

铀尾矿氡析出的 分形动力学与环境治理

谭凯旋 刘泽华 王国全 著



科学出版社

铀尾矿氡析出的分形动力学 与环境治理

谭凯旋 刘泽华 王国全 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书对铀尾矿氡的析出进行了系统的室内实验、现场监测与实验、计算机模拟和理论研究。对铀尾矿氡析出的时间、空间变化进行了系统的实验与监测,研究了氡析出时间变化的混沌特性和空间变化的分形特性。实验研究了铀尾矿粒度和粒度分形分布对氡析出的影响,建立了氡析出的分形动力学模型和蒙特卡罗模拟方法。对铀尾矿析出的氡在大气中的迁移进行了数值模拟。研究了覆土密度、不同覆盖物、覆盖物分形结构对铀尾矿覆盖降氡的影响,建立了覆盖层厚度估算和降氡效果评估的分形方法,探讨了铀尾矿覆盖治理的优化措施。

本书可供从事环境地球化学、环境工程、辐射防护、放射性安全、矿山环境、铀矿冶退役治理等领域的研究人员参考,也可供上述相关专业的高年级本科生和研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

铀尾矿氡析出的分形动力学与环境治理/谭凯旋,刘泽华,王国全著. —北京:科学出版社,2016.1

ISBN 978-7-03-046909-0

I. ①铀… II. ①谭…②刘…③王… III. ①铀矿-尾矿-氡-动力学-研究②铀矿-尾矿-氡-矿山环境-环境管理-研究 IV. ①P619.14

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第317805号

责任编辑:霍志国/责任校对:何艳萍

责任印制:徐晓晨/封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京中石油彩色印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016年1月第一版 开本:720×1000 B5

2016年1月第一次印刷 印张:11 3/4

字数:250 000

定价:80.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

氡是天然放射性铀钍衰变系列中镭同位素的衰变子体，本身也具有放射性，它是许多领域应用研究和辐射防护研究的热点。

铀是重要的核电燃料，虽然核电因不产生温室气体而被认为是清洁能源，但是为核电提供燃料的铀矿的开采和选冶工作所产生的环境影响是不容忽视的。在铀矿开采和加工过程中产生了大量的尾矿，它们一般集中堆置在地表的特定地方并形成尾矿库，这些尾矿是潜在的大体积低放射性物质和放射性惰性气体氡的重要来源。与尾矿有关的典型环境问题是氡的析出，尽管氡的半衰期短（只有3.8d），但是铀尾矿中所产生的氡大部分可以通过尾矿迁移而到达大气中。因此，铀矿山尾矿的治理是非常重要的环境问题，引起了国际原子能机构和广大科技工作者的高度重视。其中，铀尾矿中氡的析出、迁移机理和影响机制的研究是放射性环境治理研究要重点解决的课题之一，是寻求有效治理措施的基础，对促进核行业可持续发展具有重要意义。

铀尾矿氡的析出是一个极为复杂的动力学过程。本书以我国南方铀矿山尾矿为研究对象，在进行了大量室内实验和现场实验的基础上，应用混沌与分形理论分别研究了铀尾矿氡析出率的时间变化的混沌特征值和空间变化的分形特征值、铀尾矿粒度和粒度分布分形对氡析出的影响，初步揭示了铀尾矿氡析出的混沌和分形特征，为深入研究铀尾矿氡析出分形动力学机理打下了基础；对铀尾矿氡析出动力学过程进行了蒙特卡罗模拟，利用CFD方法模拟了复杂山地气流环境下铀尾矿析出氡在大气中的迁移分布，分析了环境风速对铀尾矿氡污染扩散的影响，为铀尾矿环境评价提供了参考；研究了不同覆盖物的降氡效果、覆盖物粒度分布的分形结构特征及其对降氡的影响，建立了基于覆盖材料分形维数的评价覆盖效果和计算覆盖层最小厚度的新方法，可供我国南方铀矿山和其他具有相似地质地理特征铀矿山的尾矿治理推广使用。

希望本书能为氡析出过程的研究提供新的思路和新的手段，为铀尾矿的治理提供理论参考。

本书的研究工作得益于国家自然科学基金项目“铀废石和尾矿氡析出的分形动力学研究”（项目编号：10675059）和“铀尾矿库放射性核素迁移转化的生物-地球化学耦合动力学研究”（项目编号：11275093）的支持，研究期间与新疆维吾尔自治区辐射环境监督站开展了产学研合作。本书共5章，第1章简述了铀尾矿与氡的特性，第2章对铀尾矿氡析出过程进行了分形和混沌分析，第3章进行

