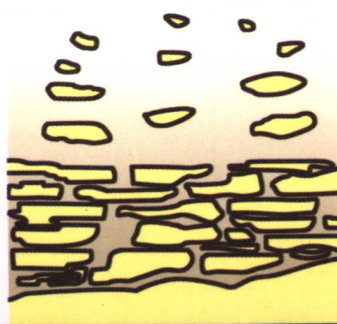
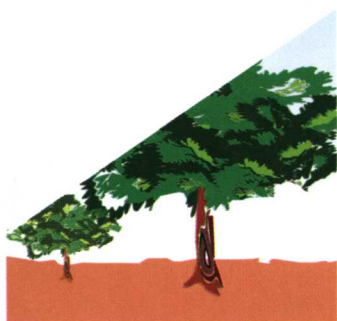
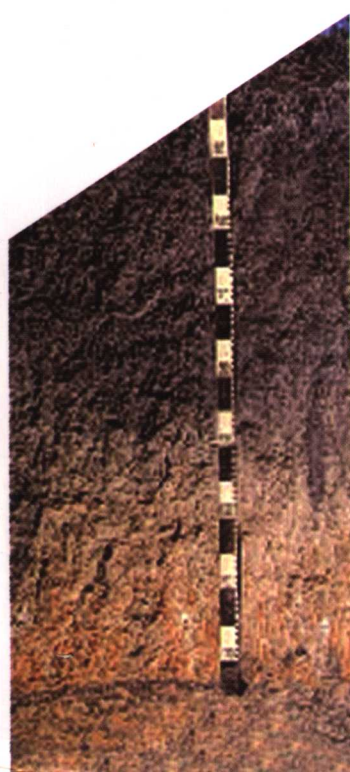


中国土壤氮概况

王喜元 朱立 范光 等 编著
吕磊 王志龙



科学出版社
www.sciencep.com

中国土壤氮概况

王喜元 朱立吕磊 王志龙 范光等 编著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书介绍了2003~2005年由建设部组织完成的“中国土壤氡水平研究”课题的成果。内容主要包括:利用 γ 航测数据进行的全国500万平方公里国土土壤氡浓度换算,参加全国实测调查的18个城市(地区)的土壤氡浓度实测调查,部分国家(地区)开展土壤氡调查和为防止室内氡危害而采取的措施等的调研资料,以及土壤氡检测方法等。

本书是我国第一部全面介绍土壤氡水平研究成果的专著,也是《民用建筑工程室内环境污染控制规范》国家标准的辅助教材,可供建筑工程设计、施工、监理、监督、管理及检测人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

中国土壤氡概况/王喜元等编著. —北京:科学出版社,2006
ISBN 7-03-016791-0

I. 中… II. 王… III. 氡-土壤成分-研究-中国 IV. S153.6

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第003453号

责任编辑:赵峰 李久进 沈晓晶/责任校对:钟洋

责任印制:钱玉芬/封面设计:王浩

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>

源海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

*

2006年8月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2006年8月第一次印刷 印张:18 1/4 插页:4

印数:1~1 800

字数:411 000

定价:48.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

《中国土壤氡概况》参编单位

核工业北京地质研究院
核工业航测遥感中心
昆山市建设工程质量检测中心
清华大学工程物理系
国家建筑工程室内环境检测中心
上海申核电子仪器有限公司
苏州大学
大连市建筑科学研究设计院
甘肃省建筑科学研究院工程质量检测中心
甘肃省建设工程质量监督总站
兰州市建设工程质量监督站
广州市建筑科学研究院
河北省民用建筑工程室内环境质量监督检验站
河南省地球物理工程勘察院
河南省地质科学研究所
南华大学
青海省建筑建材科学研究院
山东省建筑科学研究院
烟台市建筑工程质量监督站
山西省建筑科学研究院建材研究所
上海市建设工程质量检测中心浦东分中心
深圳市建筑科学研究院
通化市建设工程质量监督站检测中心
温州市建筑工程质量检测中心
邢台市建筑工程质量检测中心
江苏煤炭地质勘探研究所
徐州市建设工程检测中心
浙江省建筑科学设计研究院
镇江市建筑科学研究院
镇江市建设工程质量检测中心
舟山市建筑工程质监站检验测试中心

《中国土壤氡概况》

编著成员名单

顾 问	张利民	王善忠	汤三星	丘寿康	邵云森	肖得涛
编著者	王喜元	朱 立	吕 磊	王志龙	范 光	万 骏
	王连俊	吴慧山	黄清波	邹礼规	韩耀照	金 元
	李通福	田清松	马东森	黄 练	丁 巍	高 妍
	梁晓宇	王 雷	王有璇	窦玉祥	单林鸿	牛 牧
	邹庆林	杜晓凡	徐 辉	孟慧超	丁士玲	马 瑞
	郭利斌	耿震岗	李晓峰	张 文	侯松年	丁晋强
	曹清章	安西峰	吴 强	陈天振	冯力强	王 浩
	晏大玮	王玉存	杨云霞	李育敏	李琳琳	李 岩
	田 莉	胡 仁	刘 红	刘海青	陈 彤	何晓萍
	赵 芸	马 荔	殷晓梅	宋建华	刘延廷	张敬鹏
	张谷春	刘艳秋	曾 雁	彭永征	李书恒	梅 菁
	董 荣	徐忠昆	潘 红	陈玮廉	陆晓峰	华洁良
	游劲秋	邓淑娟	刘 全	杨毕华	蔡克剑	陈江意
	夏 森	梅爱华	李晓坤	李耀辉	郭志坚	符 适
	周冬林	马伟诚	王加民	刘小松	程方平	黄晓天
	王倩雪	肖理中	吴文保	李 明		

