

密级： ,



中国科学院大学
University of Chinese Academy of Sciences

硕士学位论文

岩心成像光谱编录系统详细设计与关键技术研究

作者姓名： 王桂珍

指导教师： 张立福 研究员 中国科学院遥感与数字地球研究所

吴太夏 副研 中国科学院遥感与数字地球研究所

学位类别： 理学硕士

学科专业： 地图学与地理信息系统

培养单位： 中国科学院遥感与数字地球研究所

2015年 5月

**The Detailed Design and Key Technology Research on Core
Imaging Spectrometer Data Catalog System**

**By
Wang Guizhen**

**A Dissertation Submitted to
University of Chinese Academy of Sciences**

In partial fulfillment of the requirement

For the degree of

Master of [Cartography and Geography Information System]

**The Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy
of Sciences**

May 2015

中国科学院遥感与数字地球研究所

学位论文原创性声明和使用授权说明

原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。论文中凡引用他人已经发表或未发表的成果、数据、观点等，均已明确注明出处。除文中已经注明引用的内容外，本论文不含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。

本声明的法律责任由本人承担。

论文作者签名： 日期： 年 月 日

学位论文使用授权说明

本人在导师指导下完成的论文，知识产权归属中国科学院遥感与数字地球研究所。

本人完全了解中国科学院遥感与数字地球研究所关于收集、保存、使用学位论文的规定，同意研究所保存或向国家有关部门及机构送交论文的印刷版和电子版，允许论文被查阅和借阅；同意授权研究所采用影印、缩印、数字化或其它复制手段保存和汇编本学位论文。

本人保证毕业后，以本论文数据和资料发表论文（著作）或使用论文工作成果时，第一署名单位为中国科学院遥感与数字地球研究所，并征得导师同意。

保密论文在解密后遵守此规定。

论文作者签名： 导师签名：

日期： 年 月

摘 要

随着矿产勘查技术的不断发展,在地表开展矿产勘查的工作难度越来越大,勘查的主要方向已转向地表之下的大地岩层。岩心作为矿产勘查的最终环节,记录着地质体垂向变化信息,是珍贵的地质资料。在不破坏岩心表面及内部结构的前提下,遥感作为一种新的矿产勘查手段具有宏观、快速、信息量丰富等优势,是地质找矿中不可或缺的手段。高光谱遥感技术具有依据不同矿物对不同波长光的反射差异探测岩心矿物组成及其相对含量的能力,所获得的遥感地质信息有利于地质专家分析地质成矿条件,圈定找矿远景区和目标靶区,为开展详细地质工作提供可靠的依据。

本文以实现岩心成像光谱数据编录系统设计为目标,对岩心成像光谱编录系统的关键技术和系统功能和界面进行详细的设计。在充分考虑用户需求的前提下,通过对岩心编录所需要的稳定、高效、准确等方面研究总结,针对矿物的光谱特征,分析岩心成像光谱数据的光谱质量,探讨光谱匹配技术的精度,对岩心成像光谱编录系统功能进行详细的分析和设计;从用户使用习惯、方便快捷掌握软件和界面美观大方三个方面展开了岩心成像光谱数据编录系统的详细设计。论文的主要成果和结论如下:

1. 分析和总结了常见蚀变矿物的光谱特征,并在此基础上探讨了高光谱数据的各种矿物的光谱信息提取方法,如最小距离匹配、光谱角度匹配、光谱吸收指数等。用这些方法评估岩心成像光谱数据的光谱质量,探讨光谱匹配技术的精度,将光谱特征量化,以数学计算的方法实现未知目标的判别,解决岩心矿物识别的问题,实现岩心快速解译和分析。
2. 在深入分析岩心成像光谱数据编录系统的功能需求和目标、全面设计系统体系结构以及对编录系统功能构架和界面设计原则的研究基础上,根据岩心成像光谱数据的特点和形态应用的需求,提出了 HyCore 编录系统的整体设计方案。
3. 详细设计了岩心成像光谱编录系统界面和功能模块。将界面分为菜单栏、常用工具栏、钻孔显示窗口、岩心编录窗口、数理分析窗口和参数设置窗口 6 个部分,并对每个部分的详细功能进行设计,在满足岩心编录各个功能的基础上,力求空间的合理安排和界面的美观;功能模块设计中从用户角度设计为编录

系统的自动功能,实现数据的导入、自动裁剪、自动解译和地质资料的编辑等。

关键词: 成像光谱 钻孔岩心编录 界面设计 功能设计

Abstract

With the continuous development of mineral exploration technology, the surface mineral exploration work became more and more difficult. The main direction of the mineral investigation is toward the underground. Core as the final link in mineral exploration keep the records of vertical change geological information. Without undermining core surface and destroying the core integrity, remote sensing as a new technology have macroscopical, fast and informative advantages. It is an indispensable means of geological prospecting. Hyperspectral remote sensing technology has the ability to identify the different minerals and composition according to the different minerals have different spectrum feature. Geological experts can use remote sensing geological information to analysis the geological metallogenic conditions, find prospecting areas and delineate target goals which providing good information to carry out detailed geological work.

The goal of this paper is design the core imaging spectrometer data catalog system including the interface and system function design. Firstly, in the condition of full consideration of the needs of users, the core catalog need stable, efficient, accurate, etc. This paper make a detail design on the core imaging spectrometer catalog system. Also this paper explore the spectral characteristics of rocks and minerals and study the key technologies of mineral identification. Then this paper work on the detailed design of the core imaging spectrometer system catalog fully considering three aspects: user habits, convenient and elegant interface master the software. The main results and conclusions are as follows:

1. Analyzed and summarized the common spectral characteristics of altered minerals. On the knowledge of various mineral spectral information, this paper studied the hyperspectral data extraction methods, such as the minimum distance matching, spectral angle matching, spectral absorption index etc.; Evaluated the spectral quality of core imaging spectral data using these methods, and investigated the accuracy of spectral matching technique. Quantified the spectral characteristics of minerals and used the mathematical methods in calculations to achieve unknown targets. Solved the

core mineral identification problem, rapidly realized the translation and analysis of core information.