了铀尾矿氡析出动力学模拟研究，第4章对铀尾矿氡在大气中的迁移进行了模拟分析，第5章为铀尾矿库降氡覆盖治理研究。

本书由谭凯旋、刘泽华、王国全著。参加部分研究工作的还有夏良树教授、吕俊文副教授、刘栋、黄永香，研究生刘畅荣、刘岩、刘静、潘永、冯松、胡寒桥、李咏梅等。研究期间得到了周星火研究员的重要帮助，同时湖南、广东、新疆的多个厂矿为项目的实验研究提供了大力支持。本书的出版得到南华大学、矿业工程湖南省重点学科、核燃料循环技术与装备湖南省协同创新中心的支持，在此一并表示感谢。

作 者

2015年12月

目 录

前言

第 1 章 铀尾矿与氡	1
1.1 氡的基本性质	1
1.1.1 氡的理化性质	1
1.1.2 氡的危害	3
1.1.3 氡的来源、产生与聚积	6
1.1.4 放射性活度和辐射剂量的测量单位	7
1.2 铀尾矿与氡的析出	9
1.2.1 铀矿采冶与铀尾矿的产生	9
1.2.2 铀尾矿的放射性和氡析出的特征	10
1.2.3 铀尾矿氡析出的机理及影响因素	15
1.3 铀尾矿氡的监测与治理	22
1.3.1 铀尾矿氡析出率测量	22
1.3.2 铀尾矿大气氡浓度测量	26
1.3.3 铀尾矿库的退役治理	27
第 2 章 铀尾矿氡析出的分形和混沌分析	31
2.1 分形与混沌理论简介	31
2.1.1 动力系统	31
2.1.2 分形	32
2.1.3 混沌	36
2.2 铀尾矿氡析出率的时间序列实验与混沌分析	41
2.2.1 铀尾矿氡析出率的时间序列实验	41
2.2.2 铀尾矿氡析出率时间序列的混沌分析	45
2.2.3 铀尾矿氡析出率时间序列的降噪	55
2.2.4 铀尾矿氡析出率时间序列的非线性检验	62
2.2.5 铀尾矿氡析出率时间序列的 Hurst 指数与分形特征	68
2.3 铀尾矿库氡析出率的空间变化的分形特征	72
2.3.1 铀尾矿库氡析出率空间分布现场测量实验	72
2.3.2 铀尾矿库氡析出率的空间二维平面分形分析	76
2.3.3 铀尾矿库氡析出率的空间分布多重分形特征分析	79

第 3 章 铀尾矿氡析出动力学	84
3.1 铀尾矿粒度对氡析出的影响	84
3.1.1 实验设计	84
3.1.2 实验结果分析	85
3.1.3 镭含量的分析及对氡析出的影响	88
3.1.4 尾矿粒度对氡析出的影响机理	90
3.2 铀尾矿粒度分形分布对氡析出的影响	94
3.2.1 多孔介质的粒度分形分析方法	94
3.2.2 实验用样品的配制	95
3.2.3 实验结果	96
3.3 铀尾矿氡析出蒙特卡罗模拟	102
3.3.1 粒子输送的蒙特卡罗模拟	102
3.3.2 氡在不同介质中的反冲射程	105
3.3.3 铀尾矿氡析出模型	109
3.3.4 氡析出的蒙特卡罗模拟	114
第 4 章 铀尾矿氡在大气中迁移的模拟	126
4.1 铀矿区氡的测量	126
4.1.1 矿井内氡浓度的测量与分析	126
4.1.2 矿区放射性面源的测量与分析	127
4.1.3 矿区附近居民 Z (郑) 家氡的测量分析	128
4.2 气载源项放射性核素氡的剂量分析	130
4.2.1 放射环境质量评价模式与参数	130
4.2.2 气载源项核素氡剂量分析	134
4.3 铀尾矿氡在大气中迁移的数值模拟	135
4.3.1 CFD 仿真软件——FLUENT	135
4.3.2 矿区地形模型的建立	137
4.3.3 数学模型及计算方法的确定	138
4.3.4 氡迁移的模拟结果分析	141
第 5 章 铀尾矿库降氡覆盖治理	152
5.1 覆土密度对降氡的影响	152
5.1.1 实验方法	152
5.1.2 实验结果	154
5.1.3 覆土密度与氡扩散系数的关系	154
5.1.4 覆土密度与降氡系数的关系	156
5.2 不同覆盖物的降氡效果	157