前 言

室内氡是《民用建筑工程室内环境污染控制规范》国家标准(GB 50325—2001)中控制的 5 种污染物之一。国内外大量研究结果表明,土壤氡是室内氡的主要来源之一。因此,为控制室内氡污染,《民用建筑工程室内环境污染控制规范》要求在工程勘察设计阶段进行土壤氡测量。

由于我国过去没有进行过全国性的土壤氡浓度调查,没有全面的土壤氡浓度背景资料,也未制定土壤氡检测的国家标准,加上在编制《民用建筑工程室内环境污染控制规范》过程中,时间要求紧,因此,其中关于土壤氡检测的有关内容和要求也就不够具体,不够规范,这些给执行带来了不少困难和不确定性。除此之外,《民用建筑工程室内环境污染控制规范》发布后,实际工程检测中提出了许多新的问题,这些问题也需要进行研究和解决。就是在这种背景下,建设部于 2003 年开始组织进行了“中国土壤氡水平研究”课题专项研究工作,希望通过此课题回答我国土壤氡浓度本底值问题,以及如何控制土壤氡危害和如何确定土壤氡检测方法等问题,并以此研究为基础,拟对《民用建筑工程室内环境污染控制规范》进行进一步修改完善。

本课题由河南省建筑科学研究院及国家建筑工程室内环境检测中心组织管理,牵头单位是核工业北京地质研究院。

“中国土壤氡水平研究”课题包括以下几方面内容:

(1) 国外土壤氡浓度研究资料调研,即调研发达国家(美国、原苏联、欧盟等)进行国土土壤氡调查的技术资料以及为防止室内氡危害而对建设规划制定的有关标准、规定等。本项研究的负责单位是核工业北京地质研究院。

(2) 收集整理我国核工业系统 γ 航测数据历史资料,进行土壤气氡浓度换算,争取绘制出全国土壤气氡浓度分布图,统计全国(或部分地区)土壤气氡浓度平均值,研究“土壤氡-室内空气氡浓度的关联性”,提出须进行工程处理的土壤氡异常限量值建议(或倍数)。本项研究的负责单位是核工业航测遥感中心。

(3) 组织全国 18 个城市(地区)(东、西、南、北、中)参加,对当地进行网格化土壤氡浓度测量,实际考察全国土壤氡浓度情况,并与航测数据相对照,相互印证。参加本项研究的有:上海(浦东)、昆山、温州、广州、深圳、兰州、太原、大连、邢台、郑州、烟台、徐州、石家庄、通化、杭州、舟山、西宁、镇江 18 个城市(地区)。为保证实测调查质量,事先制定了工作方案,要求在城市区域基本上按 $2\text{km} \times 2\text{km}$ 网格布点,每个城市根据区域面积大小,布置 50~100 个测点不等,统一检测仪器和检测方法,同时,收集当地土壤镭、钍、钾含量资料(全国环境保护系统 20 世纪 80 年代数据)和地质构造资料,分别编写出当地土壤氡本底检测报告。该课题的牵头单位是昆山市建设工程质量检测中心,技术负责单位是清华大学工程物理系。

(4) 地下水位表浅地区土壤氡检测方法研究(以发现土壤氡浓度异常值为目标),参加本项研究的有核工业航测遥感中心、苏州大学。

(5) 对现有土壤氡检测仪器(以 FD 3017 型土壤氡检测仪为主)进行改进,负责单位是上海申核电子仪器有限公司。

由于缺少经费支持,加上课题工作量大,完成课题的难度可以想见。各参加单位除了尽量利用历史资料和已有研究成果外,在财力、人力、物力上给予了大力支持,大家把完成课题任务视为为国家、社会做贡献的行动,许多人在风吹日晒中进行野外作业,不计报酬,任劳任怨,兢兢业业。可以说,本课题凝结着全体参加人员的劳苦和心血。在课题进行过程中,建设部柴文忠处长、杨瑾峰处长给予了关心和支持,国家建筑工程室内环境检测中心的领导及许多同志给予了支持和帮助,在本书即将出版的时候,谨对他们表示深深地感谢。

本书是在课题研究成果基础上,经补充部分资料后编写完成的,在课题研究与本书编写过程中,参阅了大量同行的研究成果,未一一列出,在此表示感谢,并请谅解。本书相当于“中国土壤氡水平研究”课题的成果汇编,各章节内容基本上由课题承担单位编写。可以这样说,没有“中国土壤氡水平研究”课题的完成,也就没有本书。本书主编是课题的主要负责成员,编委由承担子课题任务的各省市检测单位负责人员组成。

