

Airborne
Gamma ray

Spectrum Detection
and Applications

航空伽马

能谱探测技术与应用

葛良全 熊盛青 曾国强 范正国 倪卫冲 周四春 著



科学出版社

航空伽马能谱探测技术与应用

Airborne Gamma ray Spectrum Detection and Application

葛良全 熊盛青 曾国强 著
范正国 倪卫冲 周四春



科学出版社

北京

内 容 简 介

航空伽马能谱探测技术是一种寻找放射性矿产和在成因上与放射性元素相关的非放射性矿产的航空地球物理勘探技术,也是环境放射性污染调查与评价、核设施监测和核事故应急事件监测的主要支撑技术。本书较系统地论述了航空伽马能谱探测技术的理论基础、航空伽马能谱测量仪器、航空伽马能谱测量的方法技术和数据处理方法,较全面地介绍了航空伽马能谱探测技术在地质填图、固体矿产勘查、油气勘探、辐射环境调查和核应急监测中的应用依据与实例。

本书可供从事航空地球物理勘探的科技人员和工程技术人员参考,也可供相应学科专业的高校研究生和高年级大学生参考。

图书在版编目(CIP)数据

航空伽马能谱探测技术与应用/葛良全等著. —北京:科学出版社, 2016.7

ISBN 978-7-03-047291-5

I. ①航… II. ①葛… III. ①航空- γ 能谱测量-探测技术
IV. ①P631.6

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第021153号

责任编辑:韩卫军/责任校对:刘亚琦

责任印制:余少力/封面设计:墨创文化

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>

成都锦瑞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8月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2016年8月第一次印刷 印张:18 3/4

字数:440 000

定价:168.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

本书较系统地介绍了航空伽马能谱探测技术的理论基础、测量仪器、方法技术和应用实例。重点探讨了地-空界面上伽马射线的来源、地-空界面上天然伽马射线能谱特征、不同形状辐射体空中伽马射线照射量率特征和伽马射线仪器谱的形成及影响因素等基础理论；介绍了航空伽马能谱勘查系统的组成、航空伽马能谱探头设计和全数字化航空伽马能谱仪的电子线路单元；论述了不同高度大气中伽马射线照射量率变化规律、不同岩性和不同湿度条件下地-空界面上空中伽马能谱分布特征、航空伽马射线仪器谱的解析技术、大气氡校正技术、低能谱段地质响应等航空伽马能谱测量的方法技术；重点介绍了航空伽马能谱测量数据处理方法和弱信息提取技术；较全面地介绍了航空伽马能谱探测技术在固体矿产勘查、油气勘探、辐射环境调查和核应急监测中的应用依据与实例。

本书的主要内容是基于国家 863 计划资源环境技术领域重大项目“航空地球物理勘查系统”之第七课题“航空伽马能谱勘查系统研发”（课题编号：2006AA06A207）和国家自然科学基金项目“核地球物理学天然伽马场研究”（项目编号：40774063）的研究成果。研究群体主要由成都理工大学相关学科的教师和研究生、中国国土资源航空物探遥感中心的科研人员和技术人员、核工业航测遥感中心的科研人员和技术人员组成。由于研究人员较多，这里不便全部列举他们的姓名与成果贡献，可以参阅本书的参考文献。在此，我们向所有支持和关心相关研究工作的单位、个人和所引用的参考文献作者表示崇高的敬意。

全书共分 6 章。第 1 章绪论由葛良全教授编写，第 2 章由葛良全教授和杨强副教授编写，第 3 章由曾国强教授、赖万昌教授和王广西副教授编写，第 4 章由葛良全教授、张庆贤副教授和谷懿副教授编写，第 5 章由周四春教授编写，第 6 章由熊盛青教授级高级工程师、范正国教授级高级工程师和倪卫冲教授级高级工程师编写。全书由葛良全和熊盛青统编。由于我们的知识水平和研究能力有限，不足之处在所难免，诚望各位同行、专家批评指正。