5.2.1 现场覆盖实验和氡测量	157
5.2.2 不同覆盖物对降氡效果的影响	159
5.3 覆盖物的分形结构特征对降氡的影响	162
5.3.1 实验方法	162
5.3.2 覆盖物粒度分布的分形结构特征	162
5.3.3 覆盖厚度对氡析出率的影响	163
5.3.4 覆盖物分形结构对降氡的影响	166
5.4 铀尾矿覆盖治理优化分析	167
参考文献	169

第 1 章 铀尾矿与氡

1.1 氡的基本性质

1.1.1 氡的理化性质

氡(英文名称 radon, 元素符号 Rn)是 1900 年由德国物理学家 Dorn 发现的, 但作为同位素, 氡则是不止一次被发现(1900~1904 年)。氡的原子序数为 86, 相对原子质量为 222, 是周期表中第 6 周期的零族元素, 是惰性气体族的最后一个元素, 也是自然界最重的气体。

氡是无色、无味的惰性气体, 熔点为 -71°C , 沸点为 -61.8°C , 溶解度为 4.933g/kg 水。在标准压力和 0°C 下, 氡气的密度为 $9.73\text{kg}/\text{m}^3$, 氡在 -65°C 和 101.325Pa 压力下转化为液态, 氡转化为固态的温度为 -113°C 。

氡的熔化热为 $2.89\text{kJ}/\text{mol}$, 汽化焓为 $16.4\text{kJ}/\text{mol}$, 原子体积为 $50.50\text{cm}^3/\text{mol}$, 比热容为 $94\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, 热导率为 $0.00364\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 第一电离能为 $1037\text{kJ}/\text{mol}$, 原子半径为 134pm。

氡的化学性质极不活泼, 没有稳定的核素, 已制得的氡化合物只有氟化氡, 它与氙的相应化合物类似, 但更稳定, 更不易挥发。氡易被橡胶、黏土和活性炭等多孔材料吸附。氡可溶解于水和多种液体中, 也可溶于血液和脂肪中, 尤其是各种油脂和煤油中。

氡的已知同位素有 34 种, 从氡-195 到氡-228。但是大多数同位素的半衰期很短, 不能算为独立同位素。一般所指的氡包括三种天然产生的同位素, 即 ^{222}Rn 、 ^{220}Rn 和 ^{219}Rn 。氡-222 是由铀系的镭-226 衰变而来, 半衰期为 3.825d; 氡-220 是由钍系的镭-224 衰变成的, 又称钍射气(thoron), 半衰期为 55.6s; 氡-219 是由锕铀系中的镭-223 衰变成的, 又称锕射气(actinon), 半衰期为 3.96s。这三种氡同位素都会放出 α 粒子来继续衰变, 产生一系列短寿命的衰变子体, 最终衰变成铅的稳定同位素。三种氡同位素衰变系列的放射性特征和物理参数见表 1-1, 这些参数是进行放射性评价的基础。上述三种氡同位素中, ^{222}Rn 的半衰期最长, ^{220}Rn 和 ^{219}Rn 的半衰期很短, ^{219}Rn 的半衰期仅 3.96s, 因而在环境中含量最高、对人体危害最大, 研究最多的主要是 ^{222}Rn 及其短寿命子体, 在一些特殊场所有少量 ^{220}Rn 的研究。本书中也主要是研究 ^{222}Rn 。

表 1-1 三种天然放射性氡同位素衰变系列的半衰期和衰变类型

元素	同位素	半衰期	衰变类型
²³⁸ U 系:			
铀(uranium)	²³⁸ U	4.47×10 ⁹ a	α(100%)
钍(thorium)	²³⁴ Th	24.10d	β(100%)
镤(protactinium)	²³⁴ Pa	1.17min	β(99.8%), 内部转换
铀(uranium)	²³⁴ U	2.45×10 ⁵ a	α(100%)
钍(thorium)	²³⁰ Th	7.54×10 ⁴ a	α(100%)
镭(radium)	²²⁶ Ra	1600a	α(100%)
氡(radon)	²²² Rn	3.824d	α(100%)
钋(polonium)	²¹⁸ Po	3.05min	α(99.98%), β(0.02%)
铅(lead)	²¹⁴ Pb	26.8min	β(100%)
铋(bismuth)	²¹⁴ Bi	19.9min	α(0.02%), β(99.98%)
钋(polonium)	²¹⁴ Po	164μs	α(100%)
铅(lead)	²¹⁰ Pb	22.3a	β(100%)
铋(bismuth)	²¹⁰ Bi	5.013d	β(100%)
钋(polonium)	²¹⁰ Po	138.4d	α(100%)
铅(lead)	²⁰⁶ Pb	稳定	
²³² Th 系:			
钍(thorium)	²³² Th	1.405×10 ¹⁰ a	α(100%)
镭(radium)	²²⁸ Ra	5.75a	β(100%)
锕(actinium)	²²⁸ Ac	6.15h	β(100%)
钍(thorium)	²²⁸ Th	1.912a	α(100%)
镭(radium)	²²⁴ Ra	3.66d	α(100%)
氡(radon)	²²⁰ Rn	55.6s	α(100%)
钋(polonium)	²¹⁶ Po	0.145s	α(100%)
铅(lead)	²¹² Pb	10.64h	β(100%)
铋(bismuth)	²¹² Bi	60.55min	α(36%), β(64%)
钋(polonium)	²¹² Po	0.299μs	α(100%)
铊(thallium)	²⁰⁸ Tl	3.053min	β(100%)
铅(lead)	²⁰⁸ Pb	稳定	
²³⁵ U 系:			
铀(uranium)	²³⁵ U	7.038×10 ⁸ a	α(100%)
钍(thorium)	²³¹ Th	25.52h	β(100%)

