 核医学诊断和治疗中的质量保证和质量控制	(137)
一、定义与目的	(137)
二、核医学仪器的质量控制	(138)
三、放射性药物的质量控制	(141)
四、文件证明和记录的保存	(143)

第七章 医用 X 射线诊断中对患者的防护

第一节 对患者防护应遵循的基本原则	(144)
一、X 射线诊断检查的正当化	(144)
二、X 射线诊断检查的最优化	(145)
三、约束患者的受照剂量	(145)
第二节 X 射线诊断检查频次和患者的受照剂量	(147)
一、X 射线诊断检查频次	(147)
二、X 射线诊断检查致患者的有效剂量	(148)
第三节 诊断检查中对患者的防护	(151)
一、医生的职责	(151)
二、保证 X 射线发生器的基本条件	(152)
三、减少患者受照剂量的基本措施	(153)
第四节 诊断检查中的质量保证	(159)
一、验收检验	(159)
二、医用 X 射线诊断设备的质量控制指标和评价	(159)
三、医用 X 射线诊断质量保证的防护意义	(163)
四、人员培训和组织建设是质量保证的前提	(164)

第八章 放射治疗中对患者的防护

第一节 对患者防护应遵循的基本原则	(166)
一、放射治疗正当化	(166)
二、放射治疗最优化	(166)
三、合适的处方剂量	(167)
第二节 治疗频次及靶外器官的受照剂量	(168)
一、治疗频次	(168)
二、靶区以外的正常组织或器官的受照剂量	(169)
第三节 对患者的防护	(173)
一、远距离治疗机及辅助设备应满足的防护要求	(173)
二、近距离治疗中须考虑的防护问题	(174)
三、医生须熟识治疗性预期危险	(175)
四、靶区以外器官的屏蔽	(177)
第四节 放射治疗中的质量保证与质量控制	(177)
一、放射治疗质量保证的概念	(178)
二、放射治疗质量保证与质量控制的必要性	(179)
三、放射治疗质量保证与质量控制的内容	(181)
第五节 放射治疗工作人员资格和应具备的相关知识	(185)
一、放射肿瘤学医师	(185)
二、放射肿瘤医学物理师	(186)
三、放射治疗技术人员	(186)

四、其他工作人员	(186)
----------	-------

第九章 工业辐照装置及其安全与防护

第一节 γ 射线和电子加速器工业辐照装置的安全与防护	(188)
一、 γ 源活度和电子束能量及装置的用途	(188)
二、辐照装置的类型	(189)
三、工业用辐照装置的安全防护总目标	(192)
四、工业用辐照装置的安全防护基本原则	(193)
五、第Ⅳ类 γ 辐照装置对产品的辐照方式	(194)
六、第Ⅳ类 γ 辐照装置源的屏蔽、贮存和控制	(196)
七、第Ⅳ类 γ 辐照装置的辐射安全控制措施	(197)
八、第Ⅳ类 γ 辐照装置的建造、运行和维护	(199)
九、第Ⅳ类 γ 辐照装置的事件预见和事故处理	(201)
十、对电子加速器辐照装置的特殊安全考虑	(202)
第二节 工业 γ 射线照相源的安全与防护	(203)
一、工业 γ 射线照相及所用放射源	(203)
二、工业 γ 照相设备	(204)
三、投射式照相设备的基本结构和安全防护	(205)
四、投射式照射容器中源的泄漏检验	(207)
五、照射容器的安全存放	(207)
六、 γ 照相防护程序	(207)
七、 γ 照相中事件的应急处理	(208)
第三节 核子计源的安全与防护	(209)
一、核子计及其类型	(209)
二、核子计源的安全设备	(211)
三、核子计的辐射防护	(211)
四、核子计源的操作	(212)
五、核子计维护和源泄漏检验	(212)
六、核子计的贮存和清点	(213)
七、工作人员的防护	(213)
八、核子计事件的应急处理	(213)
第四节 辐照装置及源退役	(214)
一、大、中型 γ 辐照装置及源退役	(214)
二、 γ 照相设备的源和核子计及其源退役	(214)

第十章 核反应堆的安全与防护

第一节 核反应堆的用途和类型	(215)
一、核反应堆的用途	(215)
二、核反应堆的类型	(215)
第二节 核反应堆内中子物理的基本概念及堆芯的物理设计原则	(216)

