

中国土壤氡概况

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>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社编务公司排版制作

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

《中国土壤氮概况》

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 淼	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、夏淼,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谱段，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。

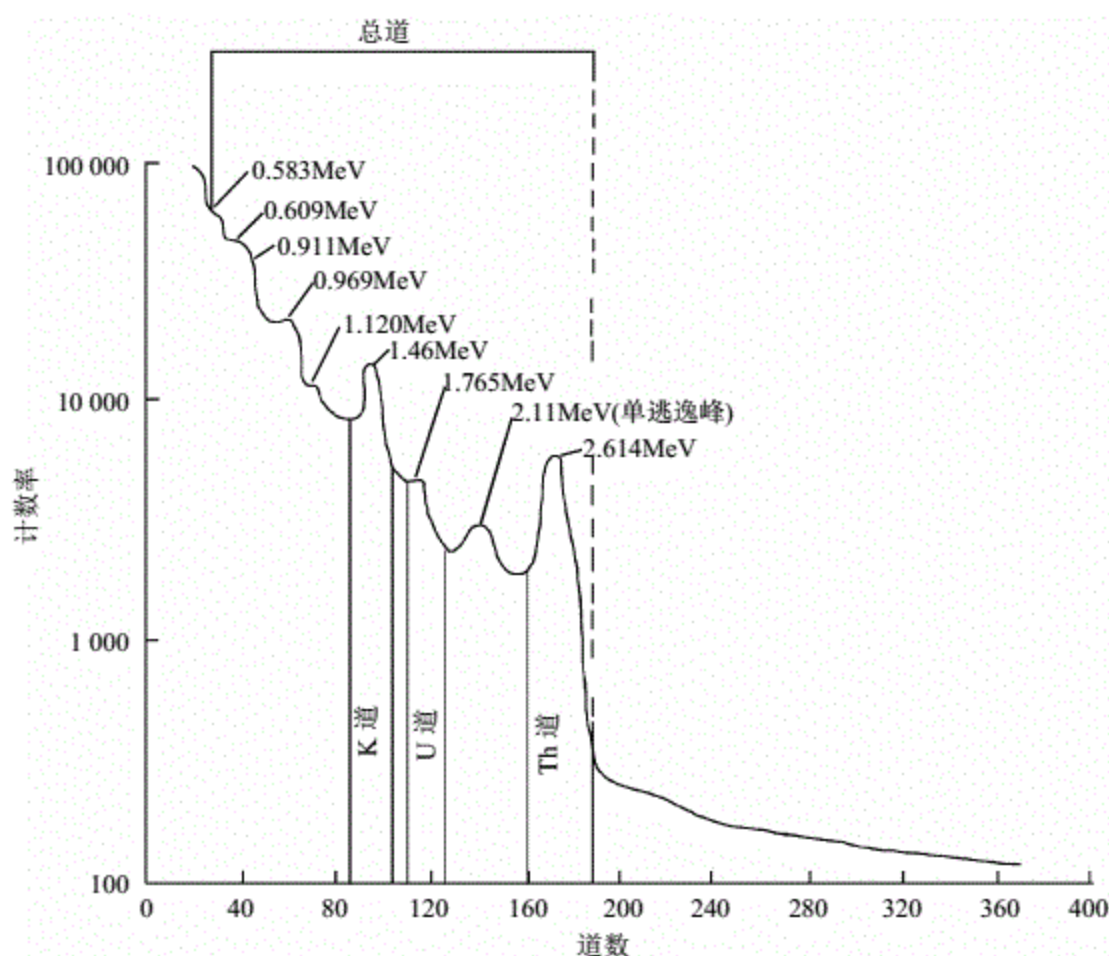


图 1-2 120m 高度上实测的 γ 谱

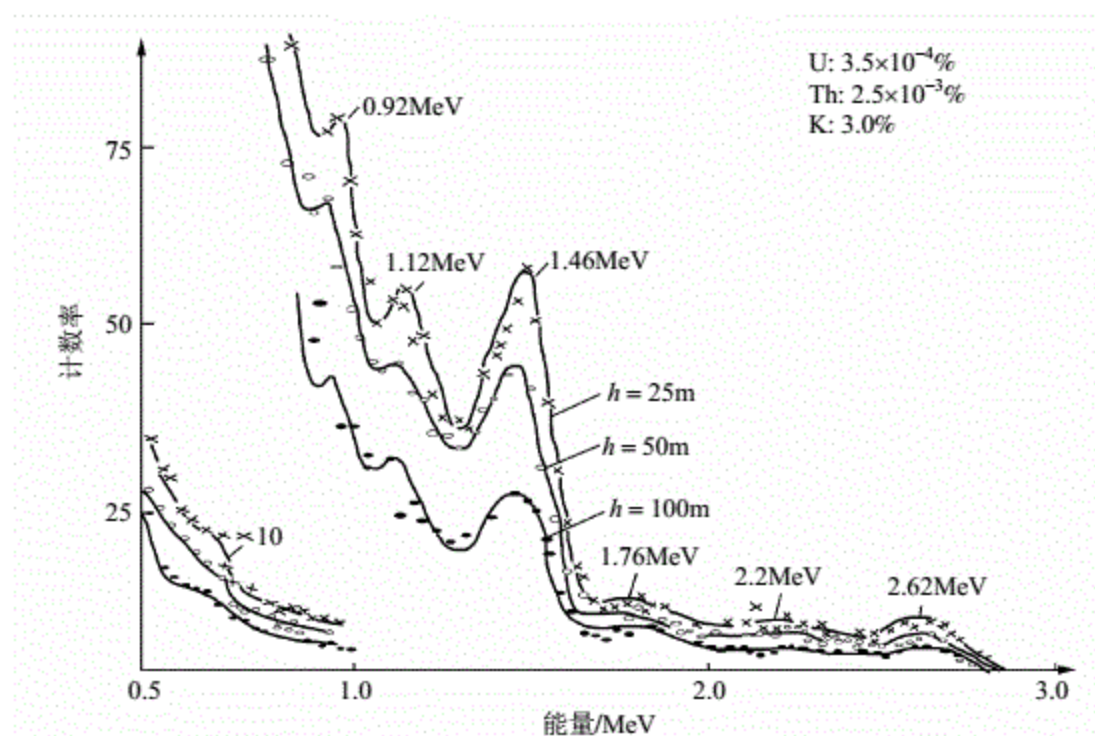


图 1-3 均匀花岗岩表面不同高度上的 γ 射线谱

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+2.19	(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