续表

元素	同位素	半衰期	衰变类型
镤(protoactinium)	^{231}Pa	32760a	$\alpha(100\%)$
锕(actinium)	^{227}Ac	21.77a	$\alpha(1.4\%)$, $\beta(98.6\%)$
钍(thorium)	^{227}Th	18.72d	$\alpha(100\%)$
钫(francium)	^{223}Fr	21.8min	$\beta(100\%)$
镭(radium)	^{223}Ra	11.44d	$\alpha(100\%)$
氡(radon)	^{219}Rn	3.96s	$\alpha(100\%)$
钋(polonium)	^{215}Po	1.781ms	$\alpha(100\%)$
铅(lead)	^{211}Pb	36.1min	$\beta(100\%)$
铋(bismuth)	^{211}Bi	2.14min	$\alpha(99.7\%)$, $\beta(0.3\%)$
铊(thallium)	^{207}Tl	4.77min	$\beta(100\%)$
铅(lead)	^{207}Pb	稳定	

注：数据来自 Firestone et al, 1998。

1.1.2 氡的危害

氡是严重的致癌物质。1988 年国际癌症研究机构将氡列为人类致癌物，它是除吸烟以外引起肺癌的第二大因素；世界卫生组织(WHO)公布放射性氡是 19 种人类重要的致癌物之一。

早在 400 多年前的 1546 年，人们就发现了一种怪病(后来称为肺癌)。由于当时对氡的认识不足，将这种怪病称为“斯尼伯格矿山病”。直到 1924 年人们才认识到氡是这种怪病的病因，并于 1951 年被正式确定。人们很早就认识到了地下矿山高氡暴露所带来的健康危险，20 世纪 70 年代人们又开始认识到，非铀矿山也有高氡暴露的危害，到 20 世纪 80 年代人们开始注意环境中的氡暴露问题，一些科学家开始认识到室内氡暴露量可以很高，某些情况下可与很多地下矿山的暴露程度相当，正常的生活环境中的氡也会对人体造成伤害。

氡的“无色、无味、摸不到和看不见”的特殊性质，表征着氡是“隐形”的，或是“无形”的；氡是 A 族致癌物质，是放射性气体，会“杀人”，并被古今中外大量事实所证实。氡是仅次于吸烟能诱发肺癌而死亡的第二大病因；氡还会使人患白血病、骨癌、肾癌等一系列疾病。以下为氡气危害的数据域实例：

(1) 全世界患肺癌死亡的总人数中有 8%~25% 是由于以前吸入空气氡而造成的。

(2) 经流行病学调查，近年来在瑞典、英国和美国等国又发现氡还可以诱发多种白血病。调查研究认为，英国有 12% 的白血病是由氡诱发的。

(3) 1922 年多名考古学家在发掘古埃及金字塔——度唐卡门法老陵墓之后，离奇死去。后来，加拿大和埃及学者经研究发现，考古学家之死是由金字塔石块和泥土内因含高铀而释放高氡所致。

(4) 近年来，我国的媒体也报道“高放射性花岗岩石地板引起不育”、“高放射性花岗岩石洗脸盆引起癌症”、“从事多年石材加工的人患白血病”等。这些很可能是由高铀引起的高氡所致。

美国每年有大约 21 000 人死于因氡引起的肺癌，远高于其他各种因素。因此美国由环保部(EPA)牵头，联合卫生与公共事业部、农业部、能源部、住房与城市建设部等部门开展联邦氡行动计划，发布了公民氡指南，建立了专门的氡防护的网页(<http://www.epa.gov/radon>)。1990 年美国兴起美国国家氡行动周，2002 年美国环保部又指定每年的 1 月为美国氡行动月(NRAM)，通过各种各样的活动来提高公众对氡的认识、促进氡的监测和控制。