本书编写分工如下:第1章,吕磊、黄清波、邹礼规、江成泽、杜英民、何强;第2章2.1节,李通福、田清松、马东森、黄练、丁巍、高妍、梁晓宇,2.2节,王雷、王有璇、窦玉祥、单林鸿、牛牧、邹庆林,2.3节,杜晓凡、徐辉、孟慧超,2.4节,丁士玲、马瑞、郭利斌,2.5节,耿震岗、李晓峰、张文、侯松年、丁晋强,2.6节,曹清章、安西峰、吴强、陈天振,2.7节,冯力强、王浩、晏大玮、王玉存、杨云霞、李育敏、李琳琳、李岩、田莉,2.8节,胡仁、刘红、刘海青、陈彤、何晓萍、赵芸、马荔,2.9节,殷晓梅、宋建华、刘延廷、张敬鹏,2.10节,张谷春、刘艳秋、曾雁、彭永征,2.11节,王志龙、金元、李书恒、梅菁、董荣,2.12节,徐忠昆、潘红、陈玮廉、陆晓峰、华洁良,2.13节,游劲秋、邓淑娟、刘全,2.14节,杨毕华、蔡克剑,2.15节,陈江意、夏森,2.16节,梅爱华、李晓坤,2.17节,李耀辉、郭志坚、符适,2.18节,周冬林、马伟诚、王加民,最后由朱立、王志龙、金元统稿;第3章,吴慧山、范光、刘汉彬;第4章,万骏、黄清波、邹礼规、王连俊、韩耀照、刘小松、王喜元;第5章,王喜元、范光、吕磊、朱立。最后,由王喜元统稿。

《中国土壤氡概况》所提供的研究成果,应当说是初步的,今后,随着研究工作的逐步深入和土壤氡工程检测资料的不断积累,将会增加人们对我国土壤氡情况的了解,我国土壤氡危害的防治工作也将会逐步开展起来。

国家建筑工程室内环境检测中心

王喜元

2005年11月

目 录

前言

第 1 章 利用航测土壤铀含量换算土壤氡浓度的研究	1
1.1 航空放射性方法测铀原理概述	2
1.1.1 航空 γ 能谱测量的物理基础	3
1.1.2 铀、钍、钾含量的计算方法	5
1.1.3 谱段选择的主要原则	7
1.1.4 256 道航空 γ 能谱测量系统的主要技术指标	7
1.1.5 航空 γ 能谱仪的校正(标定)测试	8
1.1.6 航空放射性测量飞机的选择及测量比例尺	15
1.1.7 航空 γ 测量的影响因素	16
1.1.8 航测成果的解释	18
1.2 土壤铀-氡换算方法	19
1.2.1 有关专业名词的定义	19
1.2.2 土壤自由氡(气氡)的迁移作用	21
1.2.3 土壤类型划分标准及城市土壤类型的确定	21
1.2.4 航测资料中当量铀含量-镭含量的换算	22
1.3 本课题的研究内容和成果	24
1.3.1 研究内容	24
1.3.2 研究成果	26
1.3.3 决定土壤氡浓度背景值的主要因素	28
1.3.4 144 个城市土壤氡背景值计算结果	29
1.3.5 19 个城市土壤氡背景值计算结果与实测结果的比较	32
1.3.6 城市建筑工地土壤氡浓度防护控制	34
1.3.7 结论与建议	35
第 2 章 全国部分城市土壤氡浓度实测调查	37
2.1 吉林省通化市土壤氡浓度调查报告	37
2.1.1 通化市区的地质构造及土壤概况	37
2.1.2 土壤氡浓度测量点布置及测量方法	40
2.1.3 土壤氡浓度测量结果	40
2.2 辽宁省大连市土壤氡浓度调查报告	43
2.2.1 大连市区地质构造及土壤概况	43
2.2.2 土壤氡浓度测量点布置及测量方法	48
2.2.3 土壤氡浓度测量结果	49
2.3 河北省石家庄市土壤氡浓度调查报告	51

2.3.1	石家庄市地质构造及土壤概况	52
2.3.2	土壤氡浓度测量点布置及测量方法	58
2.3.3	土壤氡浓度测量结果	59
2.4	河北省邢台市土壤氡浓度调查报告	63
2.4.1	邢台市区地质构造及土壤概况	63
2.4.2	土壤氡浓度测量点布置及测量方法	66
2.4.3	土壤氡浓度测量结果	67
2.5	山西省太原市土壤氡浓度调查报告	69
2.5.1	太原市区地质构造及土壤概况	69
2.5.2	土壤氡浓度测量点布置及测量方法	70
2.5.3	土壤氡浓度测量结果	71
2.6	河南省郑州市土壤氡浓度调查报告	74
2.6.1	郑州市测区地质构造及土壤概况	74
2.6.2	土壤氡浓度测量点布置及测量方法	75
2.6.3	土壤氡浓度测量结果	77
2.7	甘肃省兰州市土壤氡浓度调查报告	84
2.7.1	兰州市区的地质构造及土壤概况	84
2.7.2	土壤氡浓度测量点布置及测量方法	85
2.7.3	土壤氡浓度测量结果	86
2.8	青海省西宁市土壤氡浓度调查报告	88
2.8.1	西宁市区地质构造及土壤概况	89
2.8.2	土壤氡浓度测量点布置及测量方法	89
2.8.3	土壤氡浓度测量结果	90
2.9	山东省烟台市土壤氡浓度调查报告	95
2.9.1	烟台市区的地质构造及土壤概况	96
2.9.2	土壤氡浓度测量点布置及测量方法	101
2.9.3	土壤氡浓度测量结果	101
2.10	江苏省徐州市土壤氡浓度调查报告	103
2.10.1	徐州市区地质构造及土壤概况	104
2.10.2	土壤氡浓度测量点布置和测量方法	104
2.10.3	土壤氡浓度测量结果	105
2.11	江苏省昆山市土壤氡浓度调查报告	107
2.11.1	昆山市区地质构造及土壤概况	107
2.11.2	土壤氡浓度测量点布置及测量方法	108
2.11.3	土壤氡浓度测量结果	108
2.12	上海市浦东新区土壤氡浓度调查报告	110
2.12.1	上海浦东地区地质构造及土壤概况	111
2.12.2	土壤氡浓度测量点布置及测量方法	112
2.12.3	土壤氡浓度测量结果	112