2. Based on the analysis and summarize the spectral characteristics of common alteration minerals, this paper explore the spectral information enhancement and various mineral extraction methods, such as spectral derivative, envelope removal, the minimum distance matching, spectral angle matching and spectral absorption index. Using those methods to make comprehensive statistical analysis of imaging spectrometer data core, the spectral characteristics can be quantified with the method of mathematical calculations to achieve the goal of determining the unknown targets. It solve the identified problems of the mineral core and achieve quick deciphering and analysis.

3. This paper amply design the interface and function modules of the core imaging spectrometer catalog system. The interface is divided into six part menu bar, toolbar, drilling display window, core catalog window, mathematical analysis window and parameter setting window. And design detailed function of each part to meet the basic need of each catalog functions. Also the interface strive to reasonably arrange space and make beautiful interface. From the user point of view the function module was design to automatically catalog to achieve the function of import of data, automatic cutting, automatic interpretation and editing and other geological data.

Key words: Imaging Spectrometer; drill core record compiling; interface design; function design

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 研究内容与论文结构	3
第 2 章 岩心编录系统研究现状.....	6
2.1 岩心光谱编录系统发展现状	6
2.1.1 国外研究现状	6
2.1.2 国内发展现状	8
2.2 HyCore 岩心成像光谱系统.....	9
2.2.1 硬件结构	9
2.2.2 数据特点	14
2.3 本章小结	15
第 3 章 HyCore 系统关键技术研究.....	16
3.1 矿物光谱特征	16
3.1.1 粘土矿物光谱特征	16
3.1.2 碳酸盐矿物光谱特征	17
3.1.3 铁染矿物光谱特征	18
3.2 光谱匹配技术	19
3.2.1 最小距离匹配	19
3.2.2 光谱角度匹配	21
3.2.3 光谱信息散度匹配	22
3.2.4 光谱匹配滤波	23
3.2.5 光谱吸收指数	23
3.3 矿物光谱匹配实验	25
3.3.1 数据光谱质量分析	25
3.3.2 光谱匹配算法精度	26
3.4 本章小结	30
第 4 章 HyCore 系统详细设计	31
4.1 HyCore 系统整体设计.....	31
4.1.1 系统需求与目标	31

4.1.2 系统整体架构	32
4.1.3 数据库存储结构设计	34
4.1.4 系统功能模块设计	36
4.1.5 系统界面设计原则	38
4.2 编录系统界面设计	40
4.2.1 菜单栏	41
4.2.2 常用工具栏	41
4.2.3 钻孔显示窗口	42
4.2.4 岩心编录窗口	43
4.2.5 数理窗口	46
4.2.6 参数设置窗口	47
4.3 编录系统功能设计	47
4.3.1 编录功能设计	47
4.3.2 地图管理功能设计	54
4.4 本章小结	57
第 5 章 结论与展望	58
参考文献.....	60
个人情况简介	65
硕士期间发表文章情况	65
硕士期间参与项目情况	65
致谢	66

第1章 绪 论

1.1 研究背景及意义

自工业时代发展以来,矿产资源就成为一种十分重要的不可替代的非再生自然资源,其储量和采量制约人类生存,限制人类社会的发展。它是极其重要的生活资料和社会生产资料。随着工业社会的快速发展,矿产资源已经成为决定经济增长的重要因素。自新中国成立以来,我国矿产勘查工作取得了长足的发展,矿产勘查范围的不断扩大为国家探明了大批矿产资源,基本上保证了国民经济建设的需求。然而随着矿产勘查技术的不断发展,利用遥感技术在地表开展矿产勘查的工作难度越来越大,遥感勘查的已转向地表之下的大地岩层(王晋年等,2012)。岩心作为矿产勘查的最终环节,记录着地质体垂向变化信息,是珍贵的地质资料。调查表明,每年我国有上百万米的钻探任务,产生大量的岩心(如图 1-1 所示),然而岩心保存的成本高昂使得这些岩心在编录后常常被抛弃,造成大量的资源浪费和资料丢失,对后续的研究非常不利(郭峰利 and 杨联荣,2012)。如何保存岩心资料,尽可能的提取岩心的地质信息成为岩心矿产勘查的重要任务。

传统岩心分析方法有物理法(测井等)、化学法(实验室化验)。地球测井资料包含了许多有用的价值信息,其根据记录地下岩石对声的反射所产生的回波幅度和回波时间等参数,探测岩石电阻率等方法测量岩石地层和岩石裂隙等信息,然而传统的地球测井资料只是单一的一条曲线,存在多解性和局限性(万应明 et al., 2005)。成像测井资料具有实时测量反映地下实际的温压和流体环境,能够获取连续、准确的裂缝的空间方位信息,但其成本很高在实际地质勘测应用中十分有限(童亨茂,2005; 张筠,2003)。地球化学分析方法能够准确的确定矿物元素的含量,但其破坏了岩心样品的完整性,很难给出物质成分(物相)的含量,所测得的结果也受到采样间隔的限制。岩心沉积相的划分是根据人工目视解析所描绘岩心的方法,难以刻画岩心的真实形态。当前被普遍采用的矿物鉴定方法有薄片镜下鉴定和 X 射线衍射(XRD),这两种方法都具较高的可靠性,是应用历史悠久的传统方法。薄片镜下鉴定是当前地学研究中常用的矿物成分鉴定方法,其通过观察矿物形态、物理性质、矿物共生特征及矿物间相互关系来鉴别矿物种类和

岩石类别。然而许多客观条件限制着 X 射线衍射的使用，如其需要先将岩石切成薄片，耗时长；不同的研究人员根据自身的经验而获得的鉴定结果具有较大的差异性，鉴定结果受到鉴定人员主观判断的影响；鉴定一个样品工作量大，工作周期长；只能获得采样点的矿物分析结果。X 射线衍射仪作为常用的岩心矿物鉴定方法，将获得的岩心样品粉碎后测量岩心衍射图谱并应用相关软件分析。与化学分析方法对比此方法能够鉴别相同元素组成的不同矿物，通过衍射强度判断物质的相对含量。然而 X 射线衍射（XRD）只对结晶矿物能进行有效的分析，且分析鉴定必须对样品进行粉碎后才能测量，破坏样本的完整性。这种鉴定方法同样存在人力物力投入大，工作周期较长等客观条件的限制。为此，学者不断探索岩心编录的新方法新技术（刘树臣, 2003）。在不破坏岩心表面及内部结构的前提下，遥感作为一种新的矿产勘查手段具有宏观、快速、信息量丰富等优势，是地质找矿中不可或缺的手段，高光谱遥感技术具有依据不同矿物对不同波长光的反射差异探测岩心矿物组成及其相对含量的能力，所获得的遥感地质信息有利于地质专家分析地质成矿条件，圈定找矿远景区和目标靶区，为开展详细地质工作提供可靠的依据。