大气中的氡及其短寿命衰变产物是人类最主要的天然放射性暴露的来源。联合国原子辐射效应科学委员会(UNSCEAR, 2000, 2008)及一些国家研究机构分析了全球和不同国家各种辐射源对公众暴露的贡献(图 1-1)，在各种来源的辐射中以氡的贡献最大，氡的全球平均年剂量为 $1.2 \sim 1.26 \text{ mSv}$ ，占到全部天然辐照剂量的 40% 以上。不同的国家之间氡的年均剂量有一定的差异。例如，美国的氡年平均剂量为 1.98 mSv ，这可能与地理位置和区域地质特征有关。

氡及其子体对人体健康的危害(生物效应)主要是通过电离和激发来破坏机体的正常机能，以致人体患病致癌。一般来说，射线与生物机体的作用可以是直接的，即直接作用于组成机体的蛋白质、碳水化合物和酵素等而引起电离和激发，并使之原子结构发生变化，引起人体生命过程的改变；也可以是间接作用，即射线与机体内的水分子作用，产生强氧化剂($\cdot \text{OH}$ 等)和强还原剂，破坏机体的正常物质代谢。由于人体质量的 70% 是水，所以后者的破坏性往往比前者要大。

氡对人类健康的影响主要有确定性效应(determination effect)和随机效应(stochastic effect)。确定性效应表现为：在高浓度氡的暴露下，机体出现血细胞的变化如外周血液中红细胞增加，中性白细胞减少，淋巴细胞增多，血管扩张，血压下降，并可见到血凝增加和高血糖。氡对人体脂肪有很高的亲和力，特别是神经系统与氡结合产生痛觉缺失。随机效应主要表现为肿瘤的发生，由于氡是放射性气体，当人们吸入后，氡衰变过程产生的 α 粒子可在人的呼吸系统中造成辐射损伤，特别是氡衰变产物(氡子体)都是固体金属粒子，很容易沉积在支气管树的各种气道壁上，并能在局部区段内不断积累。由于其半衰期更短，可全部在原处衰变，这是大支气管上皮细胞剂量的主要来源，因此大部分氡致肺癌首先就是在这—区段发生。氡致肺癌主要是由氡的短寿命子体所致，如钋-218、钋-214、铋-214 等。

