

普通高等教育“十二五”规划教材

现代辐射污染与环境保护

王中琪 杨秀政 主编



化学工业出版社

普通高等教育“十二五”规划教材

现代辐射污染与环境保护

王中琪 杨秀政 主编

图书在版编目(CIP)数据

现代辐射污染与环境保护 / 王中琪, 杨秀政主编. — 北京: 化学工业出版社, 2014.11

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-122-18824-7

I. ①现… II. ①王… ②杨… III. ①辐射污染—高等学校—教材 IV. ①TL377

①化学工业出版社 ②高等教育出版社 ③清华大学出版社 ④人民邮电出版社 ⑤机械工业出版社 ⑥中国铁道出版社 ⑦中国电力出版社 ⑧中国水利水电出版社 ⑨中国轻工业出版社 ⑩中国纺织出版社 ⑪中国标准出版社 ⑫中国环境出版社 ⑬中国人口出版社 ⑭中国医药出版社 ⑮中国林业出版社 ⑯中国金融出版社 ⑰中国财政经济出版社 ⑱中国税务出版社 ⑲中国审计出版社 ⑳中国对外翻译出版公司 ㉑中国对外翻译出版公司 ㉒中国对外翻译出版公司 ㉓中国对外翻译出版公司 ㉔中国对外翻译出版公司 ㉕中国对外翻译出版公司 ㉖中国对外翻译出版公司 ㉗中国对外翻译出版公司 ㉘中国对外翻译出版公司 ㉙中国对外翻译出版公司 ㉚中国对外翻译出版公司 ㉛中国对外翻译出版公司 ㉜中国对外翻译出版公司 ㉝中国对外翻译出版公司 ㉞中国对外翻译出版公司 ㉟中国对外翻译出版公司 ㊱中国对外翻译出版公司 ㊲中国对外翻译出版公司 ㊳中国对外翻译出版公司 ㊴中国对外翻译出版公司 ㊵中国对外翻译出版公司 ㊶中国对外翻译出版公司 ㊷中国对外翻译出版公司 ㊸中国对外翻译出版公司 ㊹中国对外翻译出版公司 ㊺中国对外翻译出版公司 ㊻中国对外翻译出版公司 ㊼中国对外翻译出版公司 ㊽中国对外翻译出版公司 ㊾中国对外翻译出版公司 ㊿中国对外翻译出版公司

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第267186号

责任编辑: 王中琪

封面设计: 杨秀政

责任校对: 杨秀政

出版发行: 化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印 刷: 北京云信印刷有限公司

装 订: 11, 32开, 平装, 160页

787mm×1092mm 1/16 印张32 字数38千字 2014年8月第1版第1次印刷



化学工业出版社

· 北 京 ·

邮 政 寄 售: 010-61218288 (代 理: 010-61218288)

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有质量问题, 本社将负责调换, 本批印数: 10000册

本书在全面地介绍了环境辐射污染的基本概念、原理、技术与方法的基础上,着重阐述了辐射污染源、污染评价及污染控制技术。全书分4章,内容包括放射性辐射及其控制、电磁辐射污染及其防治、光污染及其防治、环境热辐射污染及其防治。

本书内容简明、概念清楚,而且具有系统性和新颖性,适合大专院校环境科学与工程、辐射防护与环境工程等专业作为短学时教材或参考用书,同时也为从事环境污染控制技术的研究人员和工程人员提供有益借鉴。

环境辐射污染与环境保护

主编 王中琪 杨秀政

图书在版编目(CIP)数据

现代辐射污染与环境保护/王中琪,杨秀政主编. —北京:化学工业出版社,2014.1

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-122-18954-7

I. ①现… II. ①王…②杨… III. ①辐射防护-高等学校-教材
②环境污染-污染防治-高等学校-教材 IV. ①TL7②X

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第267185号

责任编辑:满悦芝

装帧设计:尹琳琳

责任校对:徐贞珍

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印刷:北京云浩印刷有限责任公司

装订:三河市前程装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张9¼ 字数235千字 2014年2月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价: 30.00 元

版权所有 违者必究

本书编写人员名单

主 编 王中琪 杨秀政

编写人员 王中琪 杨秀政 李全伟 辛 勤 彭 宏

前 言

辐射是对人类威胁较大的环境影响因素之一，是不以人的意志为转移的客观事物，在我们赖以生存的环境中，辐射无处不在，并通过各种各样的途径进入人们的生活。辐射对于环境与人体的损伤作用，也给人们带来直接的或者潜在的危害，但由于其对环境以及人类的辐射影响的隐蔽性和长期性，通常不易引起人们的重视。为了更好的生存和发展，人类在了解和研究大气污染、水污染、土壤污染及噪声污染等对环境和人体产生的不良影响的同时，也需要加强对环境辐射污染的产生、作用、危害及防护的了解。

在很多人的概念中，辐射指的就是放射性辐射，或者电磁辐射，辐射防护也只是简单地针对放射性辐射和电磁辐射进行防护。然而辐射污染与环境防护是一门综合性的边缘学科，其内容不仅涉及环境学、电磁学、放射学，而且还包括光学及热学。“现代辐射污染与环境防护”是高等学校环境工程专业、辐射与环境保护专业新增设的一门重要的专业技术课。撰写本书的主要目的是让从事辐射污染与环境防护的学生深入了解环境中天然和人工辐射的来源、传输、水平和对策，了解各国环境辐射监测与研究的现状和发展趋势，提高学生在环境辐射监测方面的素养以及从事相关研究和工作的能力，熟练掌握环境辐射的评价技术及辐射防护最优化的应用研究技术。

本书详细地阐述了环境中与人类生活密切相关的放射性辐射、电磁辐射、光辐射、热辐射四大要素的污染及其对环境与人类的影响和防范措施。本书信息量大，内容全面，不仅包含了辐射的理论，而且图表、数据丰富，具有一定的理论价值和较强的实用性。本书的编写适应环境学和放射学学科的发展规律和人才培养的需求，本书内容深度符合两专业人才培养目标和课程教学要求，完整地表达本课程应讲授的知识，并能反映学科科学研究进展。本书适合大专院校环境科学与工程、辐射防护与环境工程等专业学生作为短学时教材使用，同时也为从事环境污染控制技术的研究人员和工程人员提供有益借鉴。