一、核反应堆内中子物理的基本概念	(216)
二、堆芯物理设计原则	(217)
第三节 发电反应堆类型及其主要系统和堆芯构成	(218)
一、发电反应堆类型	(218)
二、压水反应堆的两个主要系统	(218)
三、压水反应堆堆芯的基本构成	(220)
第四节 压水反应堆的辐射来源分析	(220)
一、堆芯的核辐射来源	(220)
二、堆芯以外的核辐射来源	(221)
第五节 压水反应堆的辐射安全与防护措施	(221)
一、核反应堆的自屏蔽设施	(221)
二、降低载热剂系统的 γ 辐射水平	(222)
三、降低检修人员的受照剂量	(222)
四、工作场所的分区管理	(222)
五、反应堆厂房的通风换气	(223)
六、运行人员的资格	(223)
七、运行人员受照剂量的控制	(223)
八、废水净化和固体废物处理	(224)
九、公众成员受照剂量的控制	(225)
十、辐射监测	(225)

第十一章 放射性废物的安全管理

第一节 放射性废物及其分类和特性鉴定	(227)
一、放射性废物	(227)
二、放射性废物的分类	(227)
三、放射性废物特性鉴定的目标和要求	(229)
第二节 放射性废物管理的总目标和基本原则	(229)
一、放射性废物管理的总目标	(230)
二、放射性废物管理的基本原则	(230)
第三节 放射性废物的预处理和处理	(230)
一、放射性废物的预处理	(230)
二、放射性废物的处理	(231)
第四节 放射性废物的贮存、运输和处置	(233)
一、放射性废物的贮存	(233)
二、放射性废物的运输	(234)
三、放射性废物的处置	(234)
第五节 少量放射性同位素医学应用单位的废物收集和处理	(235)
一、低放射性气载废物的收集与处理	(235)
二、低放射性液体废物的收集与处理	(235)
三、低放射性固体废物的收集与处理	(235)

第十二章 辐射监测

第一节 个人监测	(237)
一、外照射个人累积剂量的监测	(238)
二、放射性核素体内污染的监测	(240)
三、皮肤污染的个人监测	(241)
四、个人剂量测量精度和质量保证	(242)
五、内、外照射个人剂量的评价	(242)
第二节 工作场所的监测	(243)
一、工作场所外照射剂量率的监测	(243)
二、工作场所空气污染的监测	(244)
三、工作场所表面污染的监测	(245)
第三节 核设施边界外的环境监测	(247)
一、核设施运行前的环境本底调查	(247)
二、核设施运行期间环境的常规监测	(248)
三、样品的采集、保存、管理和分析测量方法	(250)
第四节 测量方法的几个实例	(260)
一、总 α 放射性和总 β 放射性的测定方法	(260)
二、生物样品中铯-137 的放射化学分析测定方法	(263)
三、生物样品灰中锶-90 的放射化学测定方法	(265)
四、牛奶中碘-131 的分析测定方法	(268)
五、水中钾-40 的分析测定方法	(270)
六、用 BH3103A 测定环境和工作场所 γ 剂量率的方法	(271)
七、用 FJ2207 测定 α 、 β 放射性表面污染的方法	(273)
八、用 FJ-648 测氡仪测氡法	(274)
九、FJ427A1 型微机热释光剂量仪测定法	(277)

第十三章 职业照射人员的健康管理

第一节 就业前的健康检查和就业后的健康监护	(279)
一、就业前的健康检查	(279)
二、就业后的定期健康监护	(280)
三、不适于从事职业照射的健康条件和原因	(280)
四、关于职业照射工作适应性的意见	(281)
第二节 过量照射和放射病的诊断管理	(281)
一、过量照射	(281)
二、放射病的诊断管理	(281)
第三节 职业照射工作人员享受的待遇	(282)
一、保健津贴待遇	(282)
二、保健休假待遇	(282)