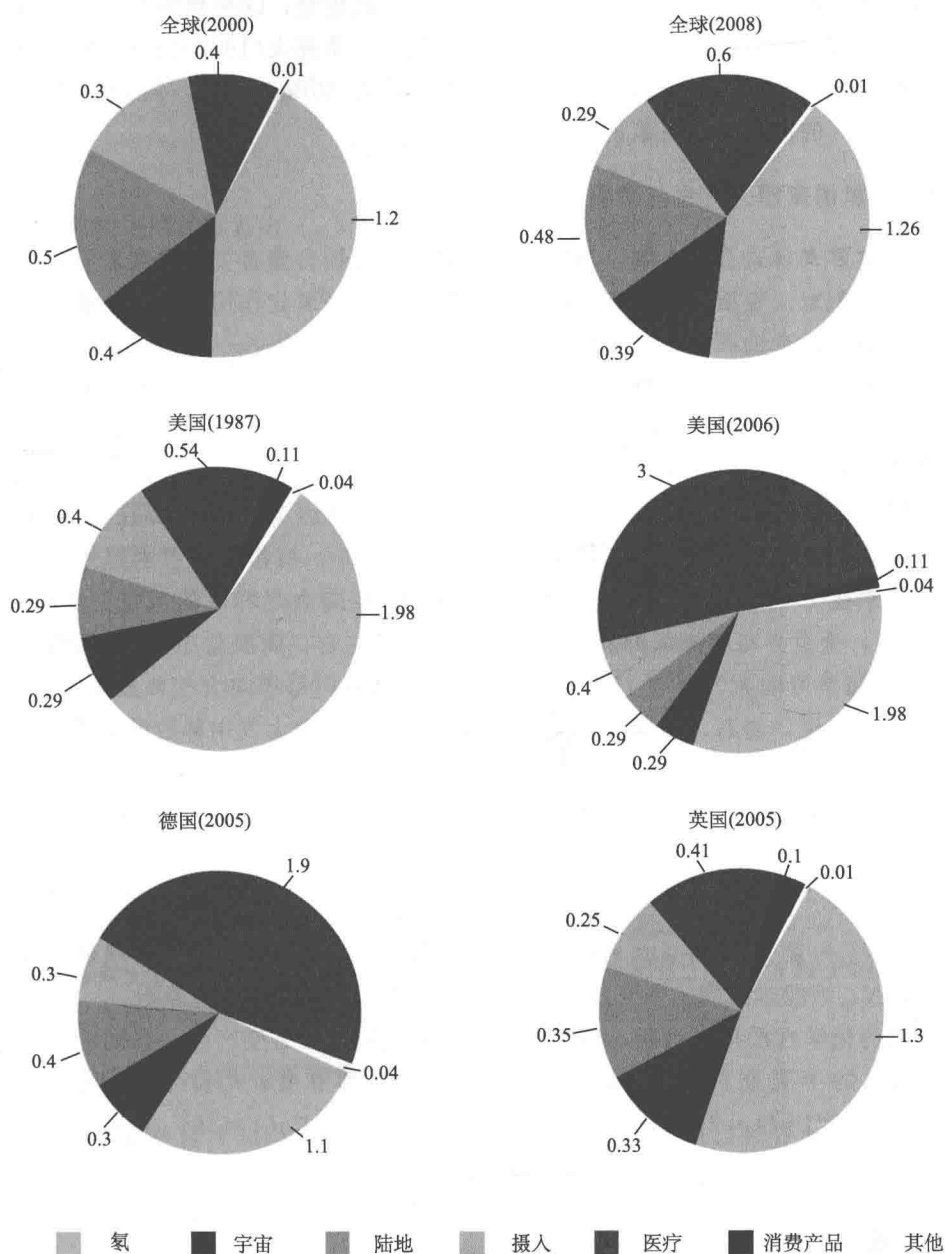


图 1-1 全球和不同国家公众接受的不同来源年平均辐射剂量分布(UNSCEAR, 2008)

高剂量的氡对健康的影响已经众所周知，几个希[沃特](Sv)的剂量会引起多种细胞的损伤，并导致器官破裂和可能的死亡。低剂量的氡也能致病致癌：

①造成细胞损伤但不致死亡；②受损伤细胞可引起癌症；③生殖细胞的损伤可导致遗传效应。同时过低氡环境对人的生存不利。据季托夫(1991)报道，低氡致肺癌一般需15~40a；亨绍认为，当室内氡含量为50Bq/m³时，估计世界上有13%~25%的白血病是由氡诱发的。

1.1.3 氡的来源、产生与聚积

氡主要来自岩石和土壤，氡的释放和氡浓度与铀含量有关。各类岩石包括岩浆岩、沉积岩、变质岩都含有一定的铀和镭，岩石经风化作用和其他地质作用形成的土壤也含有铀和镭，因此氡是无处不在的。植物在生长过程中可吸附土壤中的铀，因而也会释放氡；直接来自岩石、土壤或由岩石、土壤经过加工而成的建筑材料也是氡的来源。一些矿床如铀矿、煤矿、磷酸盐矿等有高的铀含量，可产生高浓度的氡释放。

理论计算表明，陆地释放进入大气的氡每年可达 7.6×10^{19} Bq；海洋、湖泊、河流等地表水每年向大气释放的氡为 8×10^{16} Bq；植物和地下水每年向大气释放的氡在 1×10^{19} Bq量级；铀矿山和水冶厂每年向大气释放的氡也在 1×10^{19} Bq量级；全世界每年燃煤释放的氡在 1×10^{13} Bq左右；磷酸盐工业(包括磷酸盐矿开采)每年可向大气释放 1×10^{14} Bq的氡；建筑材料每年向大气释放氡 1×10^{16} Bq。总的来说，岩石、土壤、矿床及其相关产物每年向大气中释放的氡超过 $n \times 10^{20}$ Bq。

氡是由镭的衰变产生的，根据放射性同位素衰变定律，由镭衰变产生的氡原子数为

$$N_{\text{Rn}} = N_{\text{Ra}}^0 (1 - e^{-\lambda_{\text{Ra}} t}) = N_{\text{Ra}} (e^{\lambda_{\text{Ra}} t} - 1) \quad (1-1)$$

式中， N_{Ra}^0 为衰变前 $t=0$ 时刻镭的原子数， N_{Ra} 为经过时间 t 衰变后剩余的镭原子数， N_{Rn} 为经过时间 t 衰变后产生的氡原子数， λ_{Ra} 为镭的衰变常数。