1.1.3 谱段选择的主要原则

(1) 区分系数 C 要大(保证方程组解的稳定性)。 C 值的大小与探测器的分辨率和能窗的谱段选择有关。在选择谱段时,要使天然放射性核素的所选特征全能峰整个包括在相应的能窗内。谱段的宽度(即能窗的宽度)取决于晶体[NaI(Tl)]的能量分辨率。一般能窗宽度应略大于能量分辨率与峰值能量的乘积。从 U、Th 微分谱线上看,二者所选谱段的面积之差要大。

(2) 要有较高的灵敏度。这就是说,对一定含量放射性元素,所选能窗的谱段宽度应使计数率尽可能高一些为好,以保证观测结果的精度。可见,要提高测量灵敏度,所选的 U、Th 能窗的宽度就要大,而这样一来,相应的 U、Th 能窗之间的面积差又会相对减小,也即区分系数 C 要变小。因此选择能窗的谱段宽度时要两者兼顾:既要使得区分系数足够大,又要确保谱仪具有较高灵敏度。实际工作中有时需要较高的区分系数,这就要适当降低灵敏度;有时需要提高灵敏度,这就要减小区分系数。如表 1-2 所示,对于铀的测量可设置由三个谱段组成的宽窗,这样做,既可显著提高测量灵敏度,又可保证较高的区分系数。

(3) 要有较好的稳定性。稳定性指的是,在一定放射性元素含量和固定窗宽情况下,观测值偶然误差的大小。 γ 谱仪的稳定性与很多因素有关,其中谱段的两端,即上、下甄别阈的选择就是一个很重要的因素。为提高能谱仪的稳定性,选择谱段时,应把谱段上阈和下阈选在微分谱线的峰谷内变化率较小的平缓部位,以减小由于仪器甄别阈漂移而带来的误差。

实际工作中往往根据不同测量目的,设置不同的测量能窗,通过在铀、钍饱和模型上和(或)人工核素源上实测 γ 射线微分谱,然后按照上述 3 条原则较合理地选择各能窗的最佳谱段。

1.1.4 256 道航空 γ 能谱测量系统的主要技术指标

自 1955 年至今,我国使用的航空放射性测量仪器经历了几次主要更新换代。20 世纪 50~60 年代,使用原苏联的 ACTM-25 型仪器,用盖革计数管探测器做 γ 总量测量。70~80 年代初期使用国产的 FD-115 型航空 γ 测量仪和 FD-123 型航空 γ 能谱仪,用 NaI(Tl)晶体探测器。80 年代以后,使用美国的 GR-800D 型和加拿大的 ACS-2 型航空 γ 能谱测量系统,最近又引进了美国生产的最先进的 GR-820 型航空 γ 能谱测量系统,这些引起的仪器自动化程度高、技术指标先进。现用的航空 γ 能谱测量系统主要技术指标如下。

1) 探测器晶体体积

下测为 3072in^3 (约 $50\,340\text{cm}^3$)或 2048in^3 (约 $33\,560\text{cm}^3$),上测为 512in^3 (约 8390cm^3)或 256in^3 (约 4195cm^3)。

2) 系统总分辨率和单个晶体的分辨率

对 ^{137}Cs 的 0.662MeV 峰,小于 10%;

对 ^{40}K 的 1.46MeV 峰,小于 7.5%;

对 ^{208}Th 的 2.62MeV 峰, 小于 6%。

3) 分析器道数

上测探测器 256 道, 下测探测器 256 道。

4) 峰位漂移

测量系统连续工作飞行 6h, 对钍峰漂移, 上测探测器小于 5 道, 下测探测器小于 2.5 道。

5) 能谱非线性

小于 1%。

1.1.5 航空 γ 能谱仪的校正(标定)测试

为了准确地测定地面岩石或土壤的钾、铀、钍含量, 就必须对航空 γ 能谱仪进行严格的校正(标定)。其校正方法是做 3 种测试: 即高高度测试、静态测试、动态测试, 取得各项校正参数。

1. 高高度测试

高高度测试是为了求得航空 γ 能谱仪的飞机放射性本底和宇宙射线贡献而进行的测试。该测试要求在离海岸线 10km 以外的海域高空进行, 飞行高度分别为 150m、180m、240m、1500m、1800m、2400m 6 个高度。在这样的条件下, 地面放射性和大气氡的影响等于零, 此时航空 γ 能谱仪测得的仅仅是飞机放射性本底和宇宙射线。

飞机的放射性本底不随飞行高度发生变化, 是一个常数。而宇宙射线则不同, 它随飞行高度而变化, 飞行高度越高, 宇宙射线越强, 它是一个变量。

在海域上面 1700m 以上的高空中, 航空 γ 能谱仪任意一能窗的本底计数率 R_B 由式(1-5)表示。

$$R_B = R_A + R_C \quad (1-5)$$

式中: R_B ——任意一能窗的本底计数率(cps^①);

R_A ——任意一能窗的飞机放射性本底计数率(cps);

R_C ——任意一能窗的宇宙射线本底计数率(cps)。

R_C 由式(1-6)表达:

$$R_C = C \times C_i \quad (1-6)$$

式中: C ——宇宙射线窗(3~6MeV)的计数率(cps);