第十四章 核武器和辐射布放器袭击的防护

第一节 核武器及其种类和爆炸方式·····	(283)
一、核武器·····	(283)
二、核武器的种类·····	(283)
三、核武器的运载工具·····	(287)
四、核武器的爆炸方式·····	(287)
第二节 核武器爆炸产生的四种物理效应·····	(287)
一、光热辐射和冲击波效应·····	(287)
二、早期贯穿辐射和放射性沾染效应·····	(288)
第三节 核武器袭击的防护·····	(289)
一、对光热辐射、冲击波和贯穿辐射的防护·····	(289)
二、对放射性沾染的防护·····	(289)
第四节 辐射布放器及其袭击的防护·····	(290)
一、辐射布放器·····	(290)
二、贫铀辐射及其防护·····	(291)

附录

表 1 以 1990 年建议书为根据的次级限值 ·····	(292)
表 2 作为申报豁免基础的豁免水平：放射性核素的豁免活度浓度与豁免活度 ·····	(347)
表 3 X 射线摄影受检者器官的剂量转换系数 ·····	(353)
表 4 钷-90 的衰变因子和生成因子 ·····	(375)

第一章 作用于人体的电离辐射源

可以把作用于人体的电离辐射源分为天然辐射源和人工辐射源两大类。前者存在于宇宙空间和地壳物质中,后者来自人类的一些实践活动或辐射事件。天然辐射源对地球上人类的辐射照射,称为天然本底照射。由于地壳地质结构和表面土壤岩石的特性以及海拔高度、地磁纬度的差异,世界各地或一个国家不同地区的天然本底辐射水平不尽相同。以天然本底辐射水平为基线可以判断一个地区人工辐射水平的高低。

第一节 天然辐射源

天然辐射源包括来自大气层外的宇宙辐射和来自地壳物质中存在的天然放射性核素产生的陆地辐射。在天然放射性核素中有些核素的半衰期之长可以与地球的年龄相比,加上宇宙辐射连续不断地投向地球表面,所以人类无时无刻不在接受着天然辐射源的照射。受照剂量的大小受地磁纬度、海拔高度、居室条件、膳食习惯、年龄和生理代谢等诸因素的影响。住在高原地区的人接受宇宙辐射的剂量会有所增加;住在公寓楼内的居民受氡的照射要比在露天工作的人受到的照射剂量高。

一、宇宙辐射

宇宙空间存在着的许多高能粒子,被称为初级宇宙射线。初级宇宙射线进入地球大气层后与大气层中固有的原子核相互作用产生级联效应或次级反应,从而形成次级宇宙射线。初级宇宙射线与大气层中的某些原子核相互作用生成的放射性核素,称为宇生放射性核素。

(一) 初级宇宙射线的来源

初级宇宙射线来自何处,其加速能量又来自何处,目前尚不清楚。据推测,初级宇宙射线来自地球所在的银河系。通过宇宙飞船上的测量研究证实,超新星爆炸产生的冲击波可为宇宙射线的高能粒子提供加速能量。初级宇宙射线受银河系磁场调抑而继续偏转,于是成为各向同性辐射,向地球大气层的注量随时间的变化相对恒定。

银河系宇宙辐射中的高能粒子在进入地球大气层顶部时,其组成成分是核子和电子,核子占 98%,电子占 2%。在核子成分中,质子占 88%, α 粒子占 11%,剩下的是更重的原子核。这些高能粒子的能量为 $10^8 \sim 10^{20}$ eV,能量小于 10^{15} eV 的粒子能谱用幂函数 $E^{-2.7}$ 表示, E 的单位以 eV 表示。超过拐点以后的粒子能谱变为更陡的 -3 次方幂函数。能达到地面的主要是次级宇宙射线。迄今为止,在地平面测到的宇宙射线能量最大为 3.2×10^{20} eV。