本书由王中琪、杨秀政统稿主编。各章节编写人员为西南科技大学李全伟、杨秀政（第1、2章），成都大学辛勤（第3章），四川农业大学彭宏（第4章）。

本书在编写过程中，参考了大量的从事教学、科研和生产的同行撰写的论文、讲义、书籍和手册等，为此谨向有关作者表示衷心感谢！

为本书的出版，各位编者虽然付出极大的热情，但受学识水平和时间的局限，书中不妥之处在所难免，在此恳请广大读者和专家学者不吝指正，以便修订时更正。

编者

2014年1月

目 录

第 1 章 放射性辐射及其控制	1
1.1 概述	1
1.1.1 环境中放射性的来源	1
1.1.2 辐射的生物效应及其危害	3
1.2 辐射剂量学基础	4
1.2.1 辐射剂量学的基本量和单位	5
1.2.2 辐射防护有关的量和概念	7
1.3 放射性评价与标准	9
1.3.1 放射性评价	9
1.3.2 环境放射性标准	12
1.4 放射性监测与测量仪器	14
1.4.1 放射性监测	14
1.4.2 放射性测量仪器	16
1.5 放射性废物处理技术	19
1.5.1 放射性废物的来源和分类	19
1.5.2 放射性固体废物处理技术	22
1.6 放射性污染去污技术	38
1.6.1 概述	38
1.6.2 化学去污技术	40
1.6.3 机械去污技术	43
1.6.4 其他去污新技术	46
1.7 放射性污染控制应用实例	47
1.7.1 蒸发与絮凝沉淀法处理的综合系统	47
1.7.2 生化处理、絮凝沉淀与离子交换的联合使用	48
思考题	50
第 2 章 电磁辐射污染及其防治	52
2.1 电磁场与电磁辐射概述	52
2.1.1 电磁辐射和电磁环境	52
2.1.2 电磁环境污染的确定	52
2.1.3 电磁辐射污染源的种类	53
2.1.4 电磁辐射污染的危害	54
2.1.5 电磁环境污染源的特点	55
2.2 电磁辐射的理论基础	56
2.2.1 电磁辐射的基本物理量	56
2.2.2 电磁波的辐射与传播	59
2.2.3 电磁波的基本特征	59
2.2.4 电磁辐射作用场区分类	61
2.2.5 电磁辐射场强的影响因素	62
2.3 电磁辐射的测量	63
2.3.1 环境电磁辐射测量方法	63
2.3.2 电磁辐射防护标准	64
2.3.3 环境质量评价	70
2.4 电磁辐射的安全防护与抑制	72
2.4.1 电磁辐射的防护措施	72
2.4.2 射频设备的漏场抑制	74
2.4.3 电磁辐射的屏蔽	77
2.5 电磁辐射的屏蔽与屏蔽体的设计	86
2.5.1 影响屏蔽效果的因素	86
2.5.2 注意事项	87
2.5.3 屏蔽体的设计	89
2.5.4 屏蔽室的设计	91
思考题	94
第 3 章 光污染及其防治	95
3.1 概述	95
3.1.1 光和光环境	95
3.1.2 光污染的类型及特点	97
3.1.3 光污染的危害	99
3.2 光学基础	101
3.2.1 光的基本物理量	101
3.2.2 电光源的基本技术参数	102
3.3 光污染的评价与标准	105
3.3.1 光污染的评价	105
3.3.2 光污染的标准	109
3.4 光辐射污染的防治	114
思考题	117
第 4 章 环境热辐射污染及其防治	118
4.1 热环境	118
4.1.1 热环境的热量来源	118
4.1.2 人与热环境	119
4.2 水体热污染	120
4.2.1 水体热环境评价与标准	120
4.2.2 水体热污染的来源	121
4.2.3 水体热污染的危害	122
4.3 大气热污染	123

4.3.1	大气热环境评价与标准	123
4.3.2	温室效应及全球变暖	126
4.3.3	热岛效应	131
4.4	环境热污染控制技术	135
4.4.1	水体热辐射的防治	135
4.4.2	温室效应的防治	136

4.4.3	城市热岛效应的防治	138
4.4.4	余热利用与节能	138
	思考题	145
	参考文献	146

120	 第四版热污染控制技术	120
125	 第四版热污染控制技术	125
126	 第四版热污染控制技术	126
127	 第四版热污染控制技术	127
128	 第四版热污染控制技术	128
129	 第四版热污染控制技术	129
130	 第四版热污染控制技术	130
131	 第四版热污染控制技术	131
132	 第四版热污染控制技术	132
133	 第四版热污染控制技术	133
134	 第四版热污染控制技术	134
135	 第四版热污染控制技术	135
136	 第四版热污染控制技术	136
137	 第四版热污染控制技术	137
138	 第四版热污染控制技术	138
139	 第四版热污染控制技术	139
140	 第四版热污染控制技术	140
141	 第四版热污染控制技术	141
142	 第四版热污染控制技术	142
143	 第四版热污染控制技术	143
144	 第四版热污染控制技术	144
145	 第四版热污染控制技术	145
146	 第四版热污染控制技术	146
147	 第四版热污染控制技术	147
148	 第四版热污染控制技术	148
149	 第四版热污染控制技术	149
150	 第四版热污染控制技术	150
151	 第四版热污染控制技术	151
152	 第四版热污染控制技术	152
153	 第四版热污染控制技术	153
154	 第四版热污染控制技术	154
155	 第四版热污染控制技术	155
156	 第四版热污染控制技术	156
157	 第四版热污染控制技术	157
158	 第四版热污染控制技术	158
159	 第四版热污染控制技术	159
160	 第四版热污染控制技术	160
161	 第四版热污染控制技术	161
162	 第四版热污染控制技术	162
163	 第四版热污染控制技术	163
164	 第四版热污染控制技术	164
165	 第四版热污染控制技术	165
166	 第四版热污染控制技术	166
167	 第四版热污染控制技术	167
168	 第四版热污染控制技术	168
169	 第四版热污染控制技术	169
170	 第四版热污染控制技术	170
171	 第四版热污染控制技术	171
172	 第四版热污染控制技术	172
173	 第四版热污染控制技术	173
174	 第四版热污染控制技术	174
175	 第四版热污染控制技术	175
176	 第四版热污染控制技术	176
177	 第四版热污染控制技术	177
178	 第四版热污染控制技术	178
179	 第四版热污染控制技术	179
180	 第四版热污染控制技术	180
181	 第四版热污染控制技术	181
182	 第四版热污染控制技术	182
183	 第四版热污染控制技术	183
184	 第四版热污染控制技术	184
185	 第四版热污染控制技术	185
186	 第四版热污染控制技术	186
187	 第四版热污染控制技术	187
188	 第四版热污染控制技术	188
189	 第四版热污染控制技术	189
190	 第四版热污染控制技术	190
191	 第四版热污染控制技术	191
192	 第四版热污染控制技术	192
193	 第四版热污染控制技术	193
194	 第四版热污染控制技术	194
195	 第四版热污染控制技术	195
196	 第四版热污染控制技术	196
197	 第四版热污染控制技术	197
198	 第四版热污染控制技术	198
199	 第四版热污染控制技术	199
200	 第四版热污染控制技术	200