2.13	浙江省杭州市土壤氡浓度调查报告	114
2.13.1	杭州市区的地质构造及土壤概况	115
2.13.2	土壤氡浓度测量点布置及测量方法	115
2.13.3	土壤氡浓度测量结果	116
2.14	浙江省温州市鹿城区土壤氡浓度调查报告	120
2.14.1	温州市区的地质构造及土壤概况	120
2.14.2	土壤氡浓度测量点布置及测量方法	121
2.14.3	土壤氡浓度测量结果	122
2.15	浙江省舟山市土壤氡浓度调查报告	124
2.15.1	舟山市区的地质构造及土壤概况	124
2.15.2	土壤氡浓度测量点布置及测量方法	125
2.15.3	土壤氡浓度测量结果	127
2.16	广东省广州市土壤氡浓度调查报告	129
2.16.1	广州市区的地质构造及土壤概况	129
2.16.2	土壤氡浓度测量点布置及测量方法	134
2.16.3	土壤氡浓度测量结果	135
2.17	广东省深圳市土壤氡浓度调查报告	137
2.17.1	深圳市区的地质构造及土壤概况	138
2.17.2	土壤氡浓度测量点布置及测量方法	141
2.17.3	土壤氡浓度测量结果	143
2.18	江苏省镇江市土壤氡浓度调查报告	147
2.18.1	镇江市区的地质构造及土壤概况	147
2.18.2	土壤氡浓度测量点布置及测量方法	149
2.18.3	土壤氡浓度测量结果	149
第3章	欧美及亚洲部分国家和地区土壤气氡检测与危害控制进展	152
3.1	土壤气氡与室内氡关联性资料和论点	152
3.1.1	氡的来源	152
3.1.2	土壤气氡与室内氡的关联性与例证	154
3.1.3	小结	174
3.2	土壤气氡产生的机理	175
3.2.1	土壤气氡简介	175
3.2.2	氡的性质	175
3.3	土壤气氡检测方法	177
3.3.1	若干名词概念	177
3.3.2	测量时应注意的几个问题	178
3.3.3	测量点的布置	178
3.4	氡的危害、防护及对建设规划的要求	178
3.4.1	关于氡的危害	178
3.4.2	关于防氡降氡	179

3.4.3 关于建筑工程防氡施工	179
3.4.4 防氡降氡对建设规划的要求	180
3.4.5 对土壤气氡限量标准的思考	180
第4章 土壤氡浓度及土壤表面氡析出率测量方法	185
4.1 土壤气氡测量	185
4.1.1 土壤气氡测量基本原理	185
4.1.2 土壤气氡浓度测量方法	191
4.1.3 常用的土壤氡测量仪器	199
4.2 土壤表面氡析出率测量	209
4.2.1 使用 HDC-C 型测氡仪进行氡析出率测量	209
4.2.2 使用活性炭盒法进行氡析出率测量	212
4.2.3 使用抽气式测氡仪进行土壤氡析出率测量	218
4.2.4 氡析出率测量标准装置	219
第5章 防治土壤氡危害的对策措施	221
5.1 防止土壤氡危害的一般对策措施	221
5.1.1 工程勘察设计阶段的工地土壤氡调查	221
5.1.2 土壤氡浓度超过一定程度($50\,000\text{Bq/m}^3$)时的回填土处理	226
5.1.3 土壤氡浓度超过一定程度时的建筑物基础防氡处理	226
5.1.4 其他防氡施工措施	239
5.2 发现土壤氡影响后的对策措施	239
5.2.1 寻找土壤氡进入室内的入口及原因分析	240
5.2.2 治理措施	241
附件	243
附件1 《中国土壤氡水平研究》鉴定意见	243
附件2 《中国土壤氡水平研究》课题实施方案(讨论稿)	244
附件3 全国部分城市土壤氡浓度调查实施方案与质量保证	246
附件4 建筑物表面氡析出率的活性炭测量方法 (GB/T 16143—1995)	248
附件5 美国环境保护局出版物(EPA 402-k-00-008 2000年7月 空气与放射性 (6609-j))	253