宇宙粒子的另一个来源是太阳粒子辐射。众所周知,太阳是一个稳定、平衡、发光的气体

料的选用。因此,建筑物对宇宙射线的屏蔽因子只是个大概数值。UNSCEAR2000 年的报告中,确认了这个数值。

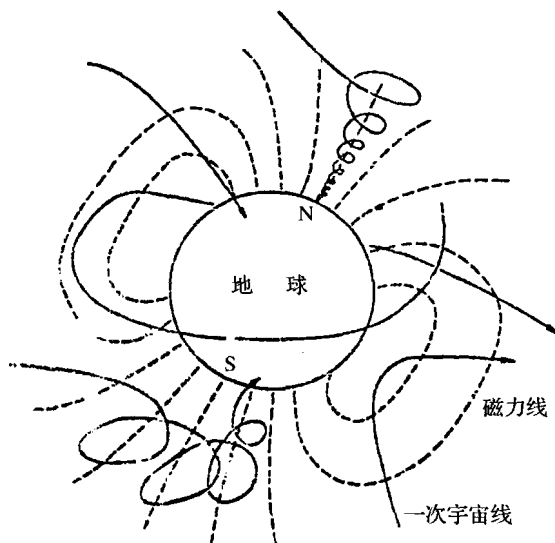


图 1.2 地磁场对宇宙线的影响

综上所述,影响宇宙射线强度和剂量率的主要因素有:海拔高度、地磁纬度和建筑物的屏蔽情况。

(二) 宇宙射线对人体产生的有效剂量

1. 在地平面产生的年有效剂量

在地平面,宇宙射线辐射场的主要源项是 μ 介子。 μ 介子的能量在 $1\sim 20$ GeV 之间。 μ 介子在地平面空气中产生的吸收剂量率占宇宙射线总成分在地面空气中产生的吸收剂量率的 80%,余下的剂量率是由 μ 介子产生的电子和 γ 光子在级联反应中产生的电子共同贡献的。早年的文献中把 μ 介子和电子这两种带电粒子分别称为宇宙射线的“硬”成分和“软”成分。因为电子容易被任何物质吸收,所以称做软成分。随着海拔高度的增高,电子成为剂量率的重要贡献者。国际上已经完成了对带电粒子和光子在不同海拔高度处和近地面处空气吸收剂量的测量工作。宇宙射线中的直接电离成分和光子成分产生的世界年平均有效剂量的估计值是 $280\ \mu\text{Sv}$ (建筑物的屏蔽因子取 0.8,室内居留因子取 0.8);对宇宙射线中的中子成分估计的年平均有效剂量为 $100\ \mu\text{Sv}$ 。这些估计值和早年的估计值(分别为 $300\ \mu\text{Sv}$ 和 $80\ \mu\text{Sv}$)相比较,稍有差别,但是它们的剂量总和($380\ \mu\text{Sv}$)没有变。全球人口的集体有效剂量大约是 2×10^6 人 $\cdot\text{Sv}$ 。这个集体剂量的 1/2 是由居住在海拔高度 0.5 km 以下、占全世界人口 2/3 的公众接受的。生活在海拔高度 3 km 以上并接近全球总人口数 2%的人,接受了 10%的集体剂量。

多年来,对海平面处宇宙射线的光子和直接电离成分产生剂量的评价方法基本没有变。以离子对生成速率($2.1\ \text{cm}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}$)为基础,转换的剂量率为 $32\ \text{nGy}\cdot\text{h}^{-1}$,假定的有效剂量是 $32\ \text{nSv}\cdot\text{h}^{-1}$ 。于是,海平面处宇宙射线的年有效剂量是 $240\ \mu\text{Sv}$ 。在此基础上,可用下列公式估算不同海拔高度处宇宙射线的剂量率:

$$\dot{E}(Z) = \dot{E}_1(0)[0.21e^{-1.649Z} + 0.79e^{0.4528Z}] \quad (1.1)$$

式中, $\dot{E}_1(0)$ 为海平面处宇宙射线的年有效剂量,取 $240\ \mu\text{Sv}$; Z 为以 km 计的海拔高度。已

知,光子和带电粒子的剂量率随地磁纬度的变化而变化,但这种变化不大,地磁赤道处的剂量率比高地磁纬度处大约低 10%。

由于缺乏对宇宙射线中的中子测量的充分数据,所以对宇宙射线中的中子成分的辐射场和其有效剂量的估算结果会有较大的不确定度。在大气中的中子注量随地磁纬度的变化可以用纬度系数 K_{ψ} 表示,即:

$$E_N(\text{纬度}) = E_N(90)K_{\psi}(\text{纬度}) \quad (1.2)$$

式中, $K_{\psi} = 1.0, 90^{\circ}; 0.8, 47^{\circ}; 0.6, 42^{\circ}; 0.4, 35^{\circ}; 0.2, 0^{\circ}$ (赤道)。