C_i ——宇宙射线本底对各能窗的影响系数。

而 C_i 可以通过两个飞行高度上的 R_B 求得

$$R_B^1 = R_A - R_C^1 \quad (1-7)$$

$$R_B^2 = R_A - R_C^2 \quad (1-8)$$

① cps 表示个脉冲(计数)/s

式中： R_B^1 、 R_B^2 ——分别代表第一个和第二个飞行高度上的 R_B ；

R_C^1 、 R_C^2 ——分别代表第一个和第二个飞行高度上的 R_C 。

式(1-7)减式(1-8)得

$$R_B^1 - R_B^2 = R_C^1 - R_C^2 \quad (1-9)$$

$$R_C^1 = C^1 \times C_i \quad (1-10)$$

$$R_C^2 = C^2 \times C_i \quad (1-11)$$

C^1 、 C^2 ——分别代表第一个和第二个飞行高度上的宇宙射线窗(3~6MeV)计数率。

从联立式(1-9)、(1-10)、(1-11)求解得 C_i ：

$$C_i = \frac{R_B^1 - R_B^2}{C^1 - C^2} \quad (1-12)$$

由于第一个和第二个飞行高度上的 R_B^1 、 R_B^2 、 C^1 、 C^2 已经测得，有了具体的数据，即可通过式(1-12)计算出宇宙射线本底对各能窗的影响系数 C_i 。然后，利用宇宙射线窗的计数率 C 和各能窗的 C_i 计算出各能窗的宇宙射线本底 R_C [式(1-6)]。计算出各能窗的宇宙射线本底 R_C 之后，就可求出各能窗的飞机放射性本底 R_A [式(1-13)]。

$$R_A = R_B - R_C \quad (1-13)$$

在获得了各能窗的宇宙射线本底 R_C 和飞机放射性本底 R_A 之后，从各能窗的测量数据中减去其 R_C 和 R_A ，就消除了宇宙射线和飞机放射性本底对航空 γ 能谱测量的影响。

2. 静态测试

静态测试就是在航空放射性测量标准模型(见图 1-4)上测量后，计算得到航空 γ 能谱仪的康普顿散射系数。航空放射性测量标准模型有钾模型、铀模型、钍模型、钾铀钍混合模型和本底模型。在这些模型上测得的康普顿散射系数(也称康普顿剥离系数或影响系数)有 6 个： S_{KU} 、 S_{KT} 、 S_{UT} 、 S_{UK} 、 S_{TK} 、 S_{TU} 。



图 1-4 航空放射性测量模型体源标准

在航空 γ 能谱测量中，由于存在着康普顿散射的影响，在铀窗的计数中，并不全是

铀产生的，还包含着钾和钍产生的计数；同理，在钾窗中还包含着铀和钍产生的计数，在钍窗中还包含着铀和钾产生的计数。为了消除钾、铀、钍的相互影响，就要从铀窗计数中把钾和钍产生的计数剥离出去；从钾窗计数中把铀和钍产生的计数剥离出去；从钍窗计数中把铀和钾产生的计数剥离出去。这就是康普顿散射修正。

1) 铀对钾窗的影响系数 S_{KU} 由式(1-14)求得

$$S_{KU} = \frac{R_{KU}}{R_{UU}} \quad (1-14)$$

式中： R_{KU} ——在铀模型上测定的钾窗计数率(cps)；

R_{UU} ——在铀模型上测定的铀窗计数率(cps)。

2) 钍对钾窗的影响系数 S_{KT} 用式(1-15)求得

$$S_{KT} = \frac{R_{KT}}{R_{TT}} \quad (1-15)$$

式中： R_{KT} ——在钍模型上测定的钾窗计数率(cps)；

R_{TT} ——在钍模型上测定的钍窗计数率(cps)。

3) 钍对铀窗的影响系数 S_{UT} 由式(1-16)求得

$$S_{UT} = \frac{R_{UT}}{R_{TT}} \quad (1-16)$$

式中： R_{UT} ——在钍模型上测定的铀窗计数率(cps)；

R_{TT} ——在钍模型上测定的钍窗计数率(cps)。

4) 钾对铀窗的影响系数 S_{UK} 由式(1-17)求得

$$S_{UK} = \frac{R_{UK}}{R_{KK}} \quad (1-17)$$

式中： R_{UK} ——在钾模型上测定的铀窗计数率(cps)；

R_{KK} ——在钾模型上测定的钾窗计数率(cps)。

5) 钾对钍窗的影响系数 S_{TK} 由式(1-18)求得

$$S_{TK} = \frac{R_{TK}}{R_{KK}} \quad (1-18)$$

式中： R_{TK} ——在钾模型上测定的钍窗计数率(cps)；

R_{KK} ——在钾模型上测定的钾窗计数率(cps)。

6) 铀对钍窗的影响系数 S_{TU} 由式(1-19)求得

$$S_{TU} = \frac{R_{TU}}{R_{UU}} \quad (1-19)$$

式中: R_{TU} ——在铀模型上测定的钍窗计数率(cps);

R_{UU} ——在铀模型上测定的铀窗计数率(cps)。

3. 动态测试

动态测试就是在动态测试带上进行的测试,目的是为了获取航空 γ 能谱仪各窗在120m高度的空中灵敏度、高度衰减系数、大气氡修正系数。

动态测试带是为校正航空 γ 能谱仪而选定的一小块区域,它包括水、陆两部分。水域部分是一个水库或一个湖泊,要求水面直径大于800m,水深大于3m;陆地部分是一块1000m × 3000m的长方形平地,水、陆两部分紧密相连。

动态测试前的一个星期内,要用地面 γ 能谱仪准确测定动态带陆地部分的地面钾、铀、钍含量,飞行并为航测建立地面标志。地面 γ 能谱仪在使用之前要用地面放射性测量标准模型(图1-5)进行标定。



图 1-5 地面放射性测量模型体源标准

动态测试时,要求飞行60m、90m、120m、150m、180m、210m、240m和300m 8个高度,每个高度飞行4次。

1) 高度衰减系数 μ 的测定

由动态测试得到的数据,按式(1-20)计算各窗的高度衰减系数 μ :

$$\mu = \frac{\ln R^{120} - \ln R^H}{H - 120} \quad (1-20)$$

式中: μ ——钾窗、铀窗或钍窗计数的高度衰减系数(1/m);

H ——飞行高度(m),此处 H 表示上述8个高度中除120m以外的其余7个高度;

R^{120} ——钾窗、铀窗或钍窗在120m高度上千次测量的平均计数率(cps);