第 1 章 放射性辐射及其控制

1.1 概述

在人类历史过程中,生活在地球上的人类每时每刻都受到天然存在的各种电离辐射的照射。事实上,辐射无处不在,食物、房屋、天空大地、山水草木乃至人们体内都存在着辐射照射,这种照射通常称为天然本底照射。从 1895 年伦琴发现 X 射线和 1898 年居里发现镭元素以后,原子能科学得到了飞速的发展,近 60 年来,由于核试验、核动力生产、医疗照射及放射性同位素的应用,又使人类受到各种人工辐射源的照射。对人类群体造成照射的各种天然及人工辐射源称为环境辐射源。

1.1.1 环境中放射性的来源

环境中放射性的来源分天然辐射源和人工辐射源。天然辐射主要来自宇宙辐射、地球和人体内的放射性物质。而对公众造成自然条件下原本不存在的辐射的这类辐射源称为人工辐射源,主要有核试验造成的全球性放射性沾染,核能生产、放射性同位素的生产和应用导致放射性物质以气载或液态的形式释放而直接进入环境,核材料贮存、运输或放射性废物处理与处置则可能造成放射性物质间接地进入环境。

1.1.1.1 天然辐射源

天然辐射源按其起因可分为宇宙辐射、陆地辐射和人体内的辐射。

(1) 宇宙射线 宇宙射线是一种从宇宙太空中辐射到地球上的射线。在地球大气层以外的宇宙射线称为初级宇宙射线。进入大气层后和空气中的原子核发生碰撞,即产生次级宇宙射线。其中部分射线的穿透本领很大,能透入深水和地下,另一部分穿透本领较小。

初级宇宙射线(主要是质子)从空间进入地球大气层后,其中的高能粒子可与空气中的氮、氧、氩等原子核发生反应,除产生 ^3H 、 ^7Be 、 ^{14}C 、 ^{22}Na 等宇生放射性核素外,还产生中子、质子、 μ 介子、 π 介子和 κ 介子等一系列次级粒子。这些粒子能量小的约为 10 电子伏特(eV),个别的可达 10^{20}eV 。由于初级宇宙射线在大气层的上部与空气中的原子核碰撞而产生次级粒子流,所以在 15km 以下的高空,初级宇宙射线已大部分转变成为次级宇宙射线。

初级宇宙射线通过各种不同的核反应,在大气层、生物圈和岩石层中产生一系列放射性核素。宇宙射线与大气层作用的结果,其通量密度在海拔 12km 处为最大。低于此高度的呈指数减少,到达海平面处的最低。就对人类照射的剂量贡献而言,主要的宇生放射性核素是 ^3H 、 ^7Be 、 ^{14}C 和 ^{22}Na ,最重要的照射途径是 ^{14}C 的食入。

(2) 陆地辐射 除宇生放射性核素之外,地壳中还存在着自地球形成以来就有的天然放射性核素,显然,这类原生放射性核素都是长寿命的,其半衰期可与地球年龄相比较。就对人的外照射剂量贡献而言,主要的原生放射性核素为 ^{40}K ($T_{1/2}=1.28\times 10^9\text{a}$), ^{232}Th ($T_{1/2}=1.41\times 10^{10}\text{a}$)和 ^{238}U ($T_{1/2}=4.47\times 10^9\text{a}$),次要的有 ^{235}U ($T_{1/2}=7.04\times 10^8\text{a}$)和 ^{87}Rb ($T_{1/2}=4.7\times 10^{10}\text{a}$)。其中 ^{238}U 及 ^{232}Th 为两个天然放射系的母体核素,其许多子体核素也会对人造成照射。

① 空气中存在的放射性 空气中的天然放射性主要是由于地壳中铀系和钍系的子代产

物氡和钍射气的扩散,其他天然放射性核素的含量甚微。这些放射性气体的子体很容易附着在气溶胶颗粒上,而形成放射性气溶胶。

② 地表水系含有的放射性 地面水系含有的放射性往往由水流类型决定。海水中含有大量的 ^{40}K ,天然泉水中则有相当数量的铀、钍和镭。水中天然放射性的浓度与水所接触的岩石、土壤中该元素的含量有关。

③ 氡 氡是一种放射性惰性气体,地球上三个原生的天然放射系中,分别存在氡的3个同位素,即 ^{222}Rn (^{238}U 系)、 ^{220}Rn (^{232}Th 系)和 ^{219}Rn (^{235}U 系)。 ^{222}Rn 的照射是人受天然辐射照射最重要的来源。一般情况下,室内空气中 ^{222}Rn 及其短寿命子体的浓度远比室外高,因此,氡及其短寿命子体对人体产生内照射剂量的主要途径是吸入并沉积在呼吸道内,由它发射的 α 粒子对气管支气管上皮基底细胞产生很大的照射剂量。

