

Measurement Methods of Radon and
Its Daughters in Atmosphere

空气中氡及其子体的 测量方法

张智慧 编著 王生德 审校

原子能出版社 Atomic Energy Press

Measurement Methods of Radon and
its Daughters in Atmosphere

空气中氡及其子体的测量方法

张智慧 编著

王生德 审校

原子能出版社

北 京

(京)新登字 077 号

内容简介

本书全面论述了空气中氡及其子体的来源、性质和测量方法。全书共 8 章,其中第一章介绍了氡的来源与性质;第二至六章分别介绍了氡、氡子体活度、氡子体 α 潜能及未结合态氡子体的测量方法;第七章介绍了计算公式中所用系数的实验测定方法;第八章简要介绍了吸入氡子体所致剂量的估算方法。本书对有些计算公式做了数学推导,以使读者掌握公式的来源,熟悉方法原理。

本书可供从事矿山与环境中氡的监测工作人员使用,也可供其他有关生产、科研和教学工作参考。

ABSTRACT

The origin, Properties, and measurement methods of radon and it's daughters in the atmosphere are expounded in this book. It is divided into 8 chapters. The origin and properties of radon is introduced in the first chapter. The methods of measurement for radon and its daughters activity, potential α energy of radon daughters, and unattached radon daughters are introduced in chapter 2 to chapter 6. The experimental methods to measure the parameters which are to be used in the calculation formulas are introduced in chapter 7, and calculation method for the dose caused by inhalation radon daughters is introduced in chapter 8.

To enable the readers to understand the source of the formulas and to master the method better, the some calculation formulas are achieved by mathematical deduction.

This book might be used by workers who are engaged in the monitoring of radon (mine or environment), also as a reference book for the other readers who are engaged in production, scientific research or education.

©

空气中氡及其子体的测量方法

张智慧 编著

王生德 审校

责任编辑 韩国光

出版发行 原子能出版社(北京市海淀区阜成路 43 号)

通讯处:北京市 2108 信箱,100037(邮编)

印 刷 原子能出版社印刷厂

经 销 新华书店总店北京科技发行所发行·新华书店经销

开本 787×1092mm 1/16 印张 11.4 字数 310 千字

1994 年 3 月北京第 1 版

1994 年 3 月北京第 1 次印刷

印数 1—600

ISBN-7-5022-1039-3/TL·630

定价:10.50 元

741/295/22

前

言

人们无时不在受到氡及其子体的照射,因为氡是一种广泛存在的天然辐射源。在某些地区,人们由吸入氡子体而产生的辐射剂量占天然或人工源产生的总剂量的 50% 以上。氡的辐射影响也是核燃料循环中的主要问题,因为它造成采矿和水冶期间的职业照射。随着核能的广泛利用,对核燃料的需要量日益增加,这将大大地促进了铀的开采和冶炼工业的发展,从而增加了氡及其子体对人类的潜在危险。

氡及其子体不但增加了铀矿工人肺癌的发生率,而且也是导致居民肺癌发生的原因之一。由于铀在地壳中广泛分布,并与许多矿共生,所以非铀矿山也存在氡的问题,这些矿山氡浓度常常可能积累到较高的数值。由此而引起的矿工肺癌的发生率无论在铀矿山还是在非铀矿山都明显地高于其他人群。

为了改善人们的劳动和生活条件,必须控制矿山和住房中的氡浓度,搞好辐射防护。为此,应经常对其进行监测,为采取防护措施和检验防护效果提供依据。另外,在评价氡及其子体对居民健康的影响,解释和预测矿工肺癌的发生率时,都需要对氡及其子体测量的详细资料。

近 30 年来,氡及其子体的监测技术有了相当迅速的发展,国内外都取得了显著的成就。本书将全面介绍氡及其子体的有关知识和测量方法等,尽量做到理论化、系统化,并着重介绍方法的具体应用。

由于时间和能力的限制,本书一定有许多缺点和错误,请有关读者和专家批评指正。

编著者

1993 年 7 月

目 录

第一章 氡的来源与性质	(1)
第一节 氡的发现	(1)
第二节 环境中的氡	(1)
一、天然放射系	(1)
二、氡的来源	(2)
第三节 环境大气中的氡水平	(5)
一、氡浓度	(5)
二、氡浓度的变化	(6)
第四节 室内空气中的氡	(10)
一、来源	(10)
二、室内氡浓度	(13)
第五节 矿山的氡	(13)
一、矿井下氡的来源	(13)
二、铀矿山的氡水平	(14)
第六节 氡的性质	(16)
一、理化性质	(16)
二、衰变特性	(17)
三、子体平衡化	(18)
四、子体潜能	(19)
五、平衡因子	(20)
第七节 氡浓度及潜能的单位	(21)
一、氡浓度的单位	(21)
二、潜能的单位	(22)
参考文献	(23)
第二章 氡的测量	(25)
第一节 静电计法	(25)
一、工作原理	(25)
二、主要设备与仪器	(26)
三、标定方法	(26)
四、测量程序	(27)
第二节 活性炭浓缩法	(27)
一、原理与程序	(27)
二、活性炭的性质	(28)
第三节 闪烁室法	(29)
一、原理与程序	(30)
二、提高灵敏度的途径	(31)
第四节 积分计数法	(33)
一、基本方程式	(33)
二、计算结果	(34)
三、应用举例	(35)
第五节 双滤膜法	(35)