R^H ——钾窗、铀窗或钍窗在 H 飞行高度上4次测量的平均计数率(cps)。

2) 大气氡修正系数 m 和 l 的测定

大气氡就是地面上空或海洋上空空气中的氡气。大气氡对航空 γ 能谱仪的铀窗计数率影响较大,对钾窗和钍窗的影响较少,一般只对铀窗进行大气氡修正。这是因为空气中漂浮着由大气氡产生的 ^{214}Bi ,且其浓度主要受气象因素(气流、气温、气压、降水等)影响,

有时可成倍变化。地面铀含量是依据岩石、土壤中的 ^{214}Bi 所产生的特征 γ 射线在铀窗的计数来测定的, 可见, 大气中的 ^{214}Bi 对铀窗计数的贡献如不予以剔除, 就必然会导致铀含量测量结果的失真。实际观测资料表明, 在某些特殊情况下, 大气中 ^{214}Bi 在铀窗的贡献相当大, 有时甚至可大到接近地面 ^{214}Bi 的贡献, 可见大气氡对铀含量测量的影响不可忽略。

根据我国多年来航空 γ 能谱测量的经验, 大气氡变化的基本规律是: 上午浓度高, 下午浓度低; 阴天浓度高, 晴天浓度低; 刮西风时浓度高, 刮东风时浓度低, 这是因为我国东临大海, 大海上空的大气氡浓度远远低于陆地上空的大气氡浓度。降水可导致大气氡浓度和 ^{214}Bi 浓度的显著降低, 但 ^{214}Bi 随雨水降落到地面, 在数小时之内仍会给测量带来影响, 且不能通过下面所述的方法进行修正。因而, 在航测规范中规定, 雨后一定时间内不得进行测量。

在 20 世纪 80 年代以后从美国引进的航空 γ 能谱仪中, 增加了一箱专门测大气氡的上测晶体。在上测晶体与下测晶体之间安装了一块 2cm 厚的铅板, 这块铅板以及下测晶体共同阻挡(吸收)了来自地面的 γ 射线, 使其绝大部分不能进入上测晶体, 这样就确保了上测晶体专门测量大气氡。从下测铀窗计数中减去按式(1-21)计算的大气氡修正值, 就消除了大气氡对下测铀窗计数的影响。

下测铀窗中大气氡的修正值 R_n 按下式计算:

$$R_n = \frac{R_{\text{up}} - lR_{\text{dw}}}{m - l} \quad (1-21)$$

式中: R_n ——大气氡修正值(cps);

R_{up} ——上测铀窗计数率(cps);

R_{dw} ——下测铀窗计数率(cps);

m ——几何系数, 大致相当于上测晶体体积与下测晶体体积之比;

l ——屏蔽系数, 大致相当于地面 γ 射线进入上、下测晶体所产生的上测铀窗计数与下测铀窗的计数之比。

通过动态测试取得的有关数据, 用式(1-22)计算 m 值, 用式(1-23)计算 l 值。

$$m = \frac{R_{\text{up}}^{\text{w}}}{R_{\text{dw}}^{\text{w}}} \quad (1-22)$$

$$l = \frac{R_{\text{up}}^{\text{l}} - R_{\text{up}}^{\text{w}}}{R_{\text{dw}}^{\text{l}} - R_{\text{dw}}^{\text{w}}} \quad (1-23)$$

式中: R_{up}^{w} ——动态测试带水面上空, 上测铀窗经本底和康普顿剥离后的净计数率(cps);

R_{dw}^{w} ——动态测试带水面上空, 下测铀窗经本底和康普顿剥离后的净计数率(cps);

R_{up}^{l} ——动态测试带陆地上空, 上测铀窗经本底和康普顿剥离后的净计数率(cps);

R_{dw}^{l} ——动态测试带陆地上空, 下测铀窗经本底和康普顿剥离后的净计数率(cps)。

3) 航空 γ 能谱仪各窗空中灵敏度的测定

航空 γ 能谱仪各窗输出的数据是计数率, 而不是钾、铀、钍的地面含量。要想用钾、

铀、钍窗的空中计数率换算成钾、铀、钍的地面含量，就必须知道航空 γ 能谱仪钾、铀、钍窗的空中灵敏度。钾、铀、钍窗的空中灵敏度定义为：地面单位含量的钾、铀、钍分别在钾、铀、钍窗产生的空中计数率。钾、铀、钍的单位分别规定为 1%(K)、1ppm(eU)、1ppm(eTh)。钾、铀、钍窗的空中计数率是指经康普顿剥离、本底修正、宇宙射线修正、大气氡修正，并经高度衰减修正归一到 120m 高度的各窗净计数率。

航空 γ 能谱仪各窗空中灵敏度的测定方法是：首先测定动态测试带陆地部分的钾、铀、钍的地面含量，再在动态测试陆地上空 120m 高度上飞行 4 次，取得各窗在该高度上 4 次测量的平均计数率，然后通过康普顿剥离、本底修正和大气氡修正得到各窗的净计数率，即可。按式(1-24)、(1-25)、(1-26)分别计算钾、铀、钍窗的空中灵敏度。

$$S_K = \frac{R_{K_s}^{120}}{Q_K} \quad (1-24)$$

$$S_U = \frac{R_{U_s}^{120}}{Q_U} \quad (1-25)$$

$$S_T = \frac{R_{T_s}^{120}}{Q_T} \quad (1-26)$$

式中： S_K 、 S_U 、 S_T ——分别为钾、铀、钍窗空中灵敏度；

Q_K 、 Q_U 、 Q_T ——分别为动态测试带陆地部分已知的钾、铀、钍地面含量，其单位分别为%、ppmeU、ppmeTh；

$R_{K_s}^{120}$ 、 $R_{U_s}^{120}$ 、 $R_{T_s}^{120}$ ——分别为 120m 高度上钾、铀、钍窗的空中净计数率，单位为 cps；