④ 矿物的开采和应用 除作为核燃料原料的含铀矿物以外,煤、石油、泥炭、天然气、地热水(或蒸汽)、磷酸盐矿物和某些矿砂中天然放射性核素的含量也比较高。

a. 煤 全世界每年开采的煤,约40%用于燃煤电厂,10%用于住宅,50%用于其他工业。煤中天然放射性核素的平均比活度 ^{40}K 为50Bq/kg, ^{238}U 为20Bq/kg, ^{232}Th 为20Bq/kg,而我国原煤中铀、钍含量较高,煤中这三种核素的平均比活度分别为104Bq/kg、36Bq/kg和30Bq/kg。

b. 磷酸盐矿物的应用 磷酸盐矿物是生产磷酸盐产品和磷肥的主要原材料,各类磷酸盐矿物中 ^{232}Th 和 ^{40}K 的比活度与土壤基本相似,沉积成因的磷酸盐矿物中 ^{238}U 的比活度高达1500Bq/kg,并与其衰变子体基本达到放射性平衡。

c. 其他 石油、天然气的大量使用,一些重矿砂的开采和选冶也会对公众造成一定的辐射照射剂量,但相关报道尚不多见。

(3) 人体内的放射性 由于大气、土壤和水中都含有一定量的放射性核素,通过人的呼吸、饮水和食入不断地把放射性核素摄入到体内,进入人体的微量放射性核素分布在全身各个器官和组织,对人体产生内照射剂量。

1.1.1.2 人工辐射源

人工辐射源的主要来源是核能生产、核武器制造及核试验、核事故、放射性同位素的生产应用、放射性废物治理和核设施退役等。

(1) 核能生产 随着社会的发展,能源愈来愈紧张,由于煤炭和石油已远不能满足社会对能源的需求,因此,核能的利用得到了飞速的发展。在正常运行的情况下,核电站对环境的污染比化石燃料燃烧要小。当然核电站排出的气体、液体和固体废物也是值得特别注意的。核能生产的主要环节有铀矿开采和水冶、 ^{235}U 的浓缩及燃料组件制造、核反应堆运行和乏燃料后处理。

(2) 核武器制造及核试验 军用放射性物质生产和核武器制造可能导致放射性核素的常规和事故释放,造成局地 and 区域性环境污染,对当地公众产生一定程度的辐射照射。核武器是利用重核裂变或轻核聚变时急剧释放出巨大能量产生杀伤和破坏作用的武器,核爆炸对环境产生放射性污染的程度与武器威力、装药中裂变材料所占的比例、爆炸方式及环境条件有关。一般来说,威力越大所含的裂变材料越多,对环境污染也越严重。地上试验比地下试验对环境的污染严重,地面爆炸比空中爆炸要污染严重。

(3) 核事故 核事故是指操作使用放射性物质的单位出现异常情况或意想不到的失控状态,引起放射性物质向环境大量的无节制的排放,造成非常严重的污染。民用和军用核设施

及核材料运输都发生过事故,其中有些事故对环境造成了严重污染,产生了相当大的公众照射剂量。

(4) 放射性同位素的生产和应用 商用及医用同位素的生产量一般很难估计,对其生产和应用过程中的释放报道也很少见。同位素的生产及其在工业、医疗、教学、科研等部门日益广泛的应用和相关的废物处置,会对公众造成一定剂量的照射。

放射性同位素辐射在医学上主要用于对癌症的诊断和治疗方面。在诊断检查过程中,每个患者所受的局部剂量差别较大,大约比通过天然辐射源所受的年平均剂量高 50 倍;而在辐射治疗中,个人所受剂量又比诊断时高出数千倍,并且通常是在几周内集中施加在人体的某一部分。密封源中的放射性一般不会被释放,但放射性药盒中的同位素、 ^{14}C 和 ^3H 最终会向环境释放,其释放总量与生产总量大致相当。

(5) 放射性废物治理和核设施退役 随着核工业发展和核技术应用,放射性废物的产生是一种必然现象。这些废物包括军用核设施遗留的放射性废物、核电厂产生的放射性废物、核燃料循环设施和核技术应用产生的放射性废物等。

核设施退役是指核设施服务期满或按规定终止生产后,有计划地采取必要措施使其永久退出现役的过程。退役的主要目标有封存监护、有限开放(部分拆除)和无限制开放(全部拆除),主要步骤是去污、拆除、废物处理及处置、环境恢复与监测等。核设施退役工程是一个涉及多领域的综合性工程,目前在世界范围仍处于探索实施阶段。

放射性废物治理和核设施退役对公众造成照射的主要途径是废物治理和退役实施过程中气态及液态流出物向环境的释放,废物处置过程中废物体所含放射性核素可能被地下水浸出而造成放射性扩散、迁移等。

1.1.2 辐射的生物效应及其危害

辐射和放射性核素的应用已有百年历史,虽然它给人类带来巨大利益,但也对人体健康造成一定程度的影响和危害。无论是来自体外的辐射照射还是来自体内的放射性核素照射,电离辐射对人体的作用都会导致不同程度的生物效应,并在以后作为辐射损伤的临床症状表现出来。

1.1.2.1 辐射的生物效应

辐射与人体相互作用会导致某些特有生物效应。效应的性质和程度主要决定于人体组织吸收的辐射能量。从生物体吸收辐射能量到生物效应的发生,乃至机体损伤或死亡,要经历许多性质不同的变化,以及机体组织、器官、系统及其相互关系的变化,过程十分复杂。

(1) 辐射对细胞的作用 核辐射与物质的相互作用的主要效应是使其原子发生电离和激发。影响辐射对细胞作用的因素很多,基本上可归纳为两个方面:一是与辐射有关的,称为物理因素;二是与机体有关的,称为生物因素。