Preface

This book gives a systematic introduction to the theory, instruments, techniques and application examples of airborne gamma ray spectrometry (AGS) technology. It focuses on some key topics described as following: the sources of gamma ray on air-ground interface, the spectrum features of natural gamma ray on air-ground interface, the exposure rate features of aerial gamma rays from different shaped radioactive bodies, the formation and influent factors of gamma ray instrumental spectra. Meanwhile, it introduces the components of airborne gamma ray spectrometry system, the design of AGS probe, and the electronic unit of digital AGS. And it also discusses the variation of the gamma ray exposure rate in different height of atmosphere, the distribution of air-ground AGS under different lithology and humidity conditions, the decomposition techniques of gamma ray instrumental spectrum, and the relative methods and techniques of AGS including atmospheric radon correction and the geological response of low energy spectrum. The data processing methods of AGS and the techniques to extract weak information is also introduced. A relative comprehensive introduction is also made on practical bases and examples of AGS detection technology, which is applied to solid mineral exploration, oil-gas exploration, radioactive environment investigation and nuclear emergency monitoring.

The main content of this book is based on research results of two national projects: “Research and Development of Airborne Gamma ray Spectrum Exploration System”, which is the sub-project of Airborne Geophysics Exploration System, National High-Tech Research and Development Program (863 Program) (project number: 2006AA06A207); and Research of Natural Gamma ray Field in Nuclear Geophysics, the National Natural Science Foundation of China (project number: 40774063). Members of the research teams come from Chengdu University of Technology, China Aero Geophysical Survey & Remote Sensing Center for Land and Resources, Airborne Survey and Remote Sensing Center of Nuclear Industry. Some researchers’ achievements are listed in the References. We would like to thank the many colleagues and research units for their supports. And our sincere thanks go to the authors whose articles are cited in this book.

The book consists of six chapters. Chapter one is written by Professor Liangquan Ge; chapter two is written by Professor Liangquan Ge and Associate Professor Qiang Yang; chapter three is written by Professor Guoqiang Zeng, Professor Wanchang Lai and Associate Professor Guangxi Wang; chapter four is written by Professor Liangquan Ge, Associate Professor Qingxian Zhang and Associate Professor Yi Gu; chapter five is written by Professor Sichun Zhou; chapter six is written by Professor Shengqing Xiong, Professor Zhengguo Fan; Professor Weichong Ni. And the whole book is compiled by Professor Liangquan Ge and Professor Shengqing Xiong. We expect some valuable suggestions to this book from our colleagues and other experts.

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 航空伽马能谱探测技术的效能	1
1.2 航空伽马能谱探测仪器的进展	1
1.3 各章节主要内容安排	3
参考文献	3
第 2 章 航空伽马能谱探测的理论基础	4
2.1 地-空界面上伽马射线的来源	4
2.1.1 地表伽马射线	4
2.1.2 空间伽马射线	14
2.1.3 宇生地表伽马射线	17
2.1.4 人工伽马射线	22
2.1.5 天然放射性核素的伽马射线能谱	22
2.2 地-空界面上天然伽马能谱成分的变化	23
2.2.1 伽马射线与物质相互作用	24
2.2.2 地-空界面上天然伽马射线谱平衡	26
2.2.3 地-空界面上天然伽马能谱的数值模拟	27
2.2.4 放射性本底区地-空界面上 γ 射线谱	31
2.2.5 放射性异常区地-空界面上 γ 射线谱	31
2.3 不同形状辐射体空中伽马射线照射量率	32
2.3.1 点状辐射体	32
2.3.2 线状辐射体	33
2.3.3 面状辐射体	33
2.3.4 圆锥台状辐射体	34
2.4 航空伽马射线仪器谱的形成及复杂化	35
2.4.1 航空伽马射线仪器谱的形成	35
2.4.2 航空伽马射线仪器谱的复杂化	37
参考文献	39
第 3 章 航空伽马能谱仪	40
3.1 航空伽马能谱探头	40
3.1.1 航空伽马能谱探头的组成	40
3.1.2 射线探测器的选型	42
3.1.3 NaI (TI) +PMT 闪烁计数器的温度效应	45
3.2 探测器前置电路设计	52