4. 航空 γ 能谱仪测量数据的修正方法

为了准确测定地面钾、铀、钍含量，就必须对航空 γ 能谱测量数据进行各项修正。

1) 飞机放射性本底和宇宙射线修正

其修正方法就是从各窗的空中计数率中减去各道相应的飞机放射性本底和宇宙射线产生的计数率计算式如下：

$$R_s^H = R^H - R_A - R_C \quad (1-27)$$

式中： R_s^H ——减去飞机放射性本底和宇宙射线之后的各窗空中计数率(cps)；

R^H ——各窗的空中计数率(cps)；

R_A ——各窗的飞机放射性本底(cps)；

R_C ——各窗的宇宙射线本底(cps)。

2) 康普顿散射修正

为了消除康普顿散射在航空 γ 能谱测量中的影响，就要对航空 γ 能谱测量数据进行康普顿散射修正。其修正公式为

$$R_{K_s} = R_K - S_{KU} \cdot R_U - S_{KT} \cdot R_T \quad (1-28)$$

$$R_{U_s} = R_U - S_{UK} \cdot R_K - S_{UT} \cdot R_T \quad (1-29)$$

$$R_{T_s} = R_T - S_{TK} \cdot R_K - S_{TU} \cdot R_U \quad (1-30)$$

式中： R_{K_s} 、 R_{U_s} 、 R_{T_s} ——分别为经康普顿散射修正后的钾、铀、钍窗空中计数率(cps)；

R_K 、 R_U 、 R_T ——分别为钾、铀、钍窗空中计数率(cps)；

S_{KU} 、 S_{KT} 、 S_{UK} 、 S_{UT} 、 S_{TK} 、 S_{TU} ——均为康普顿散射修正系数，各自的物理意义及测定方法见前面“静态测试”。

3) 大气氡修正

大气氡修正就是从下测铀窗计数率中减去按式(1-21)计算的大气氡修正值 R_n ：

$$R_{U_s}^0 = R_{U_s} - R_n \quad (1-31)$$

式中： $R_{U_s}^0$ ——经过大气氡修正后的下测铀窗计数率(cps)；

R_{U_s} ——未经大气氡修正的下测铀窗计数率(cps)；

R_n ——下测铀窗中大气氡的修正值(cps)。

4) 飞行高度修正

在地面钾、铀、钍含量不变的情况下，由于空气对 γ 射线的衰减作用，航空 γ 能谱仪各窗的空中计数率会随飞行高度的升降发生变化。当飞行高度上升时，计数率下降。当飞行高度下降时，计数率上升。为了消除飞行高度带来的影响，就必须对航空 γ 能谱测量数据进行飞行高度修正。飞行高度修正公式为

$$R^{120} = R^H \cdot e^{\mu(H-120)} \quad (1-32)$$

式中： R^{120} ——经飞行高度修正归一到120m高度上的各窗计数率(cps)；

R^H ——实际飞行高度上的各窗计数率(cps)；

H ——测线上的实时飞行高度(m)；

μ ——各窗计数率的高度衰减系数(1/m)。

在进行飞行高度修正之前，应先对各窗计数率进行康普顿散射、本底、宇宙射线及大气氡修正。

5. 地面钾、铀、钍含量计算公式

$$Q_K = \frac{R_{K_s}}{S_K} \quad (1-33)$$

$$Q_U = \frac{R_{U_s}}{S_U} \quad (1-34)$$

$$Q_T = \frac{R_{T_s}}{S_T} \quad (1-35)$$

式中: Q_K 、 Q_U 、 Q_T ——分别为地面钾、铀、钍含量, 单位分别为%、ppmeU、ppmeTh;
 S_K 、 S_U 、 S_T ——分别为钾、铀、钍窗 120m 飞行高度上的空中灵敏度, 单位分别为 cps/%K、cps/ppmeU、cps/ppmeTh;
 R_{K_s} 、 R_{U_s} 、 R_{T_s} ——分别为经过各项修正(康普顿散射、宇宙射线、本底、大气氦及飞行高度修正)之后的钾、钠、钍窗净计数率(cps)。

1.1.6 航空放射性测量飞机的选择及测量比例尺

我国自 1955 年开始用航空放射性方法找铀以来, 先后使用过许多种类型的飞机。在 20 世纪 50 年代, 主要使用原苏联的安二型固定翼飞机和法国的云雀-III 直升机。70 年代主要使用国产的运五型固定翼飞机和直五型直升机。80 年代以后主要使用国产的运十二型固定翼飞机和美国的贝尔-212 型直升机, 同时也还使用国产的运五型飞机和加拿大的双水獭型飞机。在青藏高原上使用了黑鹰直升机。机型的选择主要考虑测区的地形条件及海拔。

1) 机型的选择条件

(1) 在海拔高度 2000m 以下, 地形比高在每公里 200m 以下的地区, 使用运五型飞机较为合适。

(2) 在海拔高度 2500m 以下, 地形比高在每公里 200~500m 的地区, 使用贝尔-212 型直升机较为合适。

(3) 在海拔高度 2000~3000m, 地形比高在每公里 250m 以下的地区, 使用运十二(图 1-6)或双水獭型飞机为宜。

(4) 在海拔高度 3000m 以上的高原地区, 一般选用黑鹰直升机(图 1-7)。



图 1-6 航空物探常用机型(运十二)



图 1-7 黑鹰直升机(在西藏地区测量)

2) 航测比例尺(线距)

航空放射性测量的测线布置是互相平行的直线,实际的飞行线路(航迹)是难以完全保持直线状态的,而是向两侧有所摆动。测线的长度依测区规划而定,一般为几十公里到一百多公里。测线之间的距离一般为 250m、500m、1000m 3 种,我国 20 世纪 50~70 年代采用的线距大多为 250m 和 500m。80 年代以后采用的线距大多为 1000m。航空放射性测量的采样时间为 1s,点距为 50~70m(依飞行速度而定),采样密度是很大的。飞行高度控制在 120m 以下,超过 120m 视为无效数据。飞行高度越低,测量结果越可靠,找矿效果越好。目前航空放射性测量采用 GPS 进行导航定位,定位误差不超过 30m。

航空放射性测量常用比例尺有下列 3 种:

- (1) 比例尺 1 : 25 000。这种比例尺规定线距为 250m,测点密度为每平方公里 25~30 个。
- (2) 比例尺 1 : 50 000。这种比例尺的线距为 500m,测点密度为每平方公里 25~30 个。
- (3) 比例尺 1 : 100 000。这种比例尺的线距为 1000m。测点密度为每平方公里 12~15 个。