① 细胞生物学基础 人体是由不同器官或组织构成的有机整体,构成人体的基本单元是细胞,细胞由细胞膜、细胞质和细胞核组成。细胞核含有 23 对(46 个)染色体,它是由基因构成的细小线状物。基因由脱氧核糖核酸(DNA)和蛋白质分子组成,带有决定子体细胞特性的遗传密码。细胞质分解食物并将它转化为能量和小分子,随后又转化为供细胞维持生存和繁衍所要求的复杂分子。辐射作用于人体细胞将使水分子产生电离,形成一种对染色体有害的物质,产生染色体畸变。这种损伤使细胞的结构和功能发生变化,使人体呈现出放射病、眼晶体白内障或晚发性癌等临床症状。

② 辐射与细胞作用的物理因素 主要是指辐射类型、辐射能量、吸收剂量、剂量率以

及照射方式等。

a. 辐射类型 不同类型的辐射对机体引起的生物效应不同,主要取决于辐射的电离密度和穿透能力。

b. 剂量率及分次照射 通常,在吸收剂量相同情况下,剂量率越大,生物效应越显著。同时,生物效应还与给予剂量的分次情况有关。一次大剂量急性照射与相同剂量下分次慢性照射产生的生物效应是迥然不同的。分次越多,各次照射间隔时间越长,生物效应就越小。

c. 照射部位和面积 辐射损伤与受照部位及受照面积密切相关。这是因为与各部位对应的器官对辐射的敏感性不同;另一方面,不同器官受损伤后对整个身体带来的影响也不尽相同。照射剂量相同,受照面积愈大,产生的生物效应也愈大。

d. 照射的几何条件 外照射情况下,人体的剂量分布受到入射辐射的角分布、空间分布以及辐射能谱的影响,并且还与人体受照时的姿势及其在辐射场内的取向有关。因此,不同的照射条件所造成的生物效应往往会有很大的差别。

除上述外,内照射情况下的生物效应还取决于进入体内的放射性核素的种类、数量、核素的理化性质、在体内沉积的部位以及在相关部位滞留的时间等物理因素的影响。

③ 辐射与细胞作用的生物因素 主要是指生物体对辐射的敏感性。辐射生物学研究表明,当辐射照射的各种物理因素相同时,不同的细胞、组织、器官或个体对辐射的反应有着很大的差异,这是因为不同的细胞、组织、器官或个体对辐射的敏感程度是不同的。

(2) 辐射的生物效应 电离辐射对人体辐射生物效应可分为躯体效应和遗传效应,国际放射防护委员会近来又将其分为随机效应和确定性效应(非随机效应)。

① 躯体效应 辐射的躯体效应是由于人体普通细胞受到损伤引起的,并且只影响到受照者个人本身。

② 遗传效应 遗传效应是由于生殖细胞受到损伤引起的,表现为受照者后代的身体缺陷,是一种随机效应。

1.1.2.2 辐射对人体的危害

辐射对人体的危害主要表现为受到射线过量照射而引起的急性放射病,以及因辐射导致的远期影响。由于放射性工作辐射防护的进步和发展,职业照射和广大公众所接受的照射远低于引起急性躯体效应的阈剂量水平,只有在极其特殊情况下,才有可能接受大剂量的照射。

(1) 急性放射病 急性放射性病是由大剂量的急性照射所引起,多数是由于意外的核事故、核战争造成的。按射线的作用范围,短期大剂量外照射引起的辐射损伤可分成全身性辐射损伤和局部性辐射损伤。

(2) 远期影响 辐射危害的远期影响主要是慢性放射病和长期小剂量照射对人体健康的影响,多属于随机效应。

1.2 辐射剂量学基础

各种射线在物质中运动,与物质发生相互作用,虽然最终都被物质所吸收,但它们相互作用的程度和结果都是不同的。剂量学中的量就是为了对辐射与物质相互作用产生的真实效应和潜在影响提供一种物理学上的量度。这些量的数值,既依赖于辐射场的性质,又依赖于辐射与物质相互作用的程度。

1.2.1 辐射剂量学的基本量和单位

1.2.1.1 放射性活度

放射性活度 A 是表示在单位时间内放射性原子核所发生的核转变数。其 SI 单位为贝可 (Bq), 1Bq 表示每秒钟发生一次核衰变。过去常用单位是居里 (Ci), $1\text{Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{Bq}$ 。新旧常用放射性单位对照如表 1-1 所示。

表 1-1 新旧常用放射性单位对照表

名称及符号	SI 单位		曾用单位	换算关系
	单位的名称及符号	定义		
活度 A	贝可 (Bq)	$1\text{Bq} = 1\text{s}^{-1}$	居里 (Ci)	$1\text{Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{Bq}$
照射量 X	C/kg		伦琴 (R)	$1\text{R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$
吸收剂量 D	戈瑞 (Gy)	$1\text{Gy} = 1\text{J/kg}$	拉德 (rad)	$1\text{rad} = 0.01\text{Gy}$
剂量当量 H	希沃特 (Sv)	$1\text{Sv} = 1\text{J/kg}$	雷姆 (rem)	$1\text{rem} = 0.01\text{Sv}$

1.2.1.2 照射量

(1) 照射量 照射量是一个用来表示 γ 或 X 射线在空气中产生电离能力大小的辐射量, 照射量 X 定义为 dQ 除以 dm 所得的商, 即

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

式中, X 为照射量, C/kg, 过去常用的单位是 R, $1\text{R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$; dQ 为射线在质量为 dm 的空气中释放出来的全部电子 (正电子和负电子) 被空气完全阻止时, 在空气中产生的一种符号的离子的总电荷量, C; dm 为受照空气的质量, kg。

dQ 的值是 X 或 γ 射线在质量为 dm 的空气中, 释放出来的全部电子 (正、负电子) 完全被空气阻止时, 在空气中产生一种符号的离子的总电荷的绝对值。照射量只用于量度 γ 或 X 射线在空气介质中产生的照射效能。

(2) 照射量率 照射量率 X 是 dX 除以 dt 所得的商, 即

$$X = dX/dt \quad (1-2)$$

式中, X 为照射量率, 单位是 $\text{C}/(\text{kg} \cdot \text{s})$; dX 为时间间隔 dt 照射量的增量, C/kg; dt 为时间间隔, s。