3.2.1 前置电路设计的考虑	52
3.2.2 低噪声前置跟随器设计	54
3.2.3 低纹波高压电源设计	56
3.3 大气氦校正的硬件措施	61
3.4 航空伽马能谱探头的封装技术	62
3.4.1 探头的机械设计	62
3.4.2 散热与保温设计	63
3.4.3 抗震设计	64
3.5 航空伽马能谱仪主控系统	64
3.5.1 航空伽马能谱仪主控系统的参数指标	64
3.5.2 主控系统的基本构架	65
3.5.3 全数字化能谱仪的关键性电路	71
3.5.4 单元电路测试	109
参考文献	112
第4章 航空伽马能谱测量方法技术	114
4.1 不同高度空中伽马射线照射量率变化规律	114
4.1.1 理论计算	114
4.1.2 不同高度伽马射线照射量率的数值模拟	116
4.1.3 不同高度试验	120
4.2 不同湿度土壤上方伽马射线能谱变化	123
4.2.1 理论模型	123
4.2.2 MC 数值模拟	124
4.2.3 物理实验	127
4.3 航空伽马射线仪器谱的解析技术	129
4.3.1 能谱降噪技术和弱峰提取技术	129
4.3.2 康普顿散射本底扣除技术	135
4.3.3 航空伽马能谱仪器谱全谱解析技术	138
4.4 航空伽马能谱测量大气氦校正技术	145
4.4.1 大气中氦对航空伽马能谱测量的影响	145
4.4.2 谱线比大气氦校正技术	149
4.4.3 谱线比系数	151
4.5 航空伽马能谱测量低能谱地质响应	158
4.5.1 地面低能伽马能谱分布同地层介质之间的关系	158
4.5.2 空气对伽马射线低能谱段的影响	162
4.5.3 伽马能谱低能谱段地面应用	166
4.6 航空伽马能谱仪标定技术	171
4.6.1 剥离系数法	171
4.6.2 全谱解析法	173

参考文献	174
第 5 章 航空伽马能谱测量数据处理与解释技术	176
5.1 航空伽马能谱测量数据处理方法	176
5.1.1 方差分析	176
5.1.2 主成分分析	184
5.1.3 常规趋势面分析	188
5.2 航空伽马能谱测量数据弱信息提取技术	189
5.2.1 航空伽马能谱测量数据降噪技术	189
5.2.2 航空伽马能谱测量数据弱异常圈定技术	196
参考文献	199
第 6 章 航空伽马能谱探测技术的应用	200
6.1 在地质填图中应用	200
6.1.1 实例 1: 红山头钾长花岗岩岩体划分应用	201
6.1.2 实例 2: 尾亚花岗岩岩体划分应用	202
6.1.3 实例 3: 唐古尔塔格南部花岗斑岩岩体划分应用	205
6.1.4 实例 4: 镜儿泉闪长岩岩体划分应用	205
6.1.5 实例 5: 别列则克河闪长岩岩体划分应用	207
6.1.6 实例 6: 红石山基性—超基性岩岩体划分应用	209
6.1.7 实例 7: 扫子山北杂岩岩体划分应用	210
6.1.8 实例 8: 三合村—朱家黄河决口扇沉积岩岩体划分应用	212
6.1.9 实例 9: 西乌旗—巴林左旗航空伽马能谱岩性构造填图应用	212
6.2 在固体矿产勘查中应用	213
6.2.1 航空伽马能谱探测技术直接寻找铀矿	214
6.2.2 航空伽马能谱探测技术直接寻找钾矿	227
6.2.3 航空伽马能谱探测技术间接调查非放射性矿产	234
6.3 在油气勘探中应用	257
6.3.1 实例 1: 莎尔图油田勘查	258
6.3.2 实例 2: 羊三木油田勘查	259
6.3.3 实例 3: 枣园油田勘查	259
6.3.4 实例 4: 临盘油田勘查	260
6.3.5 实例 5: 双河油田勘查	262
6.3.6 实例 6: 井楼油田勘查	263
6.3.7 实例 7: 柴达木盆地冷湖地区油田勘查	264
6.3.8 实例 8: 二连盆地南部地区油田勘查	266
6.3.9 实例 9: 任丘油田勘查	267
6.4 在辐射环境调查中的应用	269
6.4.1 实例 1: 北京南部地区天然辐射环境评价	269
6.4.2 实例 2: 广东南部珠海—深圳地区天然辐射环境评价	271