航空 γ 能谱测量方法经过国内外的大量实验和实测结果表明,所得的放射性元素含量与地面所测得的放射性元素含量是相符的,不仅可以可靠反映放射性背景场水平及其在平面上的变化特征,而且可以有效发现由放射性元素的局部富集或分散所引起的异常。航空 γ 能谱测量方法不仅用于铀资源勘查,也广泛用于多金属矿床、油气藏、钾盐矿、金矿等的勘查,同时也是地质填图的重要手段。除地质上的应用之外,航空 γ 能谱测量方法也越来越广泛地用于环境领域,如区域性、区块性放射性环境评价、圈定放射性污染源位置及污染范围,寻找丢失的放射性物质等。在很多国家的核应急体系中都包含有航空 γ 能谱测量这一快速有效的手段。

1.1.7 航空 γ 测量的影响因素

航空 γ 测量的影响因素较多,主要有以下几个方面。

1. 地形的影响

飞机上探测器对地面的有效探测面积与飞行高度和地面的起伏状态有关。以探测器为顶点,以一定的张角在地面圈出一定的范围,如果在该范围内的任一点至探测器的距

离都在有效探测距离之内，而在该范围之外的任一点至探测器的距离都超出了有效探测距离，则该范围既为有效探测面积，探测器向地面所张的相应的立体角即为有效探测立体角(图 1-8)。由此可见，探测器的有效探测立体角及有效探测面积都与飞行高度有关。

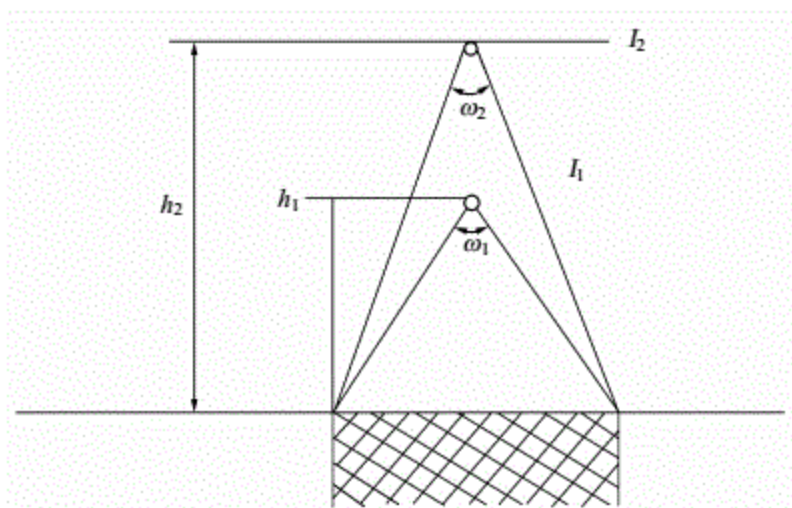


图 1-8 立体角与高度关系

在地形显著起伏的山区，有效探测面积同时受着地形的影响。如果飞机基本保持水平飞行，由于山顶距探测器的距离近，而山谷距探测器的距离远。空气对 γ 射线的吸收比率就会出现差异。从而导致测量值在山顶部位相对较高，在山谷部位则相对较低，如图 1-9 所示。如果飞机沿地形起伏而起伏飞行，这时的情况就与上述情况不同甚至相反，这是因为在山谷处，山谷的两侧或单侧的山坡增大了有效探测面积。在地形起伏不太大的地区，经飞行高度修正，上述测量结果的失真会基本得到纠正或显著改善。但在地形高差变化过大的地带，雷达高度反映的只是垂向高度，侧面的辐射贡献对测量结果的影响难以通过高度修正完全消除。

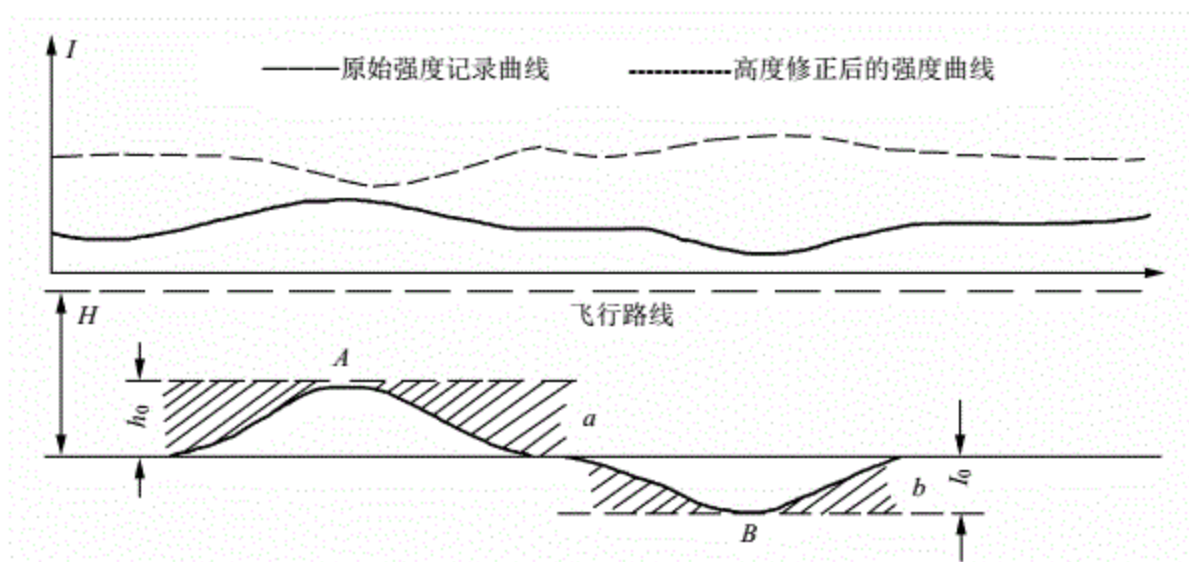


图 1-9 凹凸地形测得的 γ 强度曲线

2. 大气氡及放射性尘埃的影响

影响大气氡浓度的因素很多，采用 1.15 节所述的大气氡修正方法虽然在大多数情况下可实现可靠的修正，但在一些特殊情况下难以实现有效的修正，例如，山区测量，无

风天气的清晨，大气氡在山谷中往往有明显的富集，飞机在谷中穿行时，探测器上部空间的大气氡贡献就可能明显低于下部空间的贡献，这时就可能造成假异常，见图 1-10。

由于热核反应或核爆炸使空气被放射性尘埃污染时，会严重影响航测工作。如 ^{90}Y 、 ^{91}Y 的半衰期分别为 64h、58.51d， γ 射线能量为 1.734MeV 和 1.208MeV。遇到这种情况，一般在飞机进入测区前的基线测量飞行中就可发现，从而停止测量以避免它们的影响。