一、原理与程序	(35)
二、提高灵敏度的途径	(37)
三、 ^{218}Po 衰变的影响	(38)
第六节 气球法	(40)
一、原理与程序	(40)
二、 K_R 的标定方法	(41)
三、气球法的应用	(42)
四、注意事项	(45)
第七节 径迹蚀刻法	(47)
一、工作原理	(47)
二、渗透方程	(47)
三、设备与材料	(48)
四、测量程序	(48)
五、刻度	(50)
六、讨论	(50)
第八节 静电扩散法	(51)
一、半球式连续测氡仪	(51)
二、圆筒式测氡仪	(52)
三、热释光测氡仪	(52)
四、球式测氡仪	(55)
第九节 活性炭滤纸法	(56)
一、方法原理	(56)
二、滤纸的制作	(58)
三、测量程序	(59)
第十节 活性炭盒法	(60)
一、方法摘要	(60)
二、设备与材料	(60)
三、操作程序	(60)
四、刻度	(61)
五、改进型活性炭氡采样器	(61)
第十一节 其他测氡方法简介	(65)
一、脉冲电离室法	(65)
二、溶剂萃取法	(65)
三、液氮蒸发法	(65)
参考文献	(66)
第三章 氡子体测量的基本公式	(67)
第一节 取样中的氡子体积累	(67)
一、基本假设	(67)
二、基本方程式	(67)
三、方程的定解	(68)
四、简化表达式	(69)
第二节 取样后的衰变	(69)
一、基本方程式	(69)
二、方程的定解	(70)
三、简化表达式	(70)
第三节 基本公式的建立	(71)

一、完整表达式	(71)
二、基本公式的导出	(71)
第四节 应用举例	(73)
一、测量 α 活度	(73)
二、测量 β 活度	(76)
第五节 T_n 子体测量公式	(78)
第六节 取样时间的选择	(79)
第四章 氡子体浓度的测量	(82)
第一节 三点法	(82)
一、测量程序	(82)
二、三点法的改进	(82)
第二节 托马斯三段法	(83)
一、公式导出	(84)
二、测量程序	(85)
三、方法灵敏度	(86)
四、快速三段法	(87)
五、时间选择	(88)
第三节 拉维亚三段法	(88)
第四节 斯科特三段法	(89)
一、测量程序	(89)
二、灵敏度比较	(89)
第五节 α 能谱法	(90)
一、测量程序	(90)
二、公式化简	(91)
第六节 积分谱仪法	(92)
第七节 五段法	(92)
第八节 加权最小二乘法	(93)
参考文献	(94)
第五章 氡子体潜能的测量	(95)
第一节 引言	(95)
第二节 库斯尼茨法	(96)
一、测量程序	(96)
二、误差来源	(96)
第三节 马尔柯夫法	(97)
一、测量程序	(97)
二、标定方法	(97)
第四节 氡子体 α 潜能的快速测量	(99)
一、方法原理	(99)
二、测量程序	(99)
第五节 罗尔法	(100)
一、方法原理	(100)
二、测量程序	(102)
第六节 总 α 计数法	(103)
一、公式推导	(103)

二、测量方法	(103)
第七节 总 β 计数法	(105)
一、公式推导	(105)
二、测量方法	(105)
第八节 WL 的快速测定法	(106)
一、公式推导	(106)
二、测量程序	(107)
第九节 两段计数法	(108)
第十节 算法	(109)
第十一节 氡子体测量中的不确定度	(109)
一、或然误差	(109)
二、系统误差	(110)
三、托马斯三段法中的不确定度	(110)
第十二节 个体剂量仪	(112)
一、引言	(112)
二、分类	(113)
三、剂量仪结构	(113)
四、刻度	(115)
参考文献	(115)
第六章 未结合态氡子体的测量	(116)
第一节 未结合态氡子体的定义	(116)
第二节 f 值的定义	(116)
第三节 未结合态氡子体的特性	(117)
一、理化性质	(117)
二、特殊性质	(118)
第四节 取样技术	(121)
一、扩散管	(121)
二、扩散组	(123)
三、冲击器	(124)
四、金属筛	(126)
五、扩散取样器	(132)
第五节 扩散型取样器的性能比较	(134)
一、取样器的结构	(134)
二、实验方法与结果	(136)
三、基本结论	(139)
第六节 f 值的测量	(139)
一、测量项目	(139)
二、测量方法	(139)
三、计算	(140)
四、 ϵ 和 P 值的确定	(140)
第七节 铀矿山的 f 值	(141)
一、引言	(141)
二、测量结果	(141)
参考文献	(144)
第七章 系数标定	(145)
第一节 滤膜的收集特性	(145)