彩版

第 1 章 利用航测土壤铀含量换算土壤氡浓度的研究

我国核工业系统利用航空放射性测量方法找铀矿资源已有 50 年的历史, 在 50 年的历史进程中积累了大量的地表岩石、土壤的铀含量数据, 这些数据涵盖了绝大部分国土面积, 是十分宝贵的信息资料。在改革开放的今天, 这些宝贵的信息资料除了继续应用于国防建设和核电建设外, 还广泛应用于勘探石油、天然气、钾盐、金矿及环境评价等诸多领域。国外在利用航空放射性测量数据推测土壤中氡气浓度方面的研究开展得比较早, 美国已经用铀含量数据做出了全国土壤氡浓度背景水平分布图, 但具体做法尚未见详细报道。

利用航测的土壤铀含量换算土壤氡浓度是否可行, 换算结果是否可靠? 回答是: 宏观上可行, 微观上不可行。也就是说, 利用一个地区的大面积的铀含量数据平均值(区域背景值)换算成土壤氡浓度平均值(区域平均值)是可行的, 因为氡(本书所说的氡均指 ^{222}Rn , 在环境评价中, 所说的氡浓度, 如无特别说明, 也是指 ^{222}Rn 的浓度)是铀的衰变产物, 铀是氡的唯一来源。从宏观上来看, 土壤中氡与铀之间有紧密的联系, 铀含量高的地区, 其土壤氡浓度背景水平也高, 反之亦然。诚然, 一个地区、一个城市的土壤氡浓度的总体水平(区域背景值)受许多因素的影响和制约, 但其中起主要作用的是它的土壤铀含量的总体水平(区域背景值)和土壤类型两大因素。铀含量决定土壤氡的总量(自由氡和束缚氡), 铀含量与氡的总量之间有固定的比例系数。我们用测氡仪器只能测到土壤中的自由氡, 而不是土壤中氡的总量。土壤中的铀含量与土壤自由氡浓度之间的比例系数不是固定不变的, 它随着土壤类型的改变而变化, 即不同类型的土壤有不同的比例系数。只要了解了一个地区的土壤类型, 就可粗略地计算出土壤自由氡浓度与土壤铀含量的比例系数, 进而由铀含量区域背景值换算出土壤氡浓度区域背景值。只要面积足够大, 数据量足够多, 土壤类型清楚, 相关参数设定合理, 换算结果就是可靠的或比较可靠的。

对于一个测点或建筑工地来说, 利用土壤铀含量换算得到的土壤氡浓度与实测值相比可能会存在较大的差异, 特别是处于断裂构造带上的测点或建筑工地, 甚至可能会产生几倍到几十倍的差异, 因为断裂构造带上的土壤氡浓度不仅与地表浅层土壤的铀含量有关, 还更多的与深部氡源有关。所以, 用一个建筑工地的土壤铀含量换算它的土壤氡浓度是不可行的。

本课题的研究工作用了一年的时间, 先后查阅了 100 多份航测资料和 30 多份地质报告, 参阅了国内外的有关文献及教科书, 整理计算了 65 万个数据, 编制了成果图件, 涉及国土面积 500 万 km^2 。最后计算了 144 个城市的土壤氡浓度平均值(背景值), 划分出土壤氡高背景城市 17 个, 中背景城市 101 个, 低背景城市 26 个; 同时统计了全国土壤氡浓度平均值, 获得了全国土壤氡浓度背景水平的新资料; 编制了中国土壤氡背景概略图, 圈定出土壤氡高背景区 11 片, 低背景区 14 片, 提出了土壤氡防护控制工作的重点关注地区, 对全国土壤氡检测工作的开展和总体部署提供了有价值的资料。

1.1 航空放射性方法测铀原理概述

地球中存在的天然放射性元素主要有铀系和钍系元素以及不成系列的 ^{40}K (钾的同位素)。铀(^{238}U)和钍(^{232}Th)分别要经过 14 代和 10 代衰变后才变成稳定的同位素,在变成稳定的同位素之前的各代衰变所产生的子体均为放射性元素。 ^{40}K 在衰变后即变成稳定的同位素。天然放射性元素在衰变时放出 α 或 β 射线,并伴随放出 γ 射线。不同放射性元素放出射线的能量存在着大小差异,基于这种差异,就可通过测量射线的能量和单位时间测得的相应能量射线的数量,达到定量测定待测放射性元素的目的。

α 、 β 射线穿透能力小,在大气中很快湮灭,而 γ 射线的穿透能力强,在大气中可穿过 100~200m 厚度。因而航空天然放射性测量采用 γ 射线的测量仪器,通常是以碘化钠 $[\text{NaI}(\text{TI})]$ 晶体为探测器的 γ 能谱仪。由于空气对 γ 射线的吸收,航测时飞行高度越高,被空气吸收的射线所占比例也就越大。为达到合适的测量灵敏度,其测量高度要求在 120m 以下。探测仪器的体积庞大(见图 1-1),我国从 20 世纪 80 年代以来所采用的仪器,其探测器(碘化钠晶体)的体积分别为 2048in^3 (直升机)和 3072in^3 (固定翼飞机)。

航测仪一般由以下几部分组成:全球卫星定位系统(GPS)、放射性探测系统、高精度航空大地磁测系统、高度测量系统(雷达高度、气压高度)、地形监视系统(录像)、电源系统、数据存储系统等。