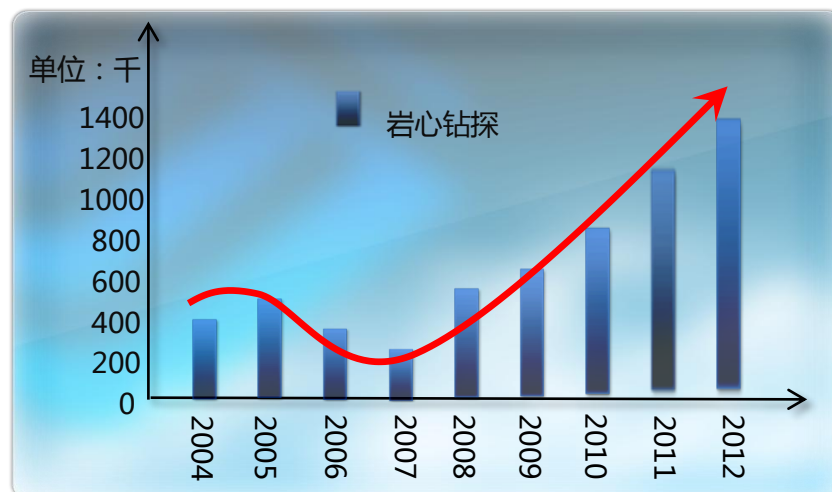


图 1-1 我国 2004-2012 年岩心钻探量（来源：《中国矿业年鉴》）

成像光谱技术是高光谱遥感技术中的重要分支。自 1983 年美国喷气推进实验室（JPL）研制出世界上第一台成像光谱仪 AIS-1 之后，在短短的 30 多年间成像光谱技术已经成为一个颇具特色的前沿领域。一些典型的成像光谱仪应运而生，如美国的航空成像光谱仪 AIS、HYDICE、SEBASS，加拿大的 CASI，澳大利亚

的 Hymap 和我国的 OMIS、MAIS 以及星载高光谱成像仪,如美国的 Hyperion, 欧空局的 CHIRS。成像光谱仪为每个像元提供数十个至数百个窄波段的光谱信息,其波段宽度小至纳米(nm)数量级,因此这种仪器能以足够的光谱分辨率区分出那些具有诊断性光谱特征的地表物质。如果说图像空间分辨率的显著提高增强了地物的细节信息,那么高光谱的连续光谱特征为定性、定量识别地物提供可靠的技术支持。随着成像光谱技术的发展,高光谱遥感技术在岩心编录系统中有了重大的应用。利用岩心光谱扫描系统探测地下岩层,获取岩石矿物的高光谱数据,开展岩石矿物的地表和地下三维立体填图等,成为世界各国地质研究的热点。国际上有许多科研单位和公司从事地面成像光谱仪的研究和研制,如美国的 Resonon 和 Surface Optics Corporation 公司,芬兰的 Spectral Imaging Ltd.公司。在成像光谱仪应用方面,美国、澳大利亚等国家的矿业部门已大量采用地面成像光谱仪技术获取地表岩石矿物的精确高光谱信息,利用岩心光谱扫描技术于选矿和精细采矿等工作,有效的节省了工作时间。当前遥感矿产勘查技术应思考如何基于钻探工程,充分发挥高光谱遥感找矿的技术优势,实现深部成矿信息的快速识别,高效完成深部地质体结构和物质成分的精细探测。利用高光谱遥感技术,开展钻孔岩心高光谱测量和编录,针对岩心进行光谱特征分析,是岩心信息挖掘和地质信息获取的新方向。

每年我国有上百万米的钻探任务,产生大量的岩心,针对岩心资料的保存和利用,我们亟需设计一款方便快捷的岩心数据编录系统。此系统能够支持岩心数据的编录、存储、查找和分析。目前我国尚没有一款完整的岩心成像光谱编录系统,建立具有自主知识产权的岩心成像光谱编录系统对我国矿产勘查具有重要的意义。

1.2 研究内容与论文结构

本研究的最终目标是在充分调研岩心高光谱扫描的用户需求、仪器设备功能、算法可靠性等内容的基础上设计好 HyCore 岩心成像光谱编录系统的功能和界面。主要分为关键技术研究、功能设计和界面设计。

岩心成像光谱数据编录系统详细设计和关键技术研究,主要分两个阶段开展研究:第一个阶段充分调研岩心编录过程中需要解决的问题及技术难点,针对矿

物的光谱特征，分析岩心成像光谱数据的光谱质量，探讨光谱匹配技术的精度；第二个阶段以用户为核心，详细设计岩心成像光谱数据编录系统的功能和界面，研究了岩心成像光谱编录系统的数据存取方法以及光谱的显示方式、蚀变矿物提取方法以及统计方法等，设计了岩心成像光谱数据编录系统自动处理界面，该界面集成了一些钻孔显示、深度编辑、高光谱数据显示以及矿物统计分析方法等，提出了一种岩心成像光谱数据自动编录的系统结构设计，能有效的提高岩心高光谱数据库的保存和分析。

论文首先在引言中介绍了研究背景和意义，其次从岩心成像光谱编录系统现状介绍了本文的现实意义，然后展开岩心编录系统关键技术研究，进行了岩心成像光谱数据编录系统的功能设计和界面设计，论文的整体结构如图 1-2 所示：