一、气溶胶的粒度分布	(145)
二、过滤机制	(146)
三、氡子体在滤膜中的分布	(146)
四、性能指数	(148)
第二节 过滤效率	(148)
一、理论推导	(149)
二、注意事项	(150)
第三节 滤膜的自吸收	(150)
一、自吸收因子	(150)
二、 K_a 值的实验测定	(151)
第四节 计数效率	(157)
一、计数效率的定义	(157)
二、计数效率与能量的关系	(157)
三、计数效率的实验标定	(159)
第五节 取样流速	(159)
一、流量计	(159)
二、温度、压力修正	(160)
三、流速限制	(160)
四、抽气设备	(161)
第六节 死时间修正	(161)
参考文献	(161)
第八章 剂量估算	(162)
第一节 氡的危害	(162)
一、诱发肺癌	(162)
二、危险度	(162)
第二节 剂量估算	(163)
一、估算方法的沿革	(163)
二、矿工剂量转换因子	(164)
三、居民剂量转换因子	(166)
四、吸入量计算	(166)
第三节 氡子体吸入限值	(166)
参考文献	(167)
附录 A 室内标准采样条件	(168)
附录 B 氡的积累	(170)
附录 C 几种岩石的射气系数	(173)
附录 D 氡在几种介质中的扩散系数	(173)

第一章 氡的来源与性质

第一节 氡的发现

15 世纪在捷克的亚希莫夫矿山开采白银,白银是含在坚硬的油黑色岩石中。1789 年德国化学家克拉普罗特第一次从这种岩石中分离出铀的化合物,1827 年把这种岩石称为沥青铀矿。1896 年法国物理学家贝可勒尔发现的放射性正是由这种岩石中得到的。后来,M. 居里和 P. 居里又从这种沥青铀矿中分离出放射性元素镭^[1]。

1898 年 M. 居里发现在与镭接触的空气中有放射性,但并不知道这种放射性的来源和性质,直到 1900 年 F. 多恩证明了空气中的这种放射性起因于镭放出的一种气体。以后不久,E. 卢瑟福、F. 索迪和 W. 拉姆奇等一致确认这种气体是一种惰性气体,在氡的性质研究方面迈出了关键性的一步。E. 卢瑟福称这种惰性气体为射气(Emanation),而 W. 拉姆奇和 R. 戈瑞把这种射气命名为氡(Niton),1923 年国际会议上正式把这种射气命名为 Radon(氡)。这一名称一直沿用到现在。

第二节 环境中的氡

一、天然放射系

自然界中氡的天然放射性同位素有三个,即 ^{222}Rn , ^{220}Rn , ^{219}Rn ,它们分别来源于三大天然放射系——铀系、钍系和锕系,图 1-1 是三个放射系的简化衰变链。由于 ^{220}Rn 来源于钍系,通常叫做钍射气(Tn)。 ^{219}Rn 是锕系中的一个成员,故叫做锕射气(An)。它们的母体都是镭的同位素(^{226}Ra , ^{224}Ra , ^{223}Ra),而子体又都是钋、铅、铋等的同位素,衰变方式相同。

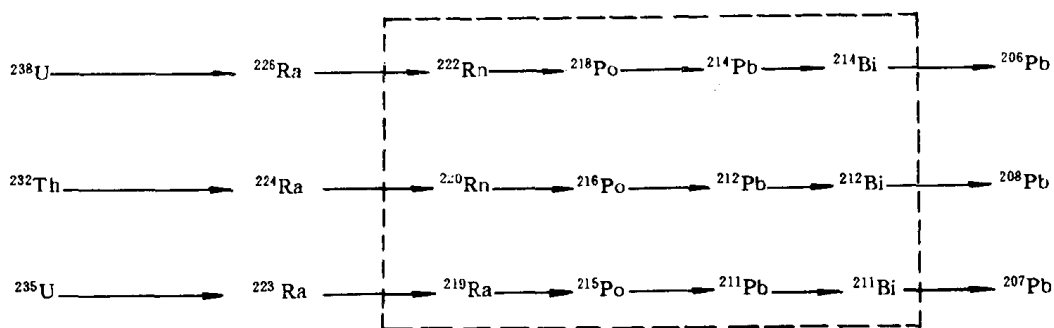


图 1-1 三大天然放射系简化衰变图

自然界中钍的含量是铀的 3 倍,但半衰期也是其 3 倍,故其放射性活度差不多,单位时间内产生的 ^{222}Rn 和 ^{220}Rn 的原子数基本相同^[2]。但由于 ^{220}Rn 的半衰期(54.5s)短,地壳中产生

的 ^{220}Rn 只有很少一部分能够释放到大气中来,而且很快衰变掉,在大气中的含量不足 ^{222}Rn 的10%。 ^{219}Rn 的半衰期(3.9s)就更短,在产生的瞬间就衰变掉,大气中几乎显示不出它的存在。 ^{222}Rn 的半衰期(3.83d)长,地表土层中产生的 ^{222}Rn 可以迁移、扩散到地面,释放到大气中,随着空气的流动而传播到很远的地方,是低层大气中天然放射性的主要成分。如果不加说明的话,所说的氡就是指 ^{222}Rn 。

二、氡的来源

^{222}Rn 来源于 ^{226}Ra 的衰变,1Bq 的 ^{226}Ra 每秒钟产生 $2\times 10^{-6}\text{Bq}$ 的 ^{222}Rn ,而 ^{226}Ra 的多少取决于自然界中的铀(^{238}U)含量。铀是自然界中广泛分布的微量元素,人类的生产实践改变了铀在自然界中的分布,使得氡的来源也多样化。环境大气中氡的来源是多种多样的,但主要有以下八个方面:

1. 大地释放 铀在地壳中的质量比份是 3g/t,海洋中是 3g/1000t,陆地为海洋的 1000 倍。陆地上铀的总量为 $4\times 10^9\text{t}^{[1]}$,是黄金总量的 1000 倍。