GPS:保证飞机按预定航线飞行,精度一般在 20m 左右。要求飞行员控制飞行速度在 60m/s 左右。如果飞行速度过快, γ 射线强度曲线会由于航测仪的惰性时间的存在而发生畸变,峰形变平变宽,峰位向飞行方向偏移。



图 1-1 GR-820 型航空地球物理综合测量系统(美国产)

高度测量系统:雷达高度是飞机到地面的实际飞行高度,气压高度是海拔高度。在实际飞行中不可能将飞机完全控制在同一高度,故在后续的数据处理中还要用雷达高度、气压高度对数据进行修正。

放射性探测系统:为了提高探测的灵敏度,航测仪晶体的体积都很庞大,两箱或三箱下测晶体主要用于对地面进行测量,1/4 箱上测晶体主要用于对宇宙射线的测量。能谱稳峰方式可用自然峰进行稳峰,也可以用恒温方式稳峰,且在后续的数据处理时还可对

峰漂进行修正。采集的放射性能谱数据为 256 道。

高精度航空大地磁测系统：一般分为磁总量测量(1 个磁探头)和梯度测量(2 个或 4 个磁探头)。梯度测量的精度要大于总量测量，可分为水平梯度和垂直梯度。磁数据对金属矿床比较敏感，对地质构造也有很好的反映，在地质勘查中是一个重要的勘查手段。

地形监视系统：对地面进行实时录像，使物探解释人员对地面的植被覆盖、岩层裸露、水系、高压电线(对磁测影响较大)等有一个全面的了解。同时，在对航测异常进行地面检查时，有了图像资料就更容易找到异常位置。

数据存储系统：对采集的数据按一定的格式进行存储。主要有以下几种参数：操作员编号、时间、测线号、基点号、GPS 数据、雷达高度、气压高度、温度、磁测数据、放射性测量数据。存储介质为磁带或是硬盘。

航空放射性测量仪器每年都要进行严格地检定和校正测试，以消除大气氡、宇宙射线、飞机仪表放射性、飞行高度、康普顿散射对测量数据的影响，确保测量结果准确可靠。

航空 γ 测量的主要优点是速度快、成本低。主要缺点是因离地距离大，对地面放射场变化的分辨能力较低，使得异常层宽，幅度显著降低。

采用航空 γ 能谱仪测量地表岩石和土壤中的铀含量，实际上通常是通过测量 ^{214}Bi 放射的 γ 射线来实现的。 ^{214}Bi 是铀的第九代子体，是整个铀系列中 γ 射线份额最高的元素，特别是其产生的能量为 1.764MeV、1.120MeV、0.609MeV 等的射线，不仅相对份额大，构成了铀系 γ 射线谱的相对最为突出的特征能量峰，而且易与钍系和 ^{40}K 所产生的特征能量峰区别开。

按照放射性衰变规律，铀与其后各代放射性子体达到放射性平衡后，铀与其后各代放射性元素的原子数目的比例是固定的。如果铀系各代放射性元素各与上一代母体元素均未发生位置上的分离，则测定其中任一代元素的量均可达到测定各代元素的量的目的(钍系也是如此)。因此，在铀矿勘查和天然放射性环境调查中，以 ^{214}Bi 产生的 γ 射线探测铀系元素的 γ 能谱方法是最常用的方法之一。在以勘查铀矿为目的的 γ 能谱测量中，测量结果常以铀的含量来表示，而在天然放射性环境评价中则常以镭的含量来表示。但是，在自然环境下，由于地球物理作用和地球化学作用，母体与子体元素会在不同的程度上发生分离，当分离距离过大时，测量一个部位的某代元素的量，就不能准确代表其他代元素的量。在地表条件下，这种分离虽然是普遍的，但往往并不是很严重，采用探测 ^{214}Bi γ 射线的方法在地面和空中测定地表土壤和岩石中铀含量仍然具有评价所要求的可靠性。

应当指出，镭(^{226}Ra)是铀系的第六代元素，其化学性质与铀有较大的差异，相对来说，二者更易发生分离。而 ^{214}Bi 是 ^{226}Ra 的第四代子体，且与其前面的三代子代(^{222}Rn 、 ^{218}Po 、 ^{214}Pb)均为短寿子体，镭与这些短寿子体在很短时间(38.25d)就可达到放射性平衡。因而，基于探测 ^{214}Bi γ 射线的 γ 能谱方法能更真实地测定镭的含量，铀矿勘查中将其测量结果以铀含量表示，实际上是假设在平衡条件下由测得的镭含量再经固定比例转换得到的，所以又通常将该方法得到的铀含量称为当量铀含量。

1.1.1 航空 γ 能谱测量的物理基础

航空 γ 能谱测量就是利用铀系、钍系和钾的 γ 能谱存在一定的差异，选择合适的特征谱峰和谐段，通过测量空中的不同能谱的 γ 射线强度来确定岩石(或土壤)中的铀、钍、钾