1.2.1.3 吸收剂量

(1) 吸收剂量 吸收剂量在剂量学的实际应用中是一个非常重要的量, 吸收剂量 D 是单位质量受照物质中所吸收的平均辐射能量。其定义为 $d\bar{\epsilon}$ 除以 dm 所得的商, 即

$$D = d\bar{\epsilon}/dm \quad (1-3)$$

式中, D 为吸收剂量, Gy; $d\bar{\epsilon}$ 为电离辐射授予质量为 dm 的物质的平均能量, J; dm 为受照空气的质量, kg。

吸收剂量适用于任何类型的辐射和受照物质, 并且是一个与无限小体积相联系的辐射量, 即受照物质中每一点都有特定的吸收剂量数值。因此, 在给出吸收剂量数值时, 必须指明辐射类型、介质种类和所在位置。

(2) 吸收剂量率 吸收剂量率 D 是单位时间内的吸收剂量, 定义为 dD 除以 dt 所得的商, 即

$$D = dD/dt \quad (1-4)$$

式中, D 为吸收剂量率, Sv/s; dD 为时间间隔 dt 吸收剂量的增量, Sv; dt 为时间间

隔, s。

1.2.1.4 剂量当量

相同的吸收剂量未必产生同等程度的生物效应, 因为生物效应受到辐射类型与能量、剂量与剂量率大小、照射条件及个体差异等因素的影响。为了用同一尺度表示不同类型和能量的辐射照射对人体造成的生物效应的严重程度或发生概率的大小, 辐射防护上采用了剂量当量这个辐射量。

组织内某一点的剂量当量 H 是该点的吸收剂量 D 乘以品质因数 Q 和其他修正系数 N , 具体表示为:

$$H=DQN \quad (1-5)$$

式中, H 为剂量当量, Sv; Q 为品质因数, 用它来计量剂量的微观分布对危害的影响, 国际放射防护委员会 (ICRP) 为内照射和外照射规定了都可使用的 Q 近似值, 如表 1-2 所示; D 为在该点所接受的吸收剂量, Gy; N 为 ICRP 规定的其他修正系数, 目前规定 $N=1$ 。

表 1-2 各种辐射相对应的 Q 值

辐射类型和能量范围		Q (近似值)
光子	所有能量	1
电子和介子	所有能量	1
中子	能量<10keV	5
	10~100keV	10
	100keV~2MeV	20
	2~20MeV	10
	>20MeV	5
质子(反冲质子除外)能量>2MeV		5
α 粒子, 裂变碎片, 重核		20

注: 本表摘自清华大学试用教材《辐射防护概论》, 北京: 清华大学工程物理系, 1997。

1.2.1.5 有效剂量当量

随机性效应概率与剂量当量的关系还与受照组织或器官有关, 人体受到的任何照射, 几乎总是不只涉及一个器官或组织, 为了计算受到照射的有关器官和组织带来的总的危险, 相对随机性效应而言, 在辐射防护中引进了有效剂量当量 H_E , 表示为:

$$H_E=\sum W_T H_T \quad (1-6)$$

式中, H_E 为有效剂量当量, Sv; H_T 为器官或组织 T 所接受的剂量当量, Sv; W_T 为该器官的相对危险度系数, 国家标准《辐射防护规定》(GB 8703—88) 给出的 W_T 值如表 1-3 所示。

表 1-3 器官或组织的相对危险度系数

器官或组织名称	W_T	器官或组织名称	W_T
性腺	0.25	甲状腺	0.03
乳腺	0.15	骨表面	0.03
红骨髓	0.12	其余组织(每一个) ^①	0.06
肺	0.12		

① 取其他五个在表中尚未指明的受到剂量当量最大的器官或组织, 每一个的 W_T 为 0.06。当胃肠遭受到照射时, 胃、小肠、上段大肠和下段大肠为 4 个独立的器官, 手、前臂、足、踝和眼晶体不包括在“其余组织”之内。

相对危险度系数 W_T 与器官或组织有关而与射到身体的辐射种类和能量无关, 品质因数 Q 则与辐射种类和能量有关而与接受照射的器官或组织无关; 这种简化仅仅是对真实的生物学情况的近似。 W_T 和 Q 的数值来自当前的放射生物学知识, 以后还会不时地变化。

1.2.1.6 集体剂量当量和集体有效剂量

一次大的放射性实践或放射性事故, 会涉及许多人, 因此采用集体剂量当量来定量地表示这一次放射性实践对社会总的危害, 集体剂量当量和集体有效剂量的单位是 $\text{人} \cdot \text{Sv}$ 。

(1) 集体剂量当量 集体剂量当量的定义是以各组内人均所接受的剂量当量 $\bar{H}_{Ti}$ (全身的有效剂量当量或任一器官的剂量当量) 与该组人数相乘, 然后相加即得总的剂量当量数, 即

$$S_T = \sum_i \bar{H}_{Ti} N_i \quad (1-7)$$

式中, S_T 为集体剂量当量, $\text{人} \cdot \text{Sv}$; $\bar{H}_{Ti}$ 为所考虑的群体中, 第 i 组的人群组中每个人的器官或组织 T 平均所受到的剂量当量, Sv ; N_i 为第 i 人群组的人数。

(2) 集体有效剂量 如果要求量度某一人群所受的辐射照射, 则可以计算其集体有效剂量, 即

$$S = \sum_i \bar{E}_i N_i \quad (1-8)$$

式中, S 为集体有效剂量, $\text{人} \cdot \text{Sv}$; $\bar{E}_i$ 为是第 i 组人群接受的平均有效剂量, $\text{人} \cdot \text{Sv}$; N_i 为第 i 人群组的人数。

1.2.1.7 待积剂量当量

放射性物质进入人体后, 一方面由于衰变和排泄而减少, 同时会浓集于某些器官组织中形成内照射。待积剂量当量 $H_{50,T}$ 是指单次摄入某种放射性核素后, 在 50 年期间那个组织或器官所接受的总剂量当量。