铀(^{238}U)在土壤和岩石中的含量是不同的(见表 1-1),在世界范围内的平均含量为 $2.8\times 10^{-4}\%$,相应的土壤中的 ^{226}Ra 的放射性含量 $25\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$,因此土壤中的氡含量很高,是空气中的 $10^4\sim 10^6$ 倍。 Ra 衰变产生的一部分氡原子经放射性反冲、扩散迁移至地表,从而进入大气中。地表氡的平均析出率为 $16\text{mBq}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1[3,4]}$,每年为 $5.05\times 10^5\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}$,乘上陆地和总面积 $1.5\times 10^{14}\text{m}^2$,得 $7.6\times 10^{19}\text{Bq}\cdot\text{a}^{-1}$,即陆地表面每年向大气中释放 $7.6\times 10^{19}\text{Bq}$ 的氡^[5]。

表 1-1 岩石和土壤中的铀含量

种 类	土壤	花岗岩	页岩	石炭岩	基性火成岩	砂岩
铀含量, $\times 10^{-4}\%$	1.80	4.70	3.70	2.20	0.90	0.45

陆地表面氡的析出率受许多因素的影响^[6],如土壤和岩石中的镭含量、孔隙度、水分、气象条件等。其中气压、水分、温度的影响是明显的。

(1)气压的影响 大气压力的微小变化都会导致氡析出率的大幅度改变。图 1-2 是墙壁内氡析出率随气压的变化曲线^[7],而土壤中氡析出率随气压的变化比这更要显著。气压变化 1%,氡析出率要向相反的方向变化 1 倍。

(2)水分 稍微潮湿的土壤比干燥土壤氡的析出率高,但水分增加到一定程度时析出率急剧下降,因为水分子堵塞了氡原子运动的通道。

(3)温度 随着温度的增加氡析出率也增加,但也有相反的实验结果。

世界不同地区氡的析出率差异很大,已发表的数值摘要列于表 1-2^[8]。

2. 海洋释放 海水中含有一定量的 ^{226}Ra ,平均浓度为 $1\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$,海底比海面要高一个量级。这样的镭浓度导致海洋表面氡的平均析出率为 $7\times 10^{-5}\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,即 $2.2\times 10^3\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,乘以海洋的总面积 $3.6\times 10^{14}\text{m}^2$,得 $8\times 10^{17}\text{Bq}\cdot\text{a}^{-1}$,即海洋每年向大气释放 $8\times 10^{17}\text{Bq}$ 的氡。该值比陆地释放量低两个量级,造成海洋上大气中的氡浓度明显低于陆地。

大陆和海洋上大气中氡浓度差异悬殊,导致了海岸附近大气中的氡浓度会受风向的影响。当风从海上吹向陆地时,氡浓度下降,反之上升。即使距海岸几百公里的大陆深处,这种影响亦是明显的。

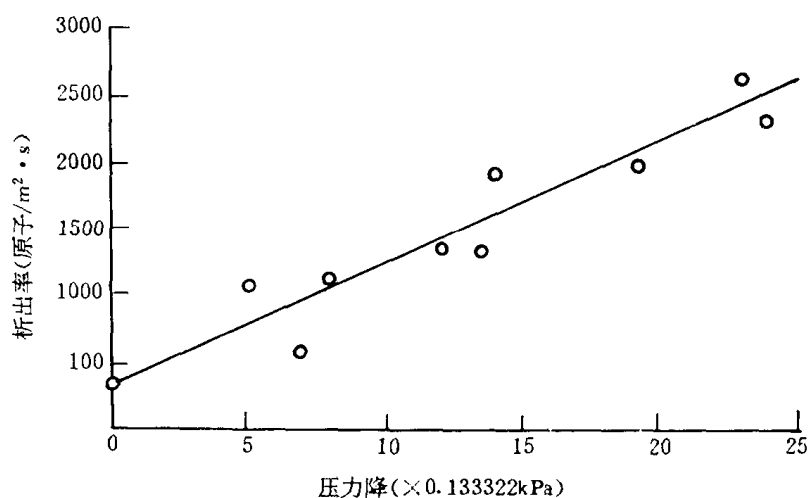


图 1-2 氮析出率随压力的变化

表 1-2 某些地区氮析出率($\text{mBq} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)

地 区	土壤类型	析出率	地 区	土壤类型	析出率
奥地利 格拉茨	山地	20.9	香潘地区	黑土	53
因斯布鲁克	山地	19	阿贡	黑土	21
法国 萨克莱	灰壤	15.14	前苏联 基洛夫	灰壤	15
德国 亚琛	灰壤	17	莫斯科	灰壤	3.8
爱尔兰 都柏林	灰壤	27	西南喀山斯坦	沙漠	5
日本 大阪	砖红壤	3.4, 8.8	列宁格勒	灰壤	7.3
菲律宾 马尼拉	砖红壤	11	高加索	山地黑土	11
美国 新墨西哥	沙漠	34	中亚	山地沙漠	19
尤卡弗莱特	沙漠	18	南乌拉尔	山地灰壤	11

3. 植物和地下水的载带 植物的生长将增加地表氮的释放。实测结果表明,种五谷的土地氮的释放率是那些不毛之地的3~5倍。地下水会把地壳深处的氮带到地面而释放到环境大气中。地下水中的氮浓度很高,一般在 $1.85 \times 10^5 \text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ 左右,高者可达 $1.85 \times 10^7 \text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$,可能形成局部地区的重要氮源。由于植物和地下水的作用,每年向大气中释放约 $1 \times 10^{19} \text{Bq}$ 的氮。