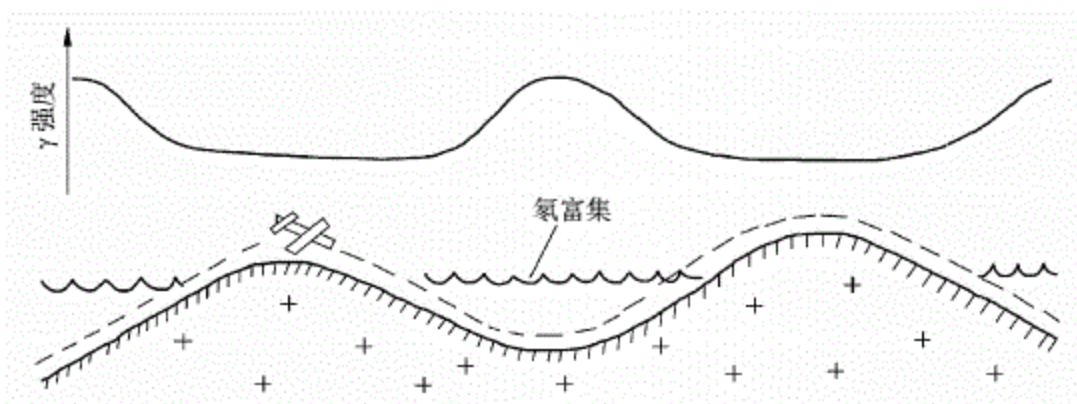


图 1-10 氡的相对富集示意图

1.1.8 航测成果的解释

航空放射性测量、航空磁测量获取的地面信息是极为丰富的，对它进行合理的综合解释，不仅对找矿具有重要的意义，同时还能解决地质研究中的许多问题。

对航测数据进行各种修正处理(如归一化、调平、速度归一化等)，计算出总道(cps)。在资料解释中，除钾、铀、钍含量数据外，还可得到钍/铀、钾/铀、钍/钾比值等参数，用这些数据进行成图(等值图、剖面图等)，供解释人员分析。图 1-11 是总能窗等值图，图 1-12 是钾、铀、钍含量和钾/铀、(钾/钍)/铀比值图，在比值图中可以看出不同的比值反映出的特性是不相同的。

当然，在具体的解释时，还要收集区域地质图、遥感数据、工作区工作程度图以及作业区的地球物理、地球化学等方面的资料，以便相互佐证。在航测规范中要求对每一个航测异常点都要进行地面详细勘查，确定引起异常原因，排除一些非矿化异常。