待积剂量当量是内照射剂量学非常重要的基本量。放射性核素进入体内以后, 蓄积此核素的器官称为源器官 S , 从它内部发射的放射性粒子使周围的靶器官 T 受到照射, 接受的剂量可用待积剂量当量计算, 即

$$H_{50,T} = U_S \text{SEE}(S \rightarrow T) \quad (1-9)$$

式中, $H_{50,T}$ 为待积剂量当量, Sv ; U_S 为表示源器官 S 摄入放射性核素后 50 年内发生的总衰变数; $\text{SEE}(S \rightarrow T)$ 为源器官中的放射性粒子传输给单位质量靶器官的有效能量, $(S \rightarrow T)$ 表示由源器官 S 传输给靶器官 T 。

1.2.2 辐射防护有关的量和概念

1.2.2.1 与辐射防护有关的概念

(1) 危险度和危害

① 危险度 危险度 r_i 是指某个组织或器官接受单位剂量照射后引起第 i 种有害效应的概率。ICRP 规定全身均匀受照时的危险度为 10^{-2}Sv^{-1} , 表 1-4 给出了几种辐射敏感度较高的组织诱发致死性癌症的危险度。

② 危害 危害是指有害效应的发生频数与效应的严重程度的乘积, 即

$$G = \sum h_i r_i g_i \quad (1-10)$$

式中, G 为危害; h_i 为第 i 组人群接受的平均剂量当量, Sv ; r_i 为该组发生有害效应的频数; g_i 为严重程度, 对可治愈的癌症, $g_i = 0$, 对致死癌症, $g_i = 1$ 。

(2) 关键人群组 在某一给定实践所涉及的各受照人群组中, 预期将受到最大辐射照射

表 1-4 几种对辐射敏感器官的危险度 单位: 10^{-4}Sv^{-1}

器官或组织	危险度	器官或组织	危险度
性腺	40	甲状腺	5
乳腺	25	骨	5
红骨髓	20	其余五个组织的总和	50
肺	20	总计	165

的人群组, 简称为关键组。关键人群组所受到的辐射照射是量度公众成员由于该实践所受剂量的上限。

(3) 关键照射途径 关键照射途径指某种辐射实践对人产生照射剂量的各种途径(如食入、吸入和外照射等), 其中某一种照射途径比其他途径有更为重要的意义。

(4) 关键核素 某种辐射实践可能向环境中释放几种放射性核素, 对受照人体或人体若干个器官或组织而言, 其中一种核素比其他核素有更为重要的意义时, 称该核素为关键核素。

1.2.2.2 剂量与效应的关系

根据辐射效应的发生与剂量之间的关系, 可以把辐射对人体的危害分为随机性效应和确定性效应两类。

(1) 随机效应 随机性效应是指效应的发生概率(而非其严重程度)与剂量大小有关的那些效应。由于发生随机性效应的概率非常低, 一般放射性工作人员日常所受的那种小剂量情况下, 随机性效应极少发生, 资料极其缺乏, 所以到目前为止, 在一般辐射防护所遇到的剂量水平下, 随机性效应发生的概率与剂量之间究竟是什么关系, 尚未完全肯定。

就辐射防护剂量评价目的而言, 在辐射防护通常遇到的照射条件下, 可假定随机性效应的发生概率 P 与剂量 D 之间存在着线性无阈关系, 即 $P=aD$, a 是根据观察和实验结果定出的常数。依据这个假定, 就可把一个器官或组织受到的若干次照射的剂量简单地相加在一起, 用以量度该器官或组织受到的总的辐射影响。

(2) 确定性效应 辐射的确定性效应是一种有“阈值”的效应, 受到的剂量大于阈值, 这种效应就会发生, 而且其严重程度与所受的剂量大小有关, 剂量越大后果越严重。换句话说, 引起这种效应的概率在小剂量时为零, 但在某一剂量水平(阈值)以上时则陡然上升到 1 (100%), 在阈值以上, 效应的严重程度也将随剂量增加而变得严重。具体的阈值大小与每一个个体情况有关。

1.2.2.3 剂量限制体系

为了达到辐射防护目的, ICRP 提出了辐射实践正当性、辐射防护最优化和限制个人剂量当量三项基本原则。

(1) 辐射实践正当性 在施行伴有辐射照射的任何实践之前, 必须经过正当性判断, 确认这种实践具有正当的理由, 获得的利益大于代价(包括健康损害和非健康损害的代价)。

(2) 辐射防护最优化 应该避免一切不必要的照射, 在考虑到经济和社会因素的条件下, 所有辐照都应保持在可合理达到的尽量低的水平。

(3) 个人剂量的限值 用剂量限值对个人所受的照射加以限制。

① 基本限值 个人受到由可控制的源和实践产生的辐射照射(包括内外照射), 不得超过有关权威标准中规定的剂量当量限值。分为两类: 一类适用于辐射工作人员, 另一类适用于公众成员。剂量当量限值不包括医疗照射和天然本底照射。

a. 职业照射。为了将随机性效应发生概率限制到可接受的水平, ICRP 推荐按 5 年平均, 每年 20mSv 的有效剂量限值, 同时规定这 5 年中任一年中的有效剂量不得超过 50mSv。中华人民共和国国家标准《辐射防护规定》(GB 8703—88): 为了限制随机效应, 职业工作人员的年有效剂量当量限值为 50mSv。为了防止非随机效应, 眼晶体的年剂量当量限值为 150mSv; 其他单个器官或组织的年剂量当量限值为 500mSv。

b. 公众照射。ICRP 建议公众的有效剂量年限值为 1mSv, 但在特殊情况下, 只要按 5 年平均不超过 1mSv/a, 在单独的一年里可以有较高的有效剂量。中华人民共和国国家标准《辐射防护规定》(GB 8703—88): 公众成员的年有效剂量当量不超过 1mSv。如果按终生剂量平均的年有效剂量当量不超过 1mSv, 则在某些年份里允许以每年 5mSv 作为剂量限制。公众成员的皮肤和眼晶体的年剂量当量限制为 50mSv。