4. 核工业释放 核工业的发展,尤其是在核燃料生产过程中,如采矿、水冶是释放氮的主要环节。

随着对核燃料需要量的增加,铀矿石的产量在以惊人的速度增长着。以铀产量来衡量这种增长,1855~1900年间全世界的铀产量总共只有3t,二次大战期间迅速增加,1942年的年产量上升到100t,目前的年产量已达到30000t^[9]。美国、前苏联、加拿大、澳大利亚等国都是产铀国。

铀矿井内积累的大量的氮排入环境,排出量因矿山规模不同而有差异。我国一个正在生产

的中等铀矿山每天要排入环境 10^{10} Bq 的氡,对环境是有影响的。

在水冶过程中 ^{238}U 与 ^{230}Th , ^{226}Ra 分离,95%的 ^{230}Th 和99%的 ^{226}Ra 进入尾矿堆,于是尾矿堆便成了人工氡气源。尾矿的特点一是产量多,二是占地面积大。到1977年止美国17个在役的水冶厂共有尾矿 $1.15\times 10^8\text{t}$,占地 $8.1\times 10^6\text{m}^2$,已停产的23个水冶厂有尾矿 $2.3\times 10^7\text{t}$,占 $4.05\times 10^6\text{m}^2$ 。不加覆盖的尾矿堆氡的析出率是土壤的2~3000倍,表1-3是美国尾矿堆氡的析出率^[10]。如此大的波动是由各尾矿堆中的 ^{226}Ra 的含量不同,气象条件的变化以及覆盖情况的差异引起的。

表 1-3 美国一些尾矿堆氡析出率(原子 $\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}$)

研究方式	方法	范围	作者
在若干个尾矿堆上作了几次测量	累积收集	20~387	Bernherdt 等 1975
在一个尾矿堆上调查了1年	箱式	29~323	Cauntess 1977
着重研究一个尾矿堆并在另外两个尾矿堆上进行间断测量	累积收集	65~1843	Marpleand Clements 1977
在许多尾矿堆上作了几次测量	箱式	2~2820	Ford Bacen 等 1976

尾矿堆上空气中的氡浓度明显增高,在其周围1km内天然本底将有所增加。其情形如表1-4所示。

表 1-4 尾矿堆附近环境中的氡水平($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$)

调查方式	尾矿堆上	距尾矿堆1公里内	作者
在4个尾矿堆上作若干次测量	37~1258	19~126	Sheares 和 Sill 1969
在一个尾矿堆上调查1年	296~2442	30~266	Duncan 等 1977
在二个尾矿堆上1个月内取若干次样品	$118\sim 3\times 10^4$	15~518	Snelling 1971
	30	4~19	Snelling 1971
在几天内对许多停用尾矿堆作几次测量	$444\sim 10^4$	7~1554	Ford Bacen 等 1961
1个月内在一个尾矿堆上取若干样品	167~285	63~289	Oucan 和 Eodie 1977

估计全世界的铀矿山和水冶厂每年释放到大气中 1×10^{10} Bq的氡。这也是一个不可忽略的数字。

使用中的尾矿堆可利用水作覆盖,废弃的尾矿堆要加土进行永久性覆盖。一层60cm的水可使氡的析出率降到10%,1m厚的土层可使氡的析出率降到1%,6m厚的土层可使堆附近氡气降到本底水平。因为表层土壤会流失,需要定期修理和加厚。

5. 煤的燃烧 煤是工业和居民生活中广泛使用的化石燃料,每年各国要烧掉大量的煤。一个普通的取暖锅炉(20t)每年要烧掉6000t煤,一个中型的火力发电厂每年要烧30万t煤。煤中的铀含量平均为 $1.0\times 10^{-4}\%$,灰量以10%计,则灰中的铀含量便被浓缩到 $1.0\times 10^{-3}\%$ ^[11]。有铀必然有镭,煤灰也就成了一种人工氡气源。估计全世界由于烧煤每年释放到大气中的氡约 1×10^{13} Bq。

煤灰的产量是惊人的,而且随意堆放,与尾矿堆相比,具有更大危害性:①尾矿堆被人重视而加以覆盖,远离居民点,而煤灰无人过问,分散在居民中间;②尾矿堆中的放射性物质是以

^{230}Th 的半衰期($8 \times 10^4 \text{a}$)衰减的,而煤灰堆中的放射性物质是以 ^{238}U 的半衰期($4.5 \times 10^9 \text{a}$)衰减的,比尾矿堆要大5个数量级,也就是说煤灰几乎是永不消失的氡源。

6. 磷酸盐工业 磷酸盐矿石中的铀含量高,尤其以海生磷酸盐矿石为最高。摩洛哥、前苏联、美国和中国都大量生产磷酸盐矿石,美国此矿石的生产量约占全世界总产量的40%,而其中80%又集中产在佛罗里达。美国磷酸盐矿石中的铀含量为 $8 \times 10^{-4}\% \sim 4 \times 10^{-2}\%$,平均为 $8.0 \times 10^{-3}\%$,1973年生产矿石1.27亿t,含铀1.0万t,可供60座反应堆使用一年。