氡的化学性质很不活跃，但因其是放射性气体，可衰变产生一系列的子体核素。²²²Rn的半衰期为3.825d，是气体，接下去的衰变，顺序生成²¹⁸Po($\lambda = 3.05\text{min}$)、²¹⁴Pb($\lambda = 26.8\text{min}$)、²¹⁴Bi($\lambda = 19.9\text{min}$)、²¹⁴Po($\lambda = 164 \mu\text{s}$)，再衰变生成²¹⁰Pb，其半衰期为22.3a，最后衰变成稳定的²⁰⁶Pb。一般把²¹⁸Po、²¹⁴Pb、²¹⁴Bi、²¹⁴Po统称为氡的短寿命衰变子体，即氡子体。衰变规律为

$$N_{\text{Rn}} = N_{\text{Rn}}^0 e^{-\lambda_{\text{Rn}} t} \quad (1-2)$$

式中， N_{Rn}^0 为氡衰变前的原子数； N_{Rn} 为经过时间 t 衰变后剩余的氡原子数； λ_{Rn} 为氡的衰变常数； t 为衰变时间。氡及其子体构成一组衰变链，整个衰变过程见表1-1。

氡是由镭衰变而来的，又继续衰变成其他子体核素，在此过程中氡不断地积

聚，其规律为

$$\begin{aligned} N_{\text{Rn}} &= \frac{\lambda_{\text{Ra}} N_{\text{Ra}}^0}{\lambda_{\text{Rn}} - \lambda_{\text{Ra}}} (e^{-\lambda_{\text{Ra}} t} - e^{-\lambda_{\text{Rn}} t}) \\ &= \frac{\lambda_{\text{Ra}} N_{\text{Ra}}}{\lambda_{\text{Rn}} - \lambda_{\text{Ra}}} (1 - e^{-\lambda_{\text{Rn}} t}) \end{aligned} \quad (1-3)$$

由于氡的所有同位素都有 $\lambda_{\text{Rn}} \gg \lambda_{\text{Ra}}$ ，因此，上式可简化为

$$N_{\text{Rn}} = \frac{\lambda_{\text{Ra}} N_{\text{Ra}}}{\lambda_{\text{Rn}} - \lambda_{\text{Ra}}} (1 - e^{-\lambda_{\text{Rn}} t}) \quad (1-4)$$

表 1-2 中给出了氡同位素的辐射性质。

表 1-2 氡同位素的辐射性质

同位素	半衰期 ($T_{1/2}$)	衰变常数 (s^{-1})	射线		
			类型	能量(MeV)	空气中的射程(cm)
^{222}Rn	3.824d	2.097×10^{-6}	α	5.481	4.04
^{220}Rn	54.5s	1.272×10^{-2}	α	6.287	4.99
^{219}Rn	3.92s	0.1768	α	6.423(7.5%)	5.56
				6.551(11.5%)	
				6.817(81.0%)	
^{218}Rn	0.03s	23.1	α	7.13(99.8%)	6.01
				6.54(0.16%)	

(自然界丰度 $< 10^{-4}$)

氡的所有子体衰变到 ^{210}Pb 时所发射的 α 粒子能量的总和称为氡子体潜能。单位体积空气中氡子体的 α 潜能为潜能浓度，即潜能值，单位为 J/m^3 。氡子体在衰变过程中发射出 α 、 β 、 γ 三种粒子，都有一定的能量，由于 α 粒子的能量最大，且三种粒子对肺剂量的贡献不同，因此只计 α 粒子的能量。

1.1.4 放射性活度和辐射剂量的测量单位

测量放射性活度和辐射剂量的单位较混乱，辐射单位可以划分为两个主要类别(Nielson et al., 1991; Wilson, 1994) (表 1-3)。

1. 放射性活度

物料的放射性活度采用每单位时间核衰变的数量来测量。因此刻画放射性活度的单位是基于特定体积的放射性物料在单位时间内计数的核衰变。辐射的基本单位和固定单位是居里(Ci)，定义为每秒核衰变的数量，1 居里等于 3.7×10^{10} 衰变数每秒也即 1g 镭的活度。活度也用贝可[勒尔](Bq)为单位测量，定义为放

射性同位素每秒一个核发生衰变。固体物料中放射性核素的比活度是指单位质量物料每秒的核衰变数量(例如, 尾矿样品有 100Bq/kg 的²²⁶Ra)。在氡测量中, 通常采用皮居里每升 (pCi/L), 饮用水标准和水质分析是用 FAI 单位给出(例如, 水样含有 10pCi/L ²²⁶Ra)。

表 1-3 放射性活度与辐射剂量测量单位及其转化关系
(Nielson et al. , 1991; Wilson, 1994; Sharma, 1997)