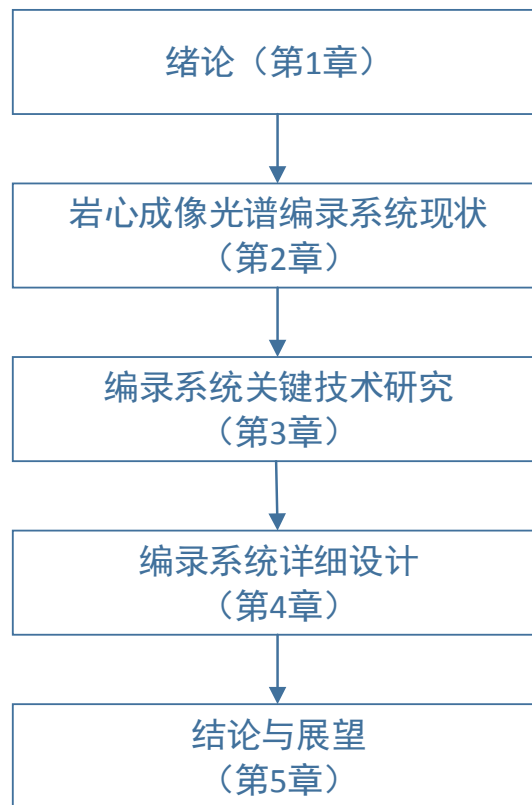


图 1-2 论文整体结构图

第 1 章，主要介绍本文的研究背景和意义，据此引出本文的研究内容和结构。主要介绍岩心资料的基本研究方法，包括：物理法、化学法和光谱分析法；岩心编录系统的应用前景，并对岩心编录系统的优势进行了简单的介绍。

第 2 章，对岩心成像光谱编录系统现状的调查和分析，通过对岩心编录系统的发展背景、目前各个国家所拥有的岩心编录系统、国内外发展现状以及存在的

问题进行深入探讨；从硬件结构以及数据特点两方面重点介绍了 HyCore 岩心成像光谱系统的特征，分析 HyCore 成像光谱系统的在岩心编录的优势与缺点。

第 3 章，研究了编录系统的关键技术。分析了自然界中不同类型的矿物光谱特征和形成原因，并对常用的光谱匹配算法进行详细的介绍，针对矿物的光谱特征，分析岩心成像光谱数据的光谱质量，探讨光谱匹配技术的精度。

第 4 章，对 HyCore 编录系统进行详细设计，包括整体框架的建立、界面设计和功能设计。整体框架的建立提出了岩心编录系统设计的方法与内容，分析了岩心编录系统总体的需求，确立了系统所需达到的目标，明确数据库的存储结构，从系统上完成编录系统的概要设计；界面设计从菜单栏、常用工具栏、钻孔显示窗口、岩心编录窗口、数理窗口和参数设置窗口这 6 个部分对编录系统界面进行了详细的设计与分析；对基本编录功能进行设计，如导入高光谱数据、自动裁剪、岩心自动解译和地质资料编辑等；对地图管理模块进行设计，如地图管理、数据属性编辑、和信息查询。

第 5 章，对全文进行总结，并对未来需要开展的工作进行了展望。

第2章 岩心编录系统研究现状

2.1 岩心光谱编录系统发展现状

2.1.1 国外研究现状

为了有效的利用和保存岩心资料,既可靠又方便快捷地实现对蚀变矿物的定量提取,国内外各科研团队对岩心进行高光谱测量,获取岩心的光谱数据,进行岩心矿物定性识别、定量分析和矿物填图。早在 1996 年 Kruse 利用 PIMA II 对岩心进行光谱测量,首次论证了岩心光谱分析的必要性和可行性(Kruse, 1996); 2003 年美国蒙大拿大学 Brock J. Bolin 利用 The Spectroscopy Group at Montana Tech 公司的 ALIS(Airborne and Laboratory Imaging Spectrometer)面阵 CCD 推扫型低空飞行成像光谱仪对斯蒂尔瓦特矿区岩心进行扫描,其中 ALIS 光谱范围为 444-796nm,光谱分辨率达 1.15nm。采用了传统缨帽变换方法提取出硫化矿床中的硫化矿物区域范围,结果与人工目视解压具有较好的对应性(B. J. Bolin and T. S. Moon,2003)。加拿大温哥华 Gitennes 勘探公司利用 PIMA-II 测量仪对秘鲁 Virgen Property 金矿远景区的岩心标本和露头样品进行了光谱测量,分析金矿成矿过程,识别与矿化有关的蚀变带(王晋年等, 2012)。

目前世界上拥有岩心高光谱成像扫描系统的国家仅有少数,岩心扫描系统建设处于迅速发展阶段。HyLogging 高光谱岩心编录系统由澳大利亚联邦科学与工业研究组织(CSIRO)研制。其光谱覆盖可见/近红外、短波红外和短波红外,实现岩心无损探测硅酸盐矿物、碳酸盐矿物、羟基矿物等蚀变矿物,在澳大利亚矿产勘查中得到广泛的应用。CSIRO 还研发了 TSG 标准岩心分析软件,实现光谱数据、图像数据和其他地质数据综合分析,并通过 XRD 和薄片镜下鉴定验证矿物含量与高光谱反演结果线性相关(Wang, et al.,2004)。英国南安普敦海洋中心(Southampton Oceanographic Centre)与瑞典 Cox Analytical System 公司合作开发的 Itrax 沉积物样芯扫描分析仪(Itrax Core Scanner)采用了数字 X 射线成像(digital X-ray microradiography)、光学成像和微观 X 射线荧光分析(X-ray Fluorescence)3 种技术用于岩心(沉积物样柱)的非接触式扫描,在获取完整

的高质量高精度数据同时保持了岩心的完整性和原始性(Thomson J, et al., 2006; Croudace I W, et al., 2006); 岩心综合扫描仪 MSCL (Multi-Sensor Core Logger) 由英国 GEOTEK 公司生产, 它可以测量电阻率、伽马射线、P 波速度、可见近红外光谱、远红外温度等 10 种参量, 应用于岩石岩心、湖泊沉积物柱状样、海底沉积物柱状样等。由德国 DMT 公司生产的 CORESCAN 岩心扫描仪实现岩心表面图像信息采集、传输和存储(刘宁等, 2004)。英国有运行中的 Spectral-Map 和 CoreScanII 岩心扫描系统。下面介绍一些典型的岩心扫描系统。