磷酸盐的80%作为磷肥而施撒在土地上,施磷肥的土地其氡的析出率不亚于尾矿堆,原因是土壤中富集了较高浓度的 ^{226}Ra 。在美国Belgian Agricultural研究中心在试验田里施撒磷肥(P_2O_5),11年间在两块地里分别施磷肥343kg/ha和1366kg/ha($1\text{ha} = 10^4 \text{m}^2$),结果使0~20cm深的土层中 ^{226}Ra 的平均比活度达到 $32.2 \text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$,比正常土地增加了28%^[12]。

磷酸盐工业的副产品石膏通常作为建筑材料,无疑会增加室内的氡浓度。估计在全世界由于磷酸盐工业每年释放到大气中 $1 \times 10^{18} \text{Bq}$ 的氡。

7. 天然气 本世纪初就知道天然气中含有放射性物质,并测定了其中的氡浓度。1919年开了第一次世界性有关氡的报告会,主要内容有:①美国天然气中氡含量;②燃烧天然气造成室内的氡浓度增高;③计算呼吸道剂量。

天然气中氡浓度差异很大,大致在 $(5.6 \sim 37) \times 10^4 \text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ 。不同城市天然气中氡浓度不同。估计每年由于天然气的燃料向大气中释放约 $1 \times 10^{14} \text{Bq}$ 的氡。

与烧煤相比,烧天然气更容易增加室内的氡浓度。

8. 建筑物的释放 由于建筑材料中都含有一定量的 ^{226}Ra ,墙壁、地板、天花板内产生的氡有一部分释放到室内空气中。一般室内空气中的氡浓度比环境中要高一个数量级,在通风和扩散的作用下室内的氡便进入环境。估计全世界有标准房间(室的内表面积 350m^2 、体积 200m^3) 1×10^9 个,每年释放到环境中的氡约 $1 \times 10^{16} \text{Bq}$ 。

第三节 环境大气中的氡水平

一、氡浓度

释放到环境大气中的氡全部分布在大气层中,并主要在低层。可以把整个地球大气层看成一个封闭空间,则其中氡的变化规律可用下式描述:

$$\frac{d\theta_R}{dt} = M - \lambda_R \theta_R \quad (1-1)$$

式中: θ_R 为氡的总活度, Bq ; M 为氡的产额, $\text{Bq} \cdot \text{a}^{-1}$; λ_R 为氡的衰变常数, a^{-1} 。初始条件是 $t=0, \theta_R=0$,则方程(1-1)的解为

$$\theta_R = \frac{M}{\lambda_R} (1 - e^{-\lambda_R t}) \quad (1-2)$$

以 $\lambda_R = 66 \text{a}^{-1}$,并取时间 $t=1\text{a}$,则有

$$\theta_R = \frac{M}{66} (1 - e^{-66}) \approx \frac{M}{66} \quad (1-3)$$

由前可知,氡的产额 $M = 7.6 \times 10^{19} + 8 \times 10^{17} + 10^{19} + 10^{19} + 10^{13} + 10^{18} + 10^{14} + 10^{16}$
 $= 9.8 \times 10^{19} (\text{Bq} \cdot \text{a}^{-1})$

其中陆地为 $9.7 \times 10^{19} \text{Bq} \cdot \text{a}^{-1}$,海洋为 $8 \times 10^{17} \text{Bq} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

氡随高度增加呈指数下降,其衰减高度约为1000m,粗略地估计地面大气中的氡浓度,可

只考虑 1000m 的高度。于是全球氡浓度平均值 C_{Rn} 为

$$C_{Rn} = \frac{9.8 \times 10^{19}}{66 \times 1000 \times 5.1 \times 10^{14}} = 2.9(\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3})$$

陆地上大气中的氡浓度为

$$C_{Rn} = \frac{9.7 \times 10^{19}}{66 \times 1000 \times 1.5 \times 10^{14}} = 9.8(\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3})$$

海面上大气中的氡浓度为

$$C_{Rn} = \frac{8 \times 10^{17}}{66 \times 1000 \times 3.6 \times 10^{14}} = 0.03(\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3})$$

不同地区不同时间大气中氡浓度的差异是很大的。就全世界范围来讲,陆地上大气中的氡浓度大致在 $1.5 \sim 15 \text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ 之间,而海洋上在 $1 \text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ 以下。

表 1-5 列举了一些国家和地区环境大气中的氡水平^[8],可以看出海洋上的低于大陆的,沿海的低于内地的。这些数值只能作为参考,不可轻易引用,因为未必是本地区的代表性数值,更不是国家的平均水平。

表 1-5 环境大气中的氡浓度($\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$)

国家或地区	C_{Rn}	国家或地区	C_{Rn}	国家或地区	C_{Rn}
奥地利	7.0		2.2	北非	0.5
玻利维亚	1.5	英国	33	挪威海	0.2
芬兰	2.3	美国		夏威夷	0.2
	3.5	芝加哥	1.6		0.05
	3.8		1.5	马绍尔群岛	0.02
	2.0	华盛顿	2.9	加罗林群岛	0.02
	2.7		4.4	关岛	0.05
	3.6	圣地亚哥	0.1	萨摩亚群岛	0.08
法国	9.3	旧金山	0.6	印度洋	0.07
前联邦德国	2.6	西雅图	0.1	北大西洋	0.2
印度	3.7	孟菲斯	1.0	南太平洋	0.07
日本	2.1	纽约	4.8		
秘鲁	1.5		3.7		
菲律宾	0.3	切斯特	7.9		
波兰	3.3	辛辛那提	9.6		
前苏联	6.3	新墨西哥	8.9		
	2.6	波多黎各	0.005		
	3.3	阿拉斯加	0.2		