单位	定义	转化
放射性活度=每单位体积放射性物质单位时间的核衰变数		
Bq	放射性同位素每秒一个原子衰变	1Bq = 27pCi
Bq/kg	放射性同位素每单位质量的比活度	
Ci	1g 镭的活度; 3.7×10^{10} 原子衰变每秒	1Ci = 3.7×10^{10} Bq
Ci/kg	放射性同位素每单位质量的比活度	
pCi/L	水中放射性同位素的比活度	1pCi/L = 37Bq/m ³
R (伦琴)	1cm ³ 干燥空气中产生 1 个静电单位电荷所需要的辐射量	1R/min = 1Ci
辐射剂量=核衰变的生物效应		
Gy(戈[瑞])	吸收的辐射剂量; 对应于每千克的生物物质吸收 1J 的辐射	1Gy = 100rad 1Gy = 1J/kg
Sv	刻画组织损伤的单位; 吸收辐射剂量乘以辐射类型的质量因子和辐射组织的权重因子	1 Sv = 1J/kg 1 Sv = 100rem
rem (雷姆)	人体伦琴当量; 电离辐射等于 1R 高压 X 射线对人的损伤	1rem = 0. 01Sv
rad	每单位质量辐射吸收剂量	1rad = 0. 01J/kg

2. 辐射剂量

使用由生物物质接受的辐射量进行辐射效应评价。个人接受的辐射量是人类健康研究中主要关注的问题。辐射量用辐射剂量来测量, 指每单位生物质量接受的能量的量。rem、rad、gray(Gy)和 sievert(Sv)都是与人相关的辐射效应, 这些单位不是基于纯粹的物理测量, 而是基于辐射研究和统计学。术语“雷姆 (rem)”经常用来描述施加于人类的剂量, 它是取“roentgens equivalent in man”的首字母。rad 是辐射吸收剂量, 被人体组织吸收能量的剂量用 grays (Gy)测量。人体暴露于不同类型的相等剂量辐射中并不一定产生相等的生物效应。1Gy

的 α 辐射比1Gy的 β 辐射的效应大。无论何种辐射类型,辐射效应都用Sv来计量。一般公众的辐射水平和最大允许辐射剂量用每年毫希[沃特](mSv/a)给出。

1.2 铀尾矿与氡的析出

1.2.1 铀矿采冶与铀尾矿的产生

铀是可持续利用核能,是为核反应堆提供燃料的关键元素和原材料。截止到2013年1月,世界上运行的核电机组达437套,总发电装机容量高达371.8GW(e),有68座核电站在建,2012年消耗铀61600t(OECD and IAEA, 2014)。据国际原子能机构作出高值预测,全球核电容量到2030年估计上升到803GW(e),这将意味着每年的平均增长率约为2.5%,就低值预测而言,到2030年,核电容量也将增加到546GW(e)。预计到2035年全世界核电反应堆对天然铀的年需求量将达到138000t左右。

我国正在经历能源的巨大增长,并且正在努力扩大包括核电在内的可再生能源的比重。目前我国核电装机容量为 960×10^4 kW(13套)、在建为 2000×10^4 kW(23套),计划到2020年核电装机容量要达到 7600×10^4 kW、在建 5400×10^4 kW,其发电量占总发电量的比例将达到5%;而核电所占总发电量比例最高的国家法国,其核电所占比例早已经高达78%。

核能的发展必然要求铀矿冶工业稳定持久地发展,而铀矿冶工业必然要产生大量的铀废石、铀尾矿。由于绝大多数铀矿品位较低,因此采出的矿石量基本上等于尾矿量。通常情况下,生产900GW(e)的轻水反应堆(LWR)每年需用20t的金属U燃料(富集到大约4% ^{235}U),大约需要从160t天然铀中来富集生产。假设铀矿品位为0.5%,铀提取率为85%,则每年需要开采铀矿石大约38000t。为提供1000MW(e)轻水堆所需的铀,每年将产生铀尾矿达 6×10^4 t(潘英杰, 1998)。据不完全统计,全世界4300多座铀矿山产生了超过 $9.38 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $2.355 \times 10^9 \text{ t}$ 的铀尾矿(Abdelouas, 2006; UNSCEAR, 2008)(表1-4)。主要产铀国每年产生的铀尾矿量约数千万吨(王志章, 2003)。

表 1-4 世界铀尾矿分布情况(10^6 t)

国家	铀尾矿量	国家	铀尾矿量	国家	铀尾矿量	国家	铀尾矿量
美国	235	加拿大	202.13	澳大利亚	79	德国	174.45
乌克兰	89.5	捷克	89	哈萨克斯坦	165	南非	700
纳米比亚	350	乌兹别克斯坦	60	俄罗斯	56.85	吉尔吉斯斯坦	32.3