(1) HyLogging 高光谱岩心编录系统

HyLogging (Hyperspectral Logging) 是澳大利亚联邦科学与工业研究组织 (CSIRO) 研发的高光谱岩心编录系统, 该系统是面向对象、多层次的岩心矿物分析编录系统, 应用于岩心、岩石、碎屑等矿物样品的光谱测量。HyLogging 高光谱岩心编录系统能够顺着岩心方向连续等间距获取矿物反射光谱曲线及高分辨率彩色照片, 分析和识别多种矿物类别和蚀变矿物组合, 包括碳酸盐、硅酸盐、水合硫酸。HyLogging 光谱覆盖范围广泛, 包括可见近红外、短波红外和热红外区域。HyLogging 系统实现了快速高效无损扫描岩心、自动提取岩心矿物, 三维显示岩心矿物分布。HyLogging 系统包括三个硬件系统 Hylogger、HyChips 和 TIR-Logger 和一个软件系统 TSG。Hylogger 光谱覆盖可见近红外和短波红外, 且具有超强的工作效率, 每天能够扫描 700m 岩心(按每天工作 10 小时算); 而 Hychips 具有比 Hylogger 更高的空间分辨率, 不单单能够探测岩心, 还能探测粉末和其他材料的功能。TIR-Logger 为红外光谱测量仪, 能够分辨出可见近红外、短波红外所不能探测和分辨的矿物。TSG 软件针对地质学家而设计, 对岩心、土壤以及其他地质样品的波谱进行分析, 实现了岩心光谱测量数据的矿物自动识别(如黑云母、绢云母、高岭石、明矾石等), 并将光谱数据、岩矿地球分析数据、地球物理数据以及其他地质数据整合在一起便于综合对比分析。TSG 软件建立岩心数据库, 方便地质学者调用查看资料, 节约时间和成本, 为矿产勘查和采矿行业所服务。

(2) Multi-Sensor Core Logger 综合岩心探测系统

MSCL (Multi-Sensor Core Logger) 综合岩心探测系统是世界上目前拥有最全功能的岩心化学性质和地球物理综合探测系统。MSCL 应用于多方面的调查,

如沉积物柱状样、岩石、岩心等。**MSCL** 具有保持样品完整性, 同步测量多种数据、高效、准确、全自动等优点。最多可以测量的 10 种参数包括: **P** 波速度、伽玛密度、电阻率、磁化率、彩色分光光度计、自然伽玛射线、光学照相系统、高精度 **XRF** 元素浓度、远红外温度、可见光近红外地物光谱等, 客户根据自己的需要自由选择。不同的 **MSCL** 具备不同的结构, 可直接测量储藏在塑料管内的整个岩心, 也可测量剖开岩心。有些测量可以隔着铝制的或者不锈钢材质进行, 但通常来说隔着塑料的测量效果要好一些。多型号的 **MSCL** 配置具有很多优势, 可针对不同的岩心, 不同的操作条件, 不同的场合进行测量, 达到最佳效果。**MSCL** 性能非常稳定可靠、结实耐用, 既适合实验室也适合于野外, 已经广泛用于全球各国的岩心库、地质重点实验室、野外临时实验室、海上调查船、深海钻探船和工程船等。

2.1.2 国内发展现状

在岩心资料保存与利用方面, 国内主要采用岩心库实体保存、岩心测井、化学分析等传统方法, 岩心扫描技术作为岩心资料存储的新型技术, 在国内处于试验阶段, 只有少数学者对其进行了研究。胥燕辉等使用 **ASD** 地物光谱仪对磁铁石英型铁矿石样本进行光谱反射率测量, 提出建立岩心光谱编录系统的必要性, 生成相对应的地质光谱柱状图, 验证了采用岩心光谱反射率定量估计铁的品位的可行性, 对岩心编录提供实验基础和示范作用(胥燕辉, and 田庆久, 2005; 胥燕辉, 2006); 但由于该方法采用点光谱测量, 无法获取直观的图像。拟合采样点光谱反射率与铁的品位之间的联系具有较大的偏差。郭娜等对西藏甲玛铜多金属矿的热液蚀变矿物分布规律进行研究, 采用 **SVC** 短波红外光谱仪测量 32 个钻孔岩心, 获得上百条光谱曲线, 探测出白云母、黑云母、高岭石、绿泥石、硬石膏等对热液蚀变具有指示意义的蚀变矿物, 三维密集点显示蚀变矿物分布规律, 揭示热液活动现象。但是该方法采用点光谱测量法, 无法形成连续的图像, 且工作量大, 耗时耗力(郭娜, et al, 2012)。祁进平利用短波红外技术在紫金山矿区发现外围泥化带中可能存在的深部矿体(祁进平, 2011), 李晶等利用南京地质调查中心研发的 **CMS350A** 岩心光谱扫描仪实现对紫金山矿区岩心样品的连续和指定间隔的快速自动扫描, 在无需特殊制样, 无损样品的前提下, 快速获得岩心样品的红外

反射光谱并且自动解译出不同结晶度的高岭石、地开石、白云母、钠云母、叶蜡石和明矾石等蚀变矿物(李晶,et al, 2013; 修连存, et al, 2008)。此系统实现了定间隔的点光谱测量,实现自动无损矿物提取,但其测量最终还是具有间隔性。张杰林等利用核工业北京地质研究院引进的可见光-短波红外波段的高光谱成像光谱仪进行铀矿勘查,利用基于光谱吸收参数的三维矿物填图技术分析了岩心高光谱编录技术应用效果与应用前景,并通过拟合镁羟基、三价铁与铀含量探讨光谱反射率探测铀矿的可行性,基于光谱成像技术得到铀矿含量随岩心深度变化图。此系统已经应用于铀矿勘查中,与此相关的技术方法已成功申报了软件知识产权(张杰林等, 2013)。与前述相比,由核工业北京地质研究院购买的高光谱成像光谱编录系统,光谱范围覆盖可见-近红外波段,利用 CCD 探测技术实现了岩心钻孔的光谱成像测量,获得成像高光谱图像信息,使地面成像光谱技术高效应用于深部地质找矿。