在可以居住的海拔高度处,假定中子的能谱形状是相对恒定的。中子注量与有效剂量(各向同性入射)的转换系数是:1 个中子每 cm^2 每秒将产生 $720 \text{ nSv} \cdot \text{h}^{-1}$ 的有效剂量。

2. 在飞机飞行高度的有效剂量

飞机上的乘客和机组人员受到宇宙射线照射的剂量率比人在地面上受到的剂量率大很多。一次规定的飞行中受到的剂量大小取决于所经过的地磁纬度和不同海拔高度处受宇宙射线照射的时间。然而,任何飞行路线都可能随着时间的改变而改变。因此,有两种可选用的剂量评价方法。第一种方法是,对每一次飞行都作飞行现场监测和个人受照剂量监测;第二种方法是,确定辐射场的空间和时间函数,计算出不同飞行路线的有效剂量。对于机组人员来说,其飞行时间是指从离开起点空港开始时间到降落目的空港后再回到起点空港为止的这段航行时间;受照剂量包括在地面上的受照剂量与直达巡航高度为止的不同海拔高度处的受照剂量之和。大于 1 h 的飞行,在巡航高度处的受照剂量可占总剂量的大部分。机组人员每年的飞行时间因人而异,也因航线的不同而有差别;也可能受行政管理政策的限制。一般而言,机组人员每年的飞行时间为 300~900 h,平均 500 h。普通公众乘飞机可能有 3 种情况:一种情况是不乘飞机,飞行时间为零;第二种情况是偶尔乘飞机,飞行时间可以取 3~50 h,平均 10 h;第三种情况是因公事经常乘飞机,如信使人员,每年飞行时间取 50~1200 h,平均 100 h。世界人口中的大多数人属于第一种情况。

商用亚音速飞行的巡航高度为 7~12 km。借助于在飞机上或在气球上的许多测量结果对人员受照剂量作出评价存在以下两个问题:一是,每次测量的结果是针对特定飞行路线,在特定飞行时间内完成的,不能简单地应用到其他航线和飞行时间的机组人员身上;二是,探测器只能对宇宙辐射场中特定的辐射类型响应,用什么样的标准源刻度探测器也有讲究。此外,用有效剂量评价测量结果时,需要具备不同高度处宇宙辐射场特性的基本知识,而这些知识目前尚不充分。近些年来,国际上把由不同探测器在许多航线的测量数据全部采用被称为运用量的周围剂量当量表示。

欧共体的一个工作组分别在 1974 年—1976 年间太阳活动最弱期和 1991 年太阳活动最盛期,在不同海拔高度和不同地磁纬度的航线上测量过宇宙射线剂量率,结果表明,宇宙射线剂量率与海拔高度、地磁纬度和太阳活动之间有明显的相关关系。在地磁纬度 50° 处高 LET 辐射剂量和低 LET 辐射剂量是可以比较的,剂量率在整个飞行时间内近似恒定。最近的测量结果和计算结果都表明,在温带海拔高度 9~12 km 处,宇宙射线有效剂量率的范围在 $5 \sim 8 \mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$ 之间,两种结果大体一致。从欧洲到美洲穿越大西洋的一次飞行,航班人员累积受照剂量在 $30 \sim 45 \mu\text{Sv}$ 之间。在地磁赤道处的剂量率波动在 $2 \sim 4 \mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$ 之间。

少数乘客和机组人员乘超音速飞机(例如协和式客机)在海拔 18 km 的高空旅行,在飞机内测量的结果表明,有效剂量率波动在 $10 \sim 12 \mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$ 之间。在这个结果中可能有太阳粒子事件剂量的贡献。根据对 1988 年 12 月至 1992 年 7 月间 13 次太阳粒子事件产生剂量的估

算结果表明,在 11~18 km 的海拔高度处,太阳粒子事件的剂量贡献分别是宇宙射线年有效剂量的 2% 和 7%。1958 年 2 月的太阳粒子事件期间,在 20 km 的海拔高度处,通过计算得出的太阳粒子事件剂量贡献是 $1 \text{ mSv} \cdot \text{h}^{-1}$ 。在这次太阳粒子事件中,发射出的粒子能量特别高。