的含量。从图 1-2 中可以看出，地表岩石或矿石的 γ 射线经过 120m 空气的吸收后，仍能保持铀系和钍系的部分特征 γ 能峰及 ^{40}K 的特征峰。图 1-3 也表明，地表岩石中的铀、钍、钾所产生的 γ 射线穿过的空气层高度增加，计数率虽然降低了，但在 100m 的高度范围内谱成分变化不大，几个特征峰依然存在且清晰可辨。因此就可能利用这一特点测定空中不同 γ 特征峰的 γ 射线强度来发现地表的铀、钍、钾放射性元素并确定其含量。

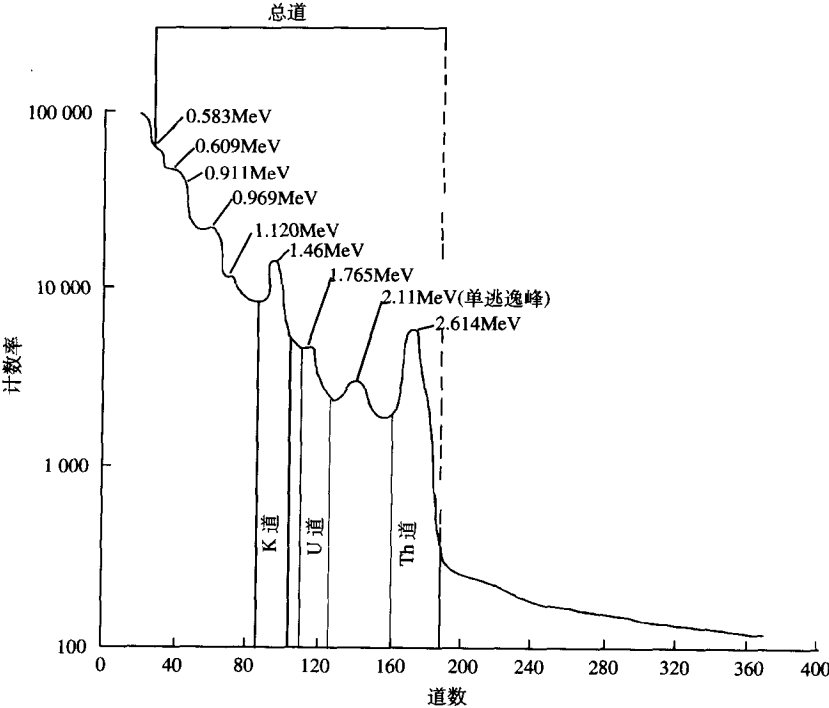


图 1-2 120m 高度上实测的 γ 谱

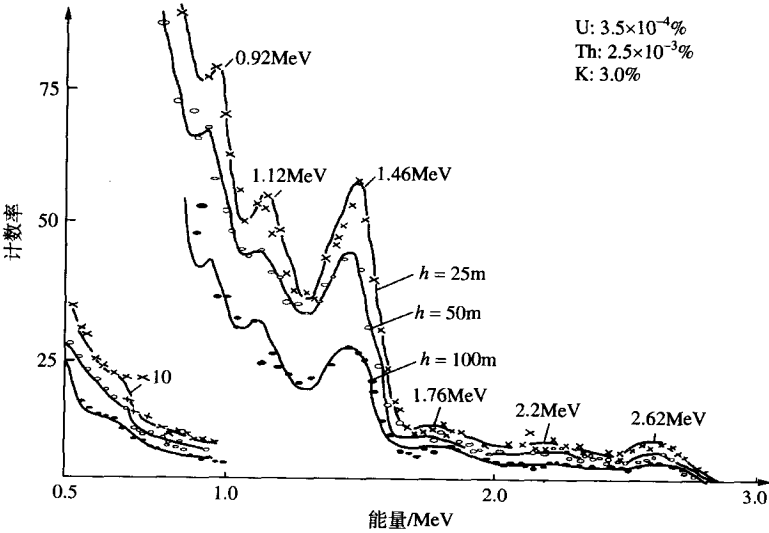


图 1-3 均匀花岗岩表面不同高度上的 γ 射线谱

1.1.2 铀、钍、钾含量的计算方法

当飞机在空中任意一点时, 仪器测得的 γ 射线强度由以下几部分组成:

$$I_{\text{测}} = I_{\text{仪}} + I_{\text{宇}} + I_{\text{空}} + I_{\text{地}} \quad (1-1)$$

式中: $I_{\text{仪}}$ ——仪器和飞机本身的 γ 射线强度;

$I_{\text{宇}}$ ——宇宙射线强度;

$I_{\text{空}}$ ——空气中放射性元素引起的 γ 射线强度;

$I_{\text{地}}$ ——地面放射性物质引起的 γ 射线强度。

宇宙射线强度是由来自宇宙空间的高能辐射产生的, 随海拔变化, 海拔越高其值越大。由于地磁对宇宙射线的作用, 两极的宇宙射线强度要比赤道的高 1.14 倍。

空气中放射性元素引起的 γ 射线强度主要是大气中氡的衰变子体 ^{214}Bi 产生的射线强度。 ^{214}Bi 正是铀系中最主要的 γ 辐射体, 如果大气中存在有较高浓度的氡时, 会给航空 γ 能谱测量的结果带来较大的误差。