2.2 HyCore 岩心成像光谱系统

2.2.1 硬件结构

我国图幅辽阔,矿产资源种类丰富,岩心钻探技术成熟,拥有大量的岩心,如何将高光谱岩心勘查技术应用于矿产勘查,提高矿产勘查速度,具有重大的意义。中国科学院遥感与数字地球研究所基于制冷面阵 CCD 地面成像光谱测量系统研制了岩心成像光谱测量系统 HyCore 如图 2-1、图 2-2 所示。其主要由三个系统即光机系统、计算机系统和电子学系统构成。电子学系统中的高光谱扫描仪是由中国科学院遥感与数字地球研究所和中国科学院上海技术物理研究所联合研制,其设计参照和借鉴了中国自主研发的航空推扫成像光谱仪 PHI 的设计原理,其主要技术指标如表 2-1 所示。

岩心成像光谱测量系统光谱测量范围为 400-2500nm,光谱覆盖可见、近红外和短波红外;实现了钻孔岩心的成像光谱测量,获得岩心高光谱分辨率信息和图像信息,实现了图谱合一;空间分辨率高达 1mrad,使得矿物光谱测量不存在混合像元问题;同时每天可扫描 3600m 岩心,显著提高岩心扫描速度。空间分辨率显著提高、图谱合一以及扫描速率的增加带来了大数据量的问题。

表 2-1 岩心组分测量系统基本参数

指标	参数
波段数/个	344
光谱范围/nm	437-902
光谱分辨率/nm	优于 5nm
地面分辨率/mm	最高可优于 2
实验室辐射定标精度/%	优于 5
成像速率/（帧/s）	20
扫描视场/度	-20--20
量化位数/位	12
信噪比	60%波段>500
光谱采样间隔/nm	约 1.4

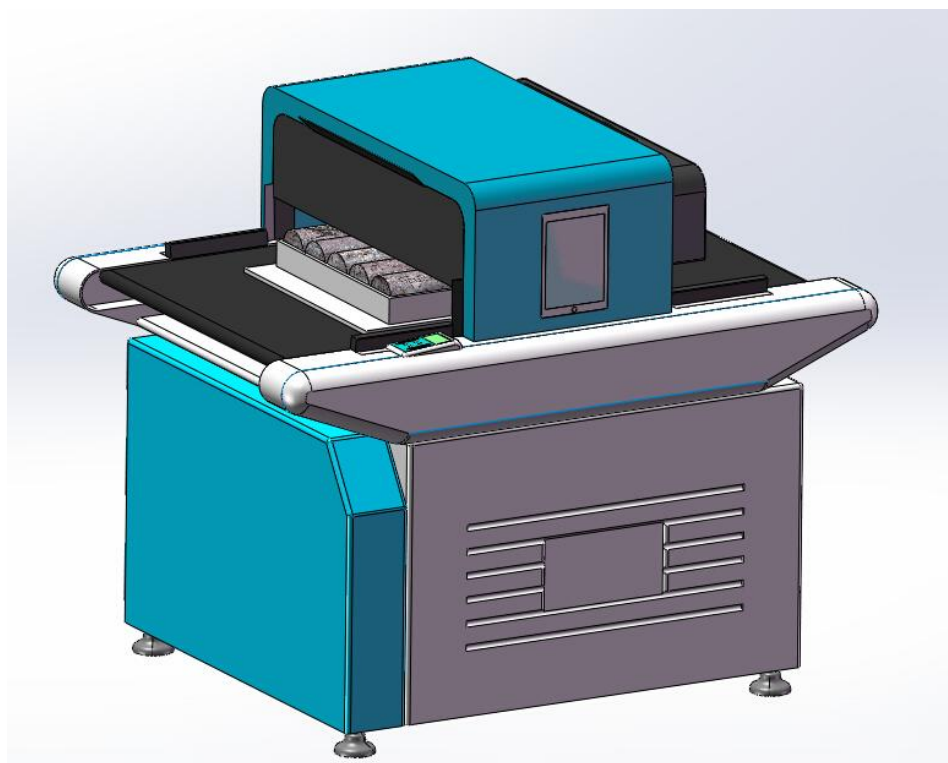


图 2-1 岩心组分成像光谱系统三维机械图

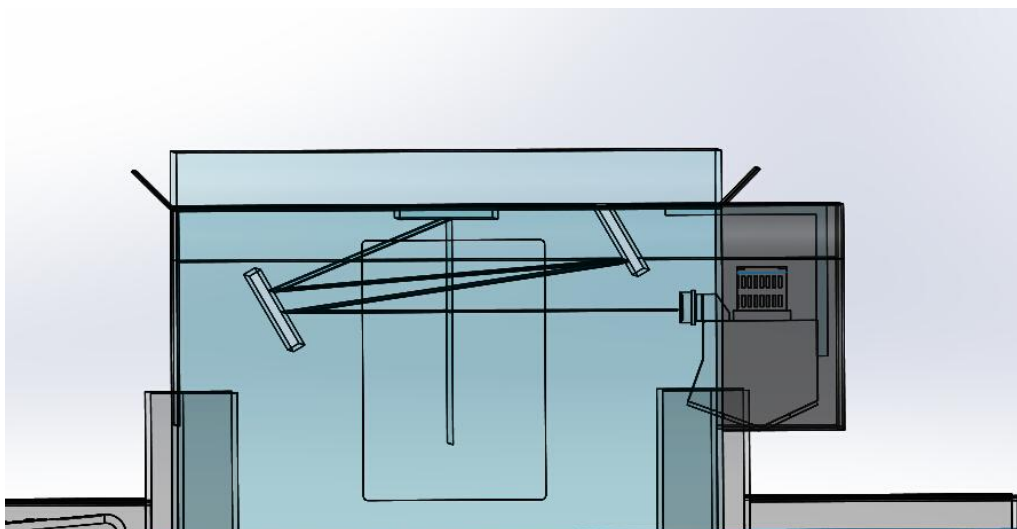


图 2-2 岩心组分成像光谱系统光路示意图

1. 物理结构

岩心组分成像光谱系统整体采用卧式车床结构,分为上部台体和下部基座两部分。底部基座左右各有一空间用于放置电脑等仪器。底部基座下部有支撑腿和移动万向轮。上部台体由平移台、转接板、岩心槽、岩心、白板、光源和光谱仪等部分组成。底部基座有支撑腿和移动腿两部分组成,当位置固定时,由支撑腿承重。当需要移动时将底部基座撑起离地,将移动腿放下使万向轮离地,可以任意方向移动。同时保证了固定的稳定性和移动的便利性,固定时万向轮不承重,处于保护状态。下部基座左右各有一空间用于放置平移台的控制箱和电脑主机。同时中空的结构也使得系统的重量较轻,保证了系统的轻便性。上部台体由平移台、转接板、白板、岩心槽、岩心、光源和光谱仪等组成。上部台体主体呈“C”型。坐落在底部基座上,中间形成空间用于放置位移台、岩心和光谱仪。此次设计采用实体结构是为了保证让整个系统震动最小、保证系统的稳定性和耐用性。