(三) 宇生核素对人体产生的年有效剂量

最重要的宇生放射性核素有 4 个,它们是 ^3H 、 ^7Be 、 ^{14}C 和 ^{22}Na 。其他宇生放射性核素在剂量评价方面不受关注,因为它们产生的剂量特别小;然而它们在大气和水文系统作为示踪剂却受到人们的关注。在地球大气层的同温层上部,宇生放射性核素的产生量最多。宇宙射线中的一些能量大的中子或质子在低层大气中与大气中某些原子或分子相互作用也产生宇生放射性核素。宇生放射性核素产生量的多少因海拔高度、地磁纬度不同而有差别,也受每 11 年一个周期的太阳事件的影响,因为太阳事件对宇宙射线进入地磁场有调抑作用。

4 个重要的宇生放射性核素中, ^3H 、 ^{14}C 和 ^{22}Na 进入人体后参与生理代谢过程。宇生放射性核素是通过摄入途径进入人体的。4 个重要的宇生核素产生的年有效剂量分别是: ^3H $0.01 \mu\text{Sv} \cdot \text{a}^{-1}$, ^7Be $0.03 \mu\text{Sv} \cdot \text{a}^{-1}$, ^{14}C $12 \mu\text{Sv} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 ^{22}Na $0.15 \mu\text{Sv} \cdot \text{a}^{-1}$;总计为 $12.19 \mu\text{Sv} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

二、陆地辐射

陆地上的各种物质和生物组织及器官内都或多或少地存在着天然放射性核素。天然放射性核素统称为原生放射性核素。主要的原生核素是 ^{238}U 系和 ^{232}Th 系的放射性核素及 ^{40}K 。它们的半衰期, ^{238}U 为 $4.47 \times 10^{10} \text{ a}$, ^{232}Th 为 $1.41 \times 10^{10} \text{ a}$, ^{40}K 为 $1.28 \times 10^9 \text{ a}$ 。如此长的半衰期可以和地球的年龄相比。原生放射性核素核衰变释放出的 β 射线和 γ 射线可对人体产生外照射;而人体内存在的痕量原生放射性核素,核衰变释放出的 α 粒子、 β 粒子和 γ 射线对人体可产生内照射。当然,在陆地物质和生物组织内还有 ^{235}U 系放射性核素、 ^{87}Rb 、 ^{138}La 、 ^{147}Sm 和 ^{176}Lu 等原生放射性核素的存在;但由于这些放射性核素对人体产生的照射剂量很小,所以不对它们展开讨论。

(一) 外照射

1. 室外的外照射产生的年有效剂量

室外的外照射除了来自宇宙射线外,主要来自地表岩石土壤中存在的痕量原生放射性核素核衰变释放的 γ 射线造成的外照射。 γ 辐射水平受许多因素的影响。例如,形成土壤的岩石种类、原生核素在土壤中的活度浓度、原生核素放射平衡状态和沉积分布、土壤含水量、土壤含的有机质和地表被覆的雪层厚度等。形成土壤的岩石种类不同,土壤中原生核素的活度浓度也不同。属于火成岩的花岗岩、闪绿岩、玄武岩和橄榄岩中,以花岗岩中的 ^{40}K 、 ^{238}U 、 ^{232}Th 、 ^{226}Ra 的活度浓度最高;属于沉积岩的石灰岩、碳酸岩、砂岩和页岩中,以页岩中的原生核素的活度浓度较高,仅次于花岗岩。此外,磷酸岩中的原生核素的活度浓度也较高。土壤中存在的铀系核素中的铀组核素(从 ^{238}U 到 ^{230}Th)释放出的 γ 射线相对强度仅占铀系核素释放出的 γ 射线总强度的 2.1%,低能 γ 射线占多数;铀系中的镭组核素(从 ^{226}Ra 到 ^{210}Po)释放出的 γ 射线相对强度占铀系 γ 射线总强度的 97.9%。可见,铀系核素释放出的 γ 射线几乎全都是镭组核素(^{214}Bi 和 ^{214}Pb)核衰变释放出的。铀系核素并非总是处于放射平衡状态,可能出现偏离。由于铀和镭的化学性质不同,在氧化强烈的土壤环境中铀容易被溶解随水迁移,镭则很少被溶