6.4.3 实例 3: 东营市放射性污染调查	271
6.4.4 实例 4: 新疆尾亚放射性污染调查	272
6.4.5 实例 5: 上海市辐射环境航空测量调查	273
6.4.6 实例 6: 石家庄市辐射环境航空测量调查	275
6.5 在核应急中的应用	276
6.5.1 航空伽马能谱测量在核应急中效能	276
6.5.2 核应急航空监测方法	277
参考文献	284

Contents

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Usefulness of Airborne Gamma ray Spectrum Detection	1
1.2 Development of Airborne Gamma ray Spectrometer	1
1.3 Arrangement of Chapters	3
References	3
Chapter 2 Theory of Airborne Gamma ray Spectrum Detection	4
2.1 Sources of Air-Ground Gamma ray	4
2.1.1 Ground Gamma ray	4
2.1.2 Aerial Gamma ray	14
2.1.3 Air-Ground Gamma ray from Cosmic Ray	17
2.1.4 Artificial Gamma ray	22
2.1.5 Gamma ray Spectra from Natural Radionuclides	22
2.2 Variety of Air-Ground Gamma ray Spectra	23
2.2.1 Interaction of Gamma ray and Matter	24
2.2.2 Air-Ground Gamma ray Spectrum Equilibrium	26
2.2.3 Air-Ground Gamma ray Spectrum Simulation	27
2.2.4 Air-Ground Gamma ray Spectrum in Background Area	31
2.2.5 Air-Ground Gamma ray Spectrum in Radioactive Anomaly Area	31
2.3 Gamma ray Exposure Rate from Shaped Radiation Bodies	32
2.3.1 Point Gamma ray Source	32
2.3.2 Line-Shaped Radiation Body	33
2.3.3 Plane-Shaped Radiation Body	33
2.3.4 Cone-Shaped Radiation Body	34
2.4 Formation and Complexity of Airborne Gamma ray Instrument Spectrum	35
2.4.1 Formation of Airborne Gamma ray Instrument Spectrum	35
2.4.2 Complexity of Airborne Gamma ray Instrument Spectrum	37
References	39
Chapter 3 Airborne Gamma ray Spectrometer	40
3.1 Probe of Airborne Gamma ray Spectrometer	40
3.1.1 Components of Probe	40
3.1.2 Airborne Gamma ray Spectrum Detector	42
3.1.3 Temperature Influence on NaI (TI) +PMT	45
3.2 Design of Pre-Amplifier	52

3.2.1	Consideration of Pre-Amplifier	52
3.2.2	Design of Low Noise Pre-Amplifier	54
3.2.3	Design of Low Noise HV Circuit	56
3.3	Design for Radon Correction	61
3.4	Package for Aerial Gamma ray Detector	62
3.4.1	Machine Design of Probe	62
3.4.2	Thermal Dissipation and Insulation of Probe	63
3.4.3	Design for Anti-Vibration	64
3.5	Main Circuit Units of Aerial Gamma ray Spectrometer	64
3.5.1	Consideration of Main Circuit Units	64
3.5.2	Framework of Main Circuit Units	65
3.5.3	Key Circuit of Digital Gamma ray Spectrometer	71
3.5.4	Testing	109
	References	112
Chapter 4	Airborne Gamma ray Spectrometry (AGS) Techniques	114
4.1	Relationship Between Exposure and Height	114
4.1.1	Theoretical Calculation	114
4.1.2	Simulation by MC Method	116
4.1.3	Experiments	120
4.2	Relationship Between Gamma ray Spectrum and Water Content in Soil	123
4.2.1	Theoretical Model	123
4.2.2	Simulation by MC Method	124
4.2.3	Experiments	127
4.3	Spectrum Analysis of Airborne Gamma ray Spectrum	129
4.3.1	Denoise and Weak Peak Analysis Method	129
4.3.2	Baseline Estimation Method	135
4.3.3	Full Spectrum Analysis Method	138
4.4	Radon Correction for Airborne Gamma ray Measurement	145
4.4.1	Influence of Radon in the Air	145
4.4.2	Spectral-Ratio Radon Correction in AGS	149
4.4.3	Spectral-Ratio Coefficients	151
4.5	Geological Response of Low Energy Gamma ray Spectrum	158
4.5.1	Relationship Between Low Energy Spectrum and Lithology	158
4.5.2	Influence of Air on Low Energy Spectrum	162
4.5.3	Application of Low Energy Spectrum to Ground Gamma ray Measurement	166
4.6	Calibration of Airborne Gamma ray Spectrometer	171
4.6.1	Stripping Method	171
4.6.2	Full Spectrum Analysis Method	173