因此, 在数据处理时就要对大气氡进行修正, 扣除宇宙射线、仪器本底以及空中的放射性元素的影响, 再计算含量(表 1-1)。

表 1-1 离地面不同高度氡浓度的相对变化

高度/m	0	1	10	100	1000	2000
氡浓度/相对单位	100	96	90	73	49	25

现用航空 γ 能谱仪一般为 256 道, 可以将自然界中大多数放射性元素的特征峰较好地分开。用放射性元素特征峰的 γ 强度进行含量计算, 是一种精度较高的物理测量方法。如果各种放射性元素按克拉克值进行 γ 射线总强度计算, 其中 ^{40}K 的 γ 射线相对强度约占 40%, 平衡钍系占 32%, 平衡铀系及锕系占 25%。一般用 3 个能窗的计数进行铀、钍、钾含量的计算, 各能窗选择的谱段如表 1-2 所示。

表 1-2 航空 γ 能谱仪能窗的谱段选择

探测器	能窗	能量峰/MeV	能量范围/MeV	窗宽范围/keV
下测探测器	总窗 1		0.20~3.00	18~254
	总窗 2		0.40~3.00	34~254
	钾窗	1.46	1.36~1.60	116~132
	铀窄窗	1.76	1.67~1.87	141~157
	铀宽窗	1.12+1.76+2.19	(1.04~1.20)+(1.66~2.43)	(88~101)+(140~204)
	钍窗	2.62	2.42~2.83	204~237
	宇宙射线窗		3.01~6.00	255
上测探测器	总窗 1		0.2~3.00	18~254
	铀窄窗	1.76	1.67~1.87	141~157
	铀宽窗	1.12+1.76+219	(1.04~1.21)+(1.65~2.43)	(88~101)+(140~204)
	宇宙射线窗		3.01~6.00	255

注: 上测探测器主要是用来测量宇宙射线和空中 ^{214}Bi 以消除干扰, 铀宽窗是为了提高测量灵敏度而设置的。

根据以上 3 个元素特征峰的能窗计数, 可列出以下方程组:

$$\begin{cases} N_1 = a_1 Q_U + b_1 Q_{Th} + c_1 Q_K \\ N_2 = a_2 Q_U + b_2 Q_{Th} + c_2 Q_K \\ N_3 = a_3 Q_U + b_3 Q_{Th} + c_3 Q_K \end{cases} \quad (1-2)$$

式中: N_1 、 N_2 、 N_3 ——分别为钾、铀、钍 3 个能窗的计数率(除去了本底计数率);

Q_U 、 Q_{Th} 、 Q_K ——分别为岩石(土壤)中的铀、钍、钾含量, 其单位分别为 ppmeU、ppmeTh^①、%;

a_i 、 b_i 、 c_i ($i=1, 2, 3$)——分别表示铀、钍、钾饱和和标定模型上测得的单位 U、Th、K 含量在相应道中的计数率, 称为换算系数。

从钾的能窗上看, 它不可能在铀、钍的能窗中产生计数, 故 $c_2 = c_3 = 0$, 代入式(1-2)中, 并整理, 可得

$$\begin{cases} N_1/a_1 = Q_U + \gamma_1 Q_{Th} + \beta_1 Q_K \\ N_2/a_2 = Q_U + \gamma_2 Q_{Th} \\ N_3/a_3 = Q_U + \gamma_3 Q_{Th} \end{cases} \quad (1-3)$$

式中: $\gamma_1 = b_1/a_1$, $\gamma_2 = b_2/a_2$, $\gamma_3 = b_3/a_3$ ——分别表示钾、铀、钍道中钍的铀当量;

$\beta_1 = c_1/a_1$ ——表示钾道中的钾的铀当量。

由式(1-3)可以看出, 当 $\gamma_1 = \gamma_2$ 时, 方程无解。当 $\gamma_1 \neq \gamma_2$ 时, 方程有确定解, 且 $C = \gamma_1/\gamma_2$ 时, 值愈大, 方程组的解愈稳定。 C 称为铀、钍的区分系数, 主要决定于仪器能窗的选择和探测器对射线能量的分辨率。解方程组(1-3)可得

$$\begin{cases} Q_K = F_1(N_1 - R_1 N_2 - R_2 N_3) \\ Q_U = F_2(N_2 - R_3 N_3) \\ Q_{Th} = F_3(N_3 - R_4 N_2) \end{cases} \quad (1-4)$$

式中: $F_1 = 1/C_1$;

$F_2 = b_3/(a_2 b_3 - a_3 b_2)$;

$F_3 = a_2/(a_2 b_3 - a_3 b_2)$;

$R_1 = (a_1 b_3 - b_1 a_3)/(a_2 b_3 - a_3 b_2)$;

$R_2 = (a_2 b_1 - b_2 a_1)/(a_2 b_3 - a_3 b_2)$;

$R_3 = b_2/b_3$;

$R_4 = a_3/a_2$;

R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 ——影响系数, 分别表示铀对钾窗、钍对钾窗、钍对铀窗和铀对钍窗的影响, 具体值与测量条件有关;

F_1 、 F_2 、 F_3 ——标定系数, 分别表示经过影响系数校正后, 钾、铀、钍窗的单位计数率所对应的 K、U、Th 含量。

① 1ppmeU 为 1×10^{-6} 当量铀, 1ppmeTh 为 1×10^{-6} 当量钍