② 导出限值 辐射防护监测中, 测量结果很少能直接用剂量当量来表示。但是, 可以根据基本限值, 通过一定的模式导出一个供辐射监测结果比较用的限值, 这种限值称为导出限值。

气载放射性浓度的导出限值用导出空气浓度 DAC 表示, 为年摄入量限值 ALI 除以参考人在一年工作时间内吸入的空气体积 V 所得的商, 即

$$DAC = ALI / V \quad (1-11)$$

式中, DAC 为导出空气浓度, Bq/m³; ALI 为年摄入量限值, Bq/a; V 为标准人在一年工作时间内吸入的空气体积, m³/a; DAC 可以用于评价工作场所空气污染状况时的参考。

③ 管理限值 为了管理目的, 主管部门或企业负责人可以根据最优化原则, 对辐射防护有关的任何量制定管理限值, 但它们必须严于基本限制或导出限制。

1.3 放射性评价与标准

1.3.1 放射性评价

放射性评价或称核辐射环境质量评价, 是按照剂量标准和最优化原则对释放到环境一定区域内的放射性物质对环境质量的影响进行评定和预测。环境质量的评价是环境保护工作一项重要的内容, 同时也是环境管理工作的重要手段。只有对环境质量作出科学的评价, 指出环境的发展趋势及存在的问题, 才能制定有效的环境保护规划和措施。因此辐射环境质量评价在环境保护工作中具有非常重要的地位。

1.3.1.1 辐射环境评价方法

辐射环境评价方法是指按照一定的评价标准和评价方法对一定区域内的环境质量进行估计和预测。按时间因素可分为环境质量回顾评价、环境评价现状评价和环境影响评价(预测评价)。

(1) 评价范围与评价子区

① 评价范围 适用于进行核辐射质量评价的企事业单位, 包括核燃料循环系统的各个单位, 陆上固定式核动力厂和核热电厂, 拥有生产或操作量相应于甲、乙级实验室(或操作场所)并向环境排放放射性物质的研究、应用单位, 均应进行辐射环境影响评价。

核动力厂及核燃料循环中的大中型设施, 应以主要放射性污染物排放点为中心, 半径为 80km 的周围区域作为评价范围。

② 评价子区 根据释放到环境中的放射性核素的输运途径（气途径及水途径），结合当地环境特征划分评价子区，一般方法是在评价范围内按一定的半径距离划同心圆，再按 16 个方位划分扇形区，两相邻同心圆弧与两相邻方位线围成的小区域作为评价子区。

(2) 关键人群组、关键核素和关键照射途径

① 关键人群组 从某一给定实践受到的照射在一定程度内是均匀的且高于受照射群体中的其他成员的人群组，称为关键人群组。每一评价子区内的公众成员可按性别和年龄进一步划分为若干人群组，在评价范围内每一人群组中，个体从某一给定实践或源受到的照射在一定程度上可认为是均匀的，当某一个人群组的人均受照剂量大于整个受照群体中所有其他人群组时，即称为关键人群组。关键人群组的人均剂量可用以量度该时间所产生的个人剂量的上限。

② 关键核素 在某一给定实践所涉及的各种照射途径中，就对人体照射来说，其中的某一种核素比其他的核素有更为重要的意义时，称作关键核素。

③ 关键照射途径 在某一给定实践所涉及的各种照射途径中，就对人体的照射来说，其中的某一照射途径比其他的照射途径有更为重要的意义时，称为关键照射途径。

(3) 评价指标 辐射环境影响评价采用的基本剂量评价指标为关键人群组的人均年有效剂量和评价范围内整个受照群体公众的集体有效剂量。

① 关键人群组所接受的平均有效剂量当量 在广大群体中选择出具有某些特征的组，这一特征使得他们从某一给定的实践中受到的照射剂量高于群体中其他成员。所以，一般以关键人群组的平均有效剂量当量进行辐射环境评价，因为用关键组成员接受的照射剂量作为辐射实践对公众辐射影响的上限值，安全可靠程度较高。

② 集体剂量当量 是描述某个给定的辐射实践施加给整个群体的剂量当量总和，用于评价群体可能因辐射产生的附加危害，并评价防护水平是否达到最优化。

③ 剂量当量负担和集体剂量当量负担 剂量当量负担和集体剂量当量负担用于评价放射性环境污染在将来对人群可能产生的危害。这两个量是把整个受照群体所接受的平均剂量当量率或群体的集体剂量当量率对全部时间进行积分求得的。两种平均剂量当量都是在规定的时间内（一般在一年内）进行某一实践造成的。假定一切有关因素都保持恒定不变，那么年平均剂量当量和集体剂量当量分别等于一年实践所给出的剂量当量负担和集体剂量当量负担并会达到平衡值。需要保持恒定的条件包括进行实践的速率，环境条件，受照射群体中的人数以及人们接触环境的方式。在某些情况下，不可能使这一实践保持足够长时间恒定不变，即年剂量当量率达不到平衡值。采用时剂量当量率积分就可求出负担量。

④ 每基本单元所用的集体剂量当量 以核动力电站为例，通常以每兆瓦年（电）所产生的集体剂量当量来比较和衡量获得一定经济利益所产生的危害。

(4) 评价的剂量基本标准 根据《辐射防护规定》中对公众成员的年有效剂量当量的基本限值，核辐射环境质量评价的剂量基本标准规定：全身为 1mSv/a ，如连续 5a 内平均不超过 1mSv/a ，其中个别年份内允许适当放宽（某些年份允许 5mSv/a ）。

对于陆上固定式核动力厂和核热电厂，正常工况下放射性流出物排放所致关键人群组平均年有效剂量的预示值不得大于 0.25mSv/a （作为源相关个人剂量约束值），对其他类型的核设施进行辐射环境影响评价时，对基本剂量标准也要考虑剂量的合理分配份额。

(5) 评价方法 辐射环境影响评价的基本原则是把环境对公众造成的辐射减到可合理达到的最低水平，应贯穿在整个核辐射环境质量评价工作中，特别是评价结论的分析和建