References	174
Chapter 5 Data Processing and Interpretation	176
5.1 Data Processing Method	176
5.1.1 Variance Analysis Method	176
5.1.2 Principal Component Analysis Method	184
5.1.3 Trend Analysis Method	188
5.2 Extraction Weak Information Method	189
5.2.1 Denoise Method to Survey Data	189
5.2.2 Weak Anomaly Determination to Survey Data	196
References	199
Chapter 6 Application of AGS	200
6.1 Application of AGS in Geological Mapping	200
6.1.1 Example 1: Distinguishing Moyite Body in Hongshantou	201
6.1.2 Example 2: Distinguishing Weiya Granite Body	202
6.1.3 Example 3: Distinguishing Granite Body in South of Tangguertage	205
6.1.4 Example 4: Distinguishing Diorite Body in Jingerquan	205
6.1.5 Example 5: Distinguishing Diorite Body in Bieliezekehe	207
6.1.6 Example 6: Distinguishing Basic and Ultrabasic Rock Body in Hongshishan	209
6.1.7 Example 7: Distinguishing Complex Body in North of Saozishan	210
6.1.8 Example 8: Distinguishing Fan sedimentary rock Body in Sanhecun & Zhujia	212
6.1.9 Example 9: Geological Structure Mapping in Xiwuqi & Balinzhuoqi	212
6.2 Application of AGS in Solid Mineral Exploration	213
6.2.1 Uranium	214
6.2.2 Potassium	227
6.2.3 Non-Radioactive Minerals	234
6.3 Application of AGS in Oil and Gas Exploration	257
6.3.1 Example 1: Exploration in Shaertu Oil Field	258
6.3.2 Example 2: Exploration in Yangsanmu Oil Field	259
6.3.3 Example 3: Exploration in Zaoyuan Oil Field	259
6.3.4 Example 4: Exploration in Linpan Oil Field	260
6.3.5 Example 5: Exploration in Shuanghe Oil Field	262
6.3.6 Example 6: Exploration in Jinglou Oil Field	263
6.3.7 Example 7: Exploration in Qaidam Basin Lenghu Area Oil Field	264
6.3.8 Example 8: Exploration in the South of Erlian Basin Oil Field	266
6.3.9 Example 9: Exploration in Renqiu Oil Field	267
6.4 Application of AGS in Environmental Radiation Investigation	269
6.4.1 Example 1: Evaluation of Natural Radiation Environment in the South of Beijing	269

6.4.2	Example 2: Evaluation of Natural Radiation Environment in the South of Guangdong Zhu hai & Shenzhen Area	271
6.4.3	Example 3: Survey of Radioactive Contamination in Dongying	271
6.4.4	Example 4: Survey of Radioactive Contamination in Xinjiang, Weiya Area	272
6.4.5	Example 5: Survey of Aerial Radiation Environment in Shanghai	273
6.4.6	Example 6: Survey of Aerial Radiation Environment in Shijiazhuang	275
6.5	Application of AGS in Nuclear Emergency Monitoring	276
6.5.1	Usefulness of AGS in Nuclear Emergency	276
6.5.2	Methodology of AGS in Nuclear Emergency	277
	References	284

第 1 章 绪 论

1.1 航空伽马能谱探测技术的效能

航空伽马能谱探测技术是将专用的航空伽马能谱仪安装在飞机、飞艇、气球等飞行器上,在飞行过程中测量地表岩矿石、土壤、风化物等介质中放射性物质和大气放射性物质所放出的伽马射线,通过分析伽马能谱数据来获得地表介质和大气中放射性核素或元素含量的分布,进而寻找放射性矿床、非放射性矿床和评价地-空界面上放射性水平的核探测技术。该技术能适应复杂条件下的测量工作,尤其是在中低山区、平原、戈壁等地区更为优越,实践证明具有成果好、效率高、成本低等显著优势。