二、氡浓度的变化

环境大气中的氡浓度并不是恒定的,随着时间和空间在不停地变化着,因为受氡的析出率和大气稳定性的影响。另外,随高度的变化亦是明显的。

1. 时间变化 低层大气中的氡浓度取决于氡的析出量和在大气中的迁移及扩散。如前所述,析出率除与土壤中的镭含量有关外,主要依赖于气压、温度、湿度和降雨量。氡在大气中的

迁移和扩散取决于温度梯度、风的方向和强度、空气湍流等。这些气象条件并不是恒定的，每时每刻都在变化，因而大气中的氡浓度随时间不停地变化着。

氡的季节性变化规律不完全相同，多数地区秋、冬季出现最大值，而春、夏季有最小值。图 1-3 和图 1-4 分别为日本和美国几个地区^[3]的氡浓度的年变化，其变化规律基本相同。其中，日

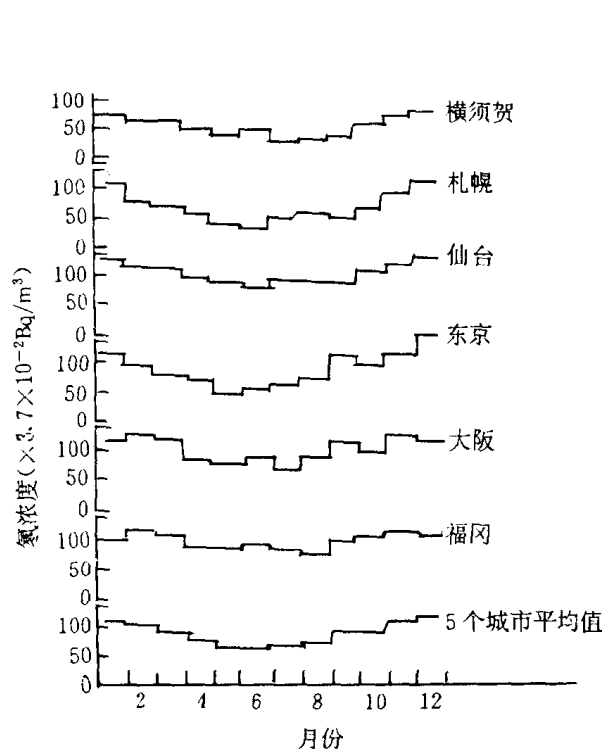


图 1-3 在日本测量的氡浓度的年变化

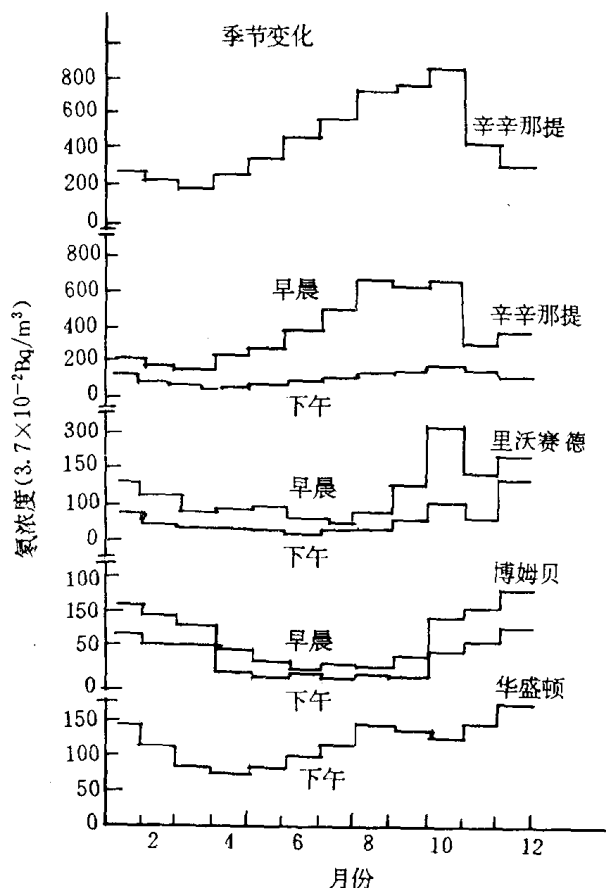


图 1-4 美国几个城市环境氡浓度的季节变化

本的是在下午测量的，并且都是由子体测量结果而导出氡浓度的。

之所以这样，是因为春季大气稳定性差，垂直湍流混合剧烈，这种混合的增加大大超过了氡析出量的增加，总的效果是使氡浓度减小了。秋冬季大气稳定，上述混合减小，其影响远远超过氡析出率的减少，总的效果是大气中氡浓度增加了。另外，在秋冬季常有逆温现象发生，阻碍着地面大气中的氡向高空迁移和扩散。

但是在季节变化上也有相反的地区，在美国新泽西州的切斯特进行的测量中发现，氡浓度的最大值出现在夏季，而冬季为最小（见图 1-5）。这也是由当地的气象条件决定的。

大气中氡浓度的日变化也依赖于气象条件，不同地区不同季节内，最大值和最小值出现的时刻是不同的。图 1-6 是欧洲和美国几个地区大气中氡浓度的日变化曲线，其规律相同，最大值在清晨，最小值在下午。