上部台体通过螺纹孔固定位移台,位移台通过转接板连接岩心槽,岩心槽内放置岩心样品。周围4个卤钨灯光源进行光斑叠加对岩心样品进行均匀照明,使用光谱仪进行光谱成像,同时得到岩心样品的图像和光谱信息。

2. 光谱定标

光谱定标是指确定探测器随波长变化的能量强弱程度,即仪器的光谱响应函数,进而得到每个波段的中心波长和谱带宽度,常常用半高宽表示(王建宇,1991)。

地面成像光谱辐射计的光谱定标采用北京光学仪器厂研制的单色仪进行定

标，单色仪型号为 WDG30-2，该单色仪的主要技术参数如下：

波长范围：190nm-900nm

波长准确度： $\pm 0.2\text{nm}$

波长重复性：0.1nm

采用自行开发的光谱定标软件进行标定，该软件包括光谱定标参数设置、光谱定标数据采集、光谱定标数据处理等功能。

通过软件控制，使得单色仪以一定步长输出单色光，同步记录地面成像光谱辐射计的成像光谱数据，当单色仪全扫描完成后，形成如图 2-3 所示的数据立方体：

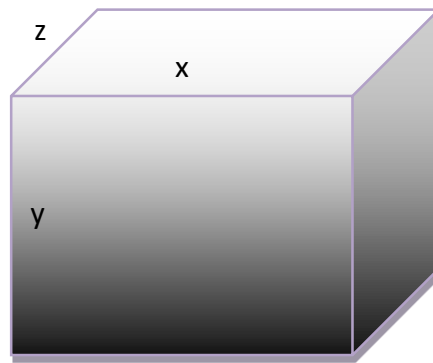


图 2-3 光谱定标数据立方体

数据立方体中 x 轴为空间维（464 个像元）， y 轴为波段维（344 个波段）， z 轴为光谱维（波长范围为 400nm-900nm，间隔为单色仪步进）。对于波段维 y 、空间维 x 上的任意一点（ y_0, x_0 ），若以 z 轴为光谱维，重新绘制的二维强度曲线即为波段 y_0 、点 x_0 的光谱响应曲线，根据该光谱响应曲线，可以计算出中心波长，全波半高宽等参数。

3. 辐射定标

采用积分球作为光源照射传感器整个视场，并分波段进行辐射定标，可获得不同波段时辐射亮度输入值和光谱仪器 DN 值之间的关系(潘明忠等, 2010)。通过各种标准辐射源，在不同谱段建立地面成像光谱辐射计入瞳处的光谱辐射亮度值与光谱辐射计输出的数字量化值之间的定量关系。

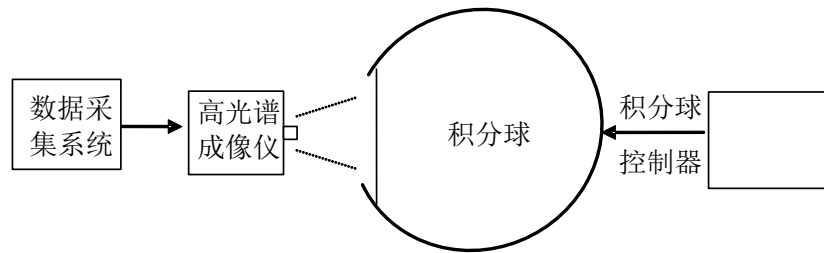


图 2-4 辐射定标框图

地面成像光谱辐射计实验室辐射定标标准光源采用积分球系统，积分球为 Labsphere 公司生产，型号为 VSS-6500，积分球直径 1600mm，出光口直径 550mm，内置 20 个卤钨灯。

下面介绍地面成像高光谱辐射测量系统测量规范(刘波, 2010):

1. 测量规范参数

- 1) HyCore 岩心测量一般在实验室内进行，采用卤素灯作为光源，分别布设在 HyCore 附件的四个小脚上。
- 2) 放置好岩心槽，将岩心槽置于 HyCore 正下方，固定在卡扣 1 和 2 之间，确保每次测量岩心槽的处于同一位。
- 3) 将处理后的岩心置于岩心凹槽中，并且最好使用与岩心反射率差异较大的板块（如黑色的纸板）将岩心与岩心之间的底板遮住，以便于岩心数据裁剪。
- 4) 设定好测量参数，开始进行岩心图像预扫描前，需实时观测光谱曲线通过调整积分时间与光圈设置来确定最合适的曝光量。由于高光谱成像存在能量细分限制了信噪比，因此在测量时需要保证 DN 值处于 CCD 探测元响应函数较高的线性响应范围内，防止数据曝光不足或者饱和。

- 5) 实时观察光谱曲线和图像，查看曲线形状、清晰度等，确保数据正常。

2. 推荐参数设置

测量时需要设置的参数为制冷温度、DN 动态范围、积分时间、光圈等级、视场角等。

制冷温度：HyCore 系统自带制冷系统，可以实现比环境温度低约 20-25℃ 的制冷能力，一般测量环境下设置制冷温度比当前环境温度低 20-25℃ 均可。

DN 动态范围：根据所测地物类型而设置，HyCore 可以设置为 0-4095，通常设置为最大值 4095。

积分时间：为了保证图像尽可能小的失真变形，需要确定一个合适的积分时间，可以设置的范围为 1-100ms，设置后不能变动。

光圈等级：HyCore 光圈等级可以设置的范围为 2.8-22 之间。配合积分时间

确定合适的曝光量。

视场角：视场角的设定因以岩心的长度相适应，HyCore 可以在正负 20° 之间变化为了保证一定的几何精度，常规上设置在正负 10° 之内。

3. 注意事项

(1) 系统检验与标定

- 1) 设定好测量参数后，应使用同样的参数测量所有的岩心数据。
- 2) 需要定期对 HyCore 测量系统进行辐射定标、光谱定标、几何定标等。
- 3) 将仪器存放于干燥的环境，温度保持在 0-40℃ 之间，湿度不大于 60%，