航空伽马能谱探测技术是寻找铀、钍等放射性矿床和钾盐的最有效方法之一。在各种元素含量接近克拉克值的岩石中,平衡铀系及钍铀系放出的 γ 射线能注量约占地-空界面上天然放射性核素总光子能注量的 25%以上,平衡钍系约占 32%,钾-40 核素占 42%^[1]。出露地表或埋藏较浅的铀、钍矿体和钾盐矿体是近地表强的伽马辐射体,不论是地面伽马能谱测量方法,还是航空伽马能谱测量方法,都是一种直接寻找铀、钍放射性矿床和钾盐的有效勘查方法。据不完全统计,我国大约 80%的大中型铀矿床是通过航空和地面放射性测量发现的。

航空伽马能谱探测技术也可用来普查在成因上与放射性元素相关的其他矿产,如稀土矿、贵金属矿、多金属矿、铁矿、石油及天然气等;还可用来进行地质填图(如圈定地层、岩体和构造等)、探测地下燃煤区、寻找地下水资源,以及为解决其他地质问题提供依据。

航空伽马能谱测量已发展成为环境放射性污染调查与评价(如估算陆地伽马空气吸收剂量率、编制氡地质潜势图)、核设施监测、核事故应急事件监测的主要支撑技术。1986 年 4 月,苏联切尔诺贝利核电站发生特大核事故(7 级)后,其产生的放射性烟羽云飘散到瑞典大部分地区并沉降下来。瑞典快速进行了核应急航空伽马能谱测量,完成了放射性沉降物填图和相关核素的活动分布图,随后每隔一年进行一次监测。美国、加拿大、瑞典、法国、英国、德国、日本、俄罗斯、瑞士、比利时、印度等国家均建立了核事故应急航空监测系统。我国也建立了核应急系统,航空伽马能谱测量已成为核应急的重要技术支撑。在广东南部的珠海—深圳地区,通过航空伽马能谱测量取得了珠海、深圳等城市的地面天然辐射测量数据和海面宇宙射线电离辐射剂量率,查清了珠海—深圳地区的天然辐射水平及其对人文活动造成的影响程度,进行了环境评价研究,探索出一套适合城市环境调查的测量技术、质量控制和解释方法^[2]。

1.2 航空伽马能谱探测仪器的进展

航空放射性测量在 20 世纪 60 年代以前仅是总量测量,随后开发了航空伽马能谱测

量系统。欧美地区于 20 世纪 70 年代开发了 256 道航空伽马能谱测量系统, 采用了恒温方式的稳谱技术, 增加了上测探测器的大气氦监测与修正功能, 测量数据为数字式输出、磁带记录。代表性产品有美国 GR-800 型和加拿大 MCA-2 型 256 道航空伽马能谱测量系统等, 其采用 5 条长方体 NaI (TI) 晶体组合成一箱, 每条晶体大小为 $10\text{cm} \times 10\text{cm} \times 40\text{cm}$ 。以 4 条为下测晶体, 记录地面放出的伽马射线; 以 1 条为上测晶体, 进行大气氦的监测与修正。20 世纪 80 年代以来, 国外开发的航空伽马能谱仪主要有加拿大的 SAIC-Exploranium 公司研制的 GR-820、GR-460 系列; Pico Envirotec 公司研制的 GRS-10、GRS-16 系列及 Radiation Solutions 公司研制的 RS-500、RS-700 系列。均采用自动稳谱技术, 伽马能谱测量道数为 256 道或者 512 道, 测量数据是数字输出、硬盘记录。采用两箱晶体的地面探测灵敏度一般可达到: 钾, $150\text{cps}^{\text{①}}/\%$; 铀, $15\text{cps}/(10^{-6}\text{g/g})$; 钍, $8\text{cps}/(10^{-6}\text{g/g})$ 。Exploranium 公司于 2004 年为 UAV (无人驾驶飞机) 设计了新的伽马能谱测量仪 GR-460, 以期应用于核应急事件探测, 也可应用于矿业勘探。随着航空伽马能谱系统的发展, 国际原子能机构和欧美部分国家已逐步形成了航空伽马能谱测量可供参考的操作规范 (如 METHOD323), 并配套了较完善的测量软件。