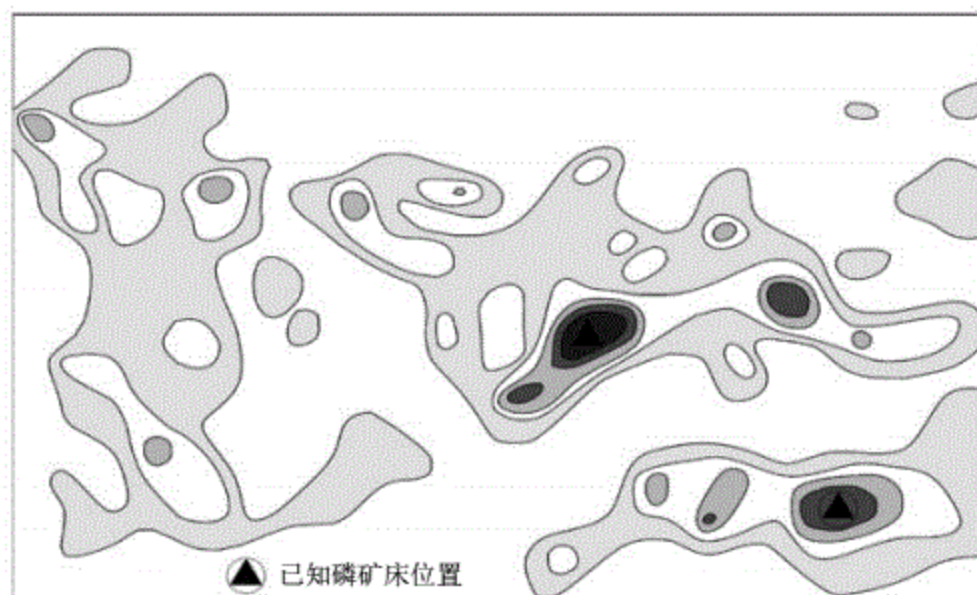


图 1-11 总能窗计数率平面等值图

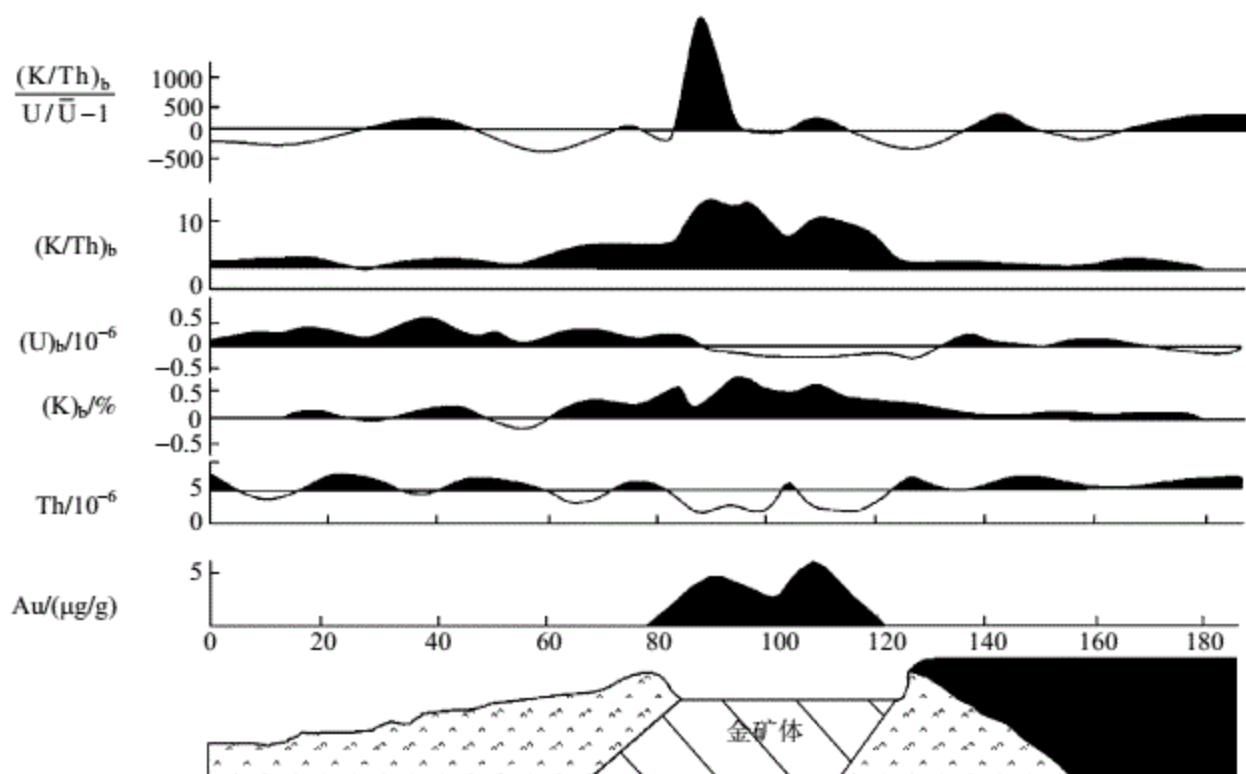


图 1-12 组合剖面图

图中 $(K)_b$ 、 $(U)_b$ 分别表示经地质上的归一化处理后的钾含量和铀含量； $(K/Th)_b$ 是经地质上的归一化处理后的钾/钍比值； $\bar{U}$ 为研究区铀含量的平均值。

1.2 土壤铀-氡换算方法

1.2.1 有关专业名词的定义

为了准确地理解土壤铀-氡换算方法，更好地了解和利用由航测数据转换得到的我国大陆已航测地区的土壤氡浓度资料，对所涉及的一些物理参数和有关的专业技术名词定义如下。

1) 土壤中的自由氡和束缚氡

土壤中的氡分为自由氡(也称游离氡)和束缚氡两部分。自由氡是指存在于土壤孔隙、裂隙之中并在自然条件下能参与扩散、对流，与外界进行交换的那部分氡；束缚氡是指被牢牢地束缚在土壤颗粒内部，不能参与扩散、对流，不能与外界进行交换的那部分氡。

2) 土壤氡的总量

土壤中自由氡和束缚氡的总和，称为土壤氡的总量。

3) 土壤氡的孔隙浓度

单位体积土壤中自由氡的数量(以 Bq 为单位)除以单位体积土壤中孔隙的总体积，即为土壤氡的孔隙浓度。在本课题中提到的土壤氡浓度，均为土壤氡的孔隙浓度。

4) 土壤氡的饱和浓度

在铀-钍均匀分布的土壤层中，从表层到土壤深部，氡的浓度随着深度的增加而增加。

一般来说, 当深度大于 5m 时, 土壤氡的浓度就不再随深度而增加了, 也就是趋于饱和了, 这时的氡浓度称为土壤氡的饱和浓度。

5) 土壤氡的保存度

土壤氡的保存度是表征土壤氡保存能力的物理参数。土壤中的自由氡并不能百分之百地保存在土壤中, 有相当一部分被释放到地面以上的大气中, 越接近地表, 被释放到大气中的比例就越高。为了定量地描述这一现象, 就引入了保存度的概念。在这里, 土壤氡的保存度定义为: 地下 50cm 深处的土壤中自由氡的孔隙浓度与土壤中氡的饱和浓度之比。比如, 保存度为 30%, 就是在地下 50cm 深的土壤中, 自由氡的 30% 被保存下来, 70% 被释放到地面以上的大气中。

土壤氡的保存度取决于土壤氡的扩散系数 K 。 K 值大, 表明土壤的透气性好, 土壤自由氡易于排放到大气中去, 从而使得氡的保存度减小; 相反, K 值小, 表明土壤的透气性差, 土壤自由氡的保存度即相应增大。不同类型的土壤, 虽然当量铀含量相差不大, 但由于土壤氡保存条件的差别, 可以导致土壤氡的浓度相差很大。

土壤氡保存度的数学表达式为

$$B = 1 - e^{-\sqrt{\lambda/K} \cdot h} \quad (1-36)$$

式中: B ——土壤氡的保存度;

K ——土壤氡的扩散系数(cm^2/s);

h ——取样深度(cm);

λ ——氡的衰变常数, λ 为 $2.1 \times 10^{-6}/\text{s}$ 。

在 50cm 深处, 不同扩散系数 K 所对应的土壤氡保存度 B 列于表 1-3。

表 1-3 扩散系数 K 与保存度 B 的关系

扩散系数 $K/(\text{cm}^2/\text{s})$	1	2	3	4	5	6	7
保存度 B	0.51	0.40	0.34	0.30	0.27	0.26	0.24

6) 土壤氡浓度

土壤氡的饱和浓度乘以土壤氡的保存度, 即为土壤氡浓度:

$$c_{\text{Rn}} = B \cdot N_{\infty} \quad (1-37)$$

式中: c_{Rn} ——土壤氡浓度(Bq/m^3);

N_{∞} ——土壤氡的饱和浓度(Bq/m^3);

B ——土壤氡的保存度。

7) 土壤氡浓度平均值(背景值)

一个城市的土壤氡浓度平均值是指该城市所在地几十到几百平方公里范围内土壤氡浓度平均值, 即土壤氡浓度背景值, 而不是某个具体坐标位置上的单点值。土壤