2. 高度变化 在约 11km 的对流层内温度随高度增加而降低，对流层上是平流层。在 32km 以内温度是稳定的，32km 以上温度又开始上升。多数空气团、水蒸气和尘埃是在对流层内，一般气象条件下大部分 (>99%) 氡及其衰变产物分布在对流层内。

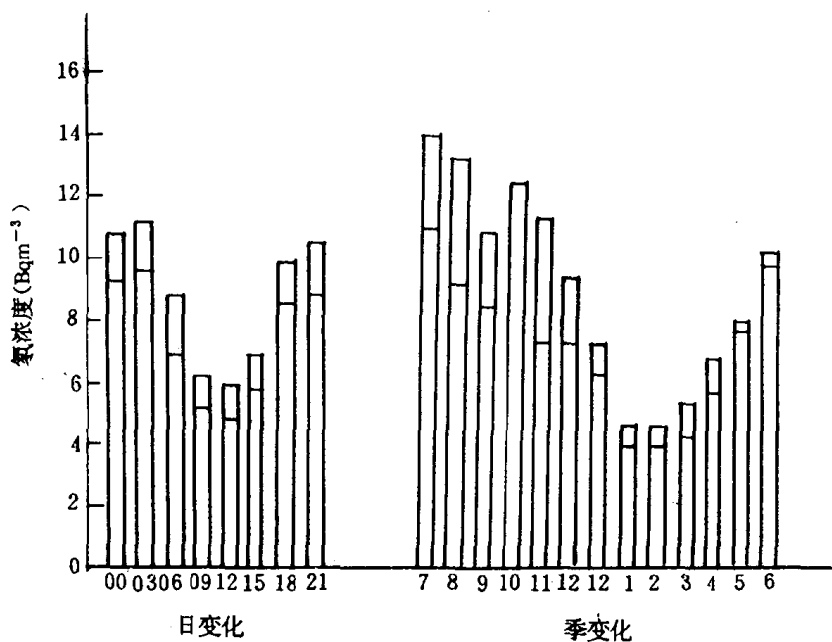


图 1-5 切斯特氡浓度的变化

氡的垂直弥散是由湍流扩散和对流引起的,并且受到放射性衰变的限制。湍流扩散系数远远大于气体动力学扩散系数,且随离开地面的高度而增加。这种随高度的增加受风速的垂直变化和对流层上部与平流层下部大气稳定性的影响。某些典型湍流条件下表征湍流扩散系数的特征廓线示于图 1-7。空气中氡及其子体的垂直分布用下列方程组计算:

$$\frac{d}{dz} \left(D_T(z) \frac{dC_{a,R}(z)}{dz} \right) - \lambda_R C_{a,R}(z) = 0 \quad (1-4)$$

$$\frac{d}{dz} \left(D_T(z) \frac{dC_{a,j}(z)}{dz} \right) + \lambda_{j-1} C_{a,j-1}(z) - (\lambda_j + \Lambda) C_{a,j}(z) = 0 \quad (1-5)$$

式中: $D_T(z)$ 为高度 z 处的湍流扩散系数; $C_{a,R}(z)$ 为高度 z 处的氡原子浓度; $C_{a,j}(z)$ 为高度 z 处 j 种子体浓度; λ_R 为氡的衰变常数; λ_j 为 j 种子体的衰变常数; Λ 为冲洗和雨洗引起的子体清除速率。

假定无穷大平面(地表)上氡的析出率是一个常数,并等于大气中氡总含量的放射性衰变,则可得到式(1-4)和(1-5)的解,代入不同的 $D_T(z)$ 值即得到不同大气稳定度下氡的垂直分布,计算结果示于图 1-8。

可见地表氡浓度预计在极端的大气稳定度条件下可改变 100 倍。

在较高处这种变化逐渐减小,1~2km 处减小了 1/5。图 1-9 和图 1-10 说明了这种变化。

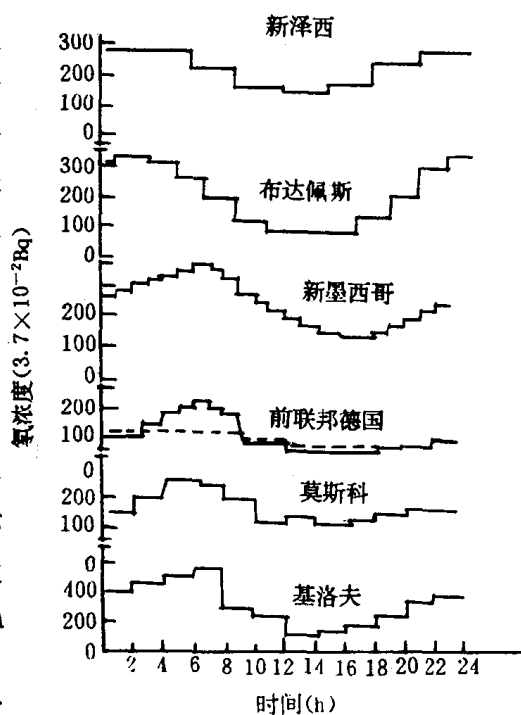


图 1-6 几个地区氡浓度的日变化