我国在 20 世纪 70 年代以前, 航空放射性测量工作是以找铀矿为目的, 主要采用苏联研制的 ACT-10M 型、ACT-25M 型航空伽马测量仪, 空中记录放射性总量数据、磁测数据和雷达高度数据, 记录方式是模拟记录。20 世纪 70 年代, 我国研制了 FD-123 四道航空伽马能谱测量系统。该测量系统由北京 703 航测队 (核工业航测遥感中心前身) 与北京综合仪器厂联合研制, 采用国产圆柱形 NaI (TI) 晶体 (体积大小为 $\phi 200\text{mm} \times 100\text{mm}$) 的双探头, 并在探测器内加入人工核素辐射源实现仪器微分谱线漂移的自动校正, 记录方式是纸带模拟记录。由于该仪器晶体体积小, 灵敏度低, 且未考虑大气氦的修正, 因而能谱窗数据质量较差。该测量系统在 20 世纪 70 年代我国铀矿勘探中发挥了一定作用。到 80 年代中期, 由当时的北京铀矿地质研究院采用国外探测器组件, 组装了 AS2000 型 4 道航空伽马能谱测量系统, 也未进行大气氦修正, 采用数字式磁带记录方式。

自 20 世纪 80 年代中期以后, 国内对航空伽马能谱仪的研制开发工作一直处于停顿状态, 航空伽马能谱测量的硬件完全依赖进口。但是, 对航空伽马能谱测量结果的解释技术与应用研究从未间断。中国国土资源航空物探遥感中心、核工业航测遥感中心先后开展了航空放射性测量技术在地质矿产调查、铀资源调查、环境调查与监测、国土资源调查、核应急航空监测、海洋地质调查等领域的应用与研究, 形成了较系统的航空伽马能谱测量资料解释技术, 开发了相应的数据处理软件 (如空中探针 Geoprobe), 建立了航空伽马能谱测量的行业标准 (如 EJ/T1032-2005 航空伽马能谱测量规范)。

在“十一五”期间, 为了提升我国航空地球物理勘查的装备水平和技术水平, 在国家 863 计划资助下, 在“资源环境技术”领域设立了“航空地球物理勘查系统”重大项目, 在该重大项目中设置了“航空伽马能谱勘查系统研发”课题 (课题编号: 2006AA06A207)。经课题组 4 年的科技攻关, 于 2010 年研制成功了具有自主知识产权的 AGS-863 全数字化航空伽马能谱测量系统, 该测量系统可同时接入 NaI (TI) 晶体 20 条, 可探测能量范

① cps 为每秒计数。

围为 0.02~10.0MeV, 采样周期为 0.5~1s, 最大计数通过率大于 10^5cps , 1024 道谱漂小于 ± 1 道。该系统在内蒙古地区完成了 2 万多公里测线的航空物探飞行, 在东部沿海地区完成了 3 架次核应急监测, 获得了高质量的航空伽马能谱数据, 表明该测量系统具有良好的低能谱段分辨能力和高精度的对地探测能力。

1.3 各章节主要内容安排

全书共分 6 章。第 1 章绪论部分主要介绍了航空伽马能谱探测技术的效能和航空伽马能谱仪的进展。

第 2 章论述了航空伽马能谱探测的理论基础。重点探讨了地-空界面上伽马射线的来源、地-空界面上天然伽马能谱成分的变化、不同形状辐射体空中伽马射线照射量率和航空伽马射线仪器谱的形成及复杂化。

第 3 章介绍了航空伽马能谱仪。包括航空伽马能谱探头和航空伽马能谱仪的电子线路单元等。

第 4 章论述了航空伽马能谱测量方法技术。重点探讨了不同高度空中伽马射线照射量率变化规律、不同湿度土壤上方伽马射线能谱变化、航空伽马射线仪器谱的解析技术、航空伽马能谱测量大气氡校正技术、航空伽马能谱测量低能谱段地质响应和航空伽马能谱仪标定技术。

第 5 章论述了航空伽马能谱测量数据处理与解释技术。重点介绍了航空伽马能谱测量数据处理方法、航空伽马能谱测量数据弱信息提取技术。

第 6 章介绍了航空伽马能谱探测技术的应用。论述了航空伽马能谱探测技术在地质填图、固体矿产勘查、油气勘探、辐射环境调查和核应急中的应用实例。

参 考 文 献

- [1] 成都地质学院三系. 放射性勘探方法. 北京: 原子能出版社, 1977
- [2] 熊盛青. “十五”以来我国航空物探进展与展望. 物探与化探, 2007, 31 (6): 279-284

第 2 章 航空伽马能谱探测的理论基础

2.1 地-空界面上伽马射线的来源

地-空界面上伽马射线的主要来源可以分成 3 类,即地表伽马射线、空间伽马射线和人工伽马射线。

2.1.1 地表伽马射线

地壳中的各种岩石和土壤都含有一定的天然放射性元素,能够自发地放出伽马射线,形成地表伽马射线。地表放射性物质一部分是以放射性系列的形式存在,另一部分是以不成系列的放射性核素形式存在。天然放射性系列有 3 种,即铀系列、钍系列和锕铀系列。3 种天然放射性系列核素的衰变纲图如图 2-1~图 2-3 所示^[1]。

铀系共有 18 个放射性核素。铀系的起始核素为 ^{238}U ,它的半衰期为 $4.47\times 10^9\text{a}$,经过 α 衰变后变成 ^{234}Th 。 ^{234}Th 经 β 衰变而成为 ^{234}Pa ,它有两种衰变方式,其大部分经 β 衰变而成为 ^{234}U ,小部分(占 0.15%)的原子核先经同质异能跃迁,放出 γ 射线,再经 β 衰变成 ^{234}U 。 ^{234}U 的半衰期为 $2.44\times 10^5\text{a}$,是铀系子体中最长的半衰期的核素。 ^{234}U 以后是一连串的 α 衰变,先衰变成 ^{230}Th , ^{230}Th 经 α 衰变为 ^{226}Ra 。 ^{226}Ra 半衰期为 1600a,经 α 衰变为 ^{222}Rn 。 ^{222}Rn 是铀系中唯一的放射性气体,其半衰期为 3.825d。 ^{222}Rn 经过 α 衰变后成为 ^{218}Po ; ^{218}Po 的半衰期为 3.05min,它有两种衰变方式,其大部分(99.97%)

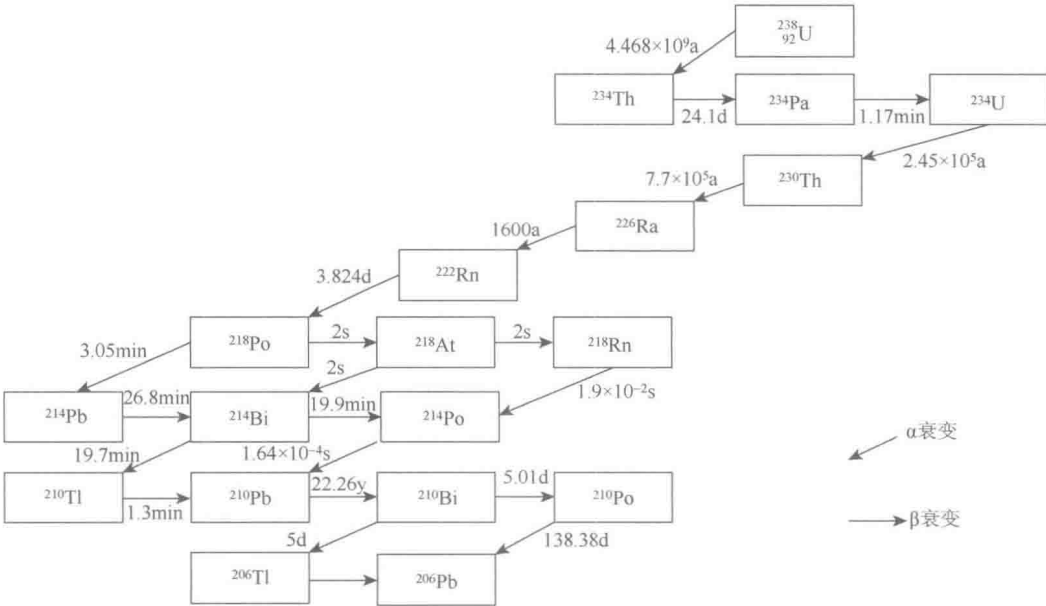


图 2-1 铀系衰变图