(2) 测量条件与环境

- 1) 测量环境应保证在室内测量并且被测物体光照需均匀一致，使用光谱范围宽广的四个卤素灯作为光源。
- 2) 测量时需要记录下 HyCore 测量系统的各种参数设置。

(3) 存储空间：由于 HyCore 系统成像光谱图像数据量较大，每次应保证计算机有足够的存储空间。

2.2.2 数据特点

HyCore 数据是典型的高光谱影像数据，具有与高光谱影像相同的数据特点。HyCore 数据拥有 344 个波段，每个波段有 38 万个像素，以 BIL（波段按行交叉）数据存储。设 P、B、L 分别表示像元维、波段维和扫描行，以三维数组表示图像 D 有：BIL 格式为 $D(P, B, L)$ ，其中扫描行 L 为最高维，波段维 B 为最低维；BIP 格式为 $D(P, L, B)$ ，其中波段维 B 为最低维，扫描行 L 为最高维；BSQ 格式为 $D(L, B, P)$ 。

数据的处理效率受到数据的存储格式的限制。高光谱数据常规存储有三种模式分别是 BSQ，BIL 和 BIP。常见的高光谱图像计算方式中，BIP 格式存储比较合适基于光谱曲线的读取和计算。如果影像是以 BSQ 或者 BIL 格式存储，则需要从不同的地方读取数据。如果是进行空间分析，则是以 BSQ 格式存储比较合适。BIL 格式介于 BIP 和 BSQ 之间，既 BIP 和 BSQ 的折中方法，便于光谱分析和空间分析。

根据硬件结构确定了每个像素的空间分辨率达到厘米级别，因此相对于岩心矿物蚀变信息提取，如此高的空间分辨率可以认为岩心不存在混合像元。由于每景 HyCore 数据的数量很大，一般都是一个 G 以上。每景数据有 5-8 个凹槽，每

个凹槽长 1m，扫描一幅影像时能够扫描 5-8m 的岩心数据，从而大大提高了岩心扫描的速度。然而此方法带来数据量大的问题，岩心成像光谱数据拥有众多波段和海量数据，而编录系统的矿物识别侧重于光谱信息的显示和分析，因此，采用 BIP 格式作为高光谱岩心数据的存储方式。

2.3 本章小结

本章主要从岩心高光谱编录系统发展现状和岩心成像光谱系统 (HyCore) 两个方面介绍了本文开展研究的相关理论基础。首先介绍了岩心高光谱编录系统，主要是对国内外岩心高光谱编录系统的发展现状进行了概述；然后对 HyCore 测量系统的硬件结构和数据特点进行了简单的介绍，这些基本知识和介绍为本文后续研究奠定了理论基础。

第3章 HyCore 系统关键技术研究

3.1 矿物光谱特征

不同矿物的光谱特征不同是光谱矿物成分识别的基础。自然界不同的化学成分造就了矿物类别的光谱差异，不同物理环境造就了矿物类别内的光谱差异。每一种矿物光谱特性的生成都有较为严格的物理和化学机制。即影响矿物光谱曲线的因素既有物体的自身因素，也有各种外在因素。其中内在因素包括矿物的化学物质、晶体结构、粗糙度等；环境因素包括，温度、湿度、成矿条件等(Goetz A F H et al., 1985;王润生, 2009)。然而研究发现，同种矿物的光谱特征基本稳定。在光学遥感数据普遍使用的波段范围内（400-2500nm），含有铁等过渡性元素的矿物通常在 400-1300nm 内有吸收特征；而波长在 1300-2500nm 内的吸收特征往往受到羟基、碳酸根和水分子的影响(Bandfield J L et al., 2003)。而中远红外波段的光谱特性则是由硅、铝等元素决定的。其中影响矿物光谱特征最大的是矿物内部结构中电子与晶体场的相互作用和晶格的振动，除此之外，矿物粒度和温度也对矿物的光谱特性有一定影响。一般而言，铁等过渡性阳离子因电子跃迁而在可见近红外具有特征吸收谱带，而碳酸根、羟基、水等基团因弯曲振动而在短波红外产生倍频与合频的光谱吸收特征。

由上可见，矿物岩石的主要光谱吸收特征与矿物的物质成分有较大的联系，通过分析含有不同物质成分的矿物所具有的光谱特征，以此为判别依据，可通过特定的光谱特征将未知矿物进行分类(甘甫平等, 2003)。

3.1.1 粘土矿物光谱特征

粘土矿物是一种微小的晶体，一般小于 2 μm ，是组成粘土岩石和土壤的主要矿物。主要是一些含铝、镁等的含水硅酸盐矿物。除坡缕石、海泡石具有链层状结构外，其余均具层状结构。粘土矿物广泛分布于自然界中，可在岩石、土壤、大气中寻得其踪迹。高岭石、蒙脱石、明矾石、伊利石、海绿石、石膏、绿泥石及云母类是较为典型的粘土矿物。粘土矿物的物理化学性质，如成分、结晶度、晶体大小等随环境的变化而变化，从而引起光谱特征发生迁移。其中温度对粘土

矿物的影响尤为突出,如绿泥石、伊利石、白云母等因形成的温度不同,同种矿物间的光谱吸收位置发生迁移现象(Sokolik I N et al., 1999; 罗慧芬, 2010)。

粘土矿物的主要成分是羟基,羟基离子光谱特征通常出现在 $1.4\mu\text{m}$ 、 $1.9\mu\text{m}$ 和 $2.2\text{--}2.4\mu\text{m}$ 三个波长位置,其中 $2.2\mu\text{m}$ 处的吸收特征是羟基的典型吸收特征(刘衍宏 等, 2010)。由于羟基配位元素的不同,光谱吸收特征有所差异。当铝与羟基团配位时,称为铝羟基,其在 $2.2\mu\text{m}$ 处的吸收特征为其诊断光谱特征;当镁与羟基团配位时,称为镁羟基,其在 $2.3\mu\text{m}$ 处的吸收特征为其诊断光谱特性。高岭石在 $2.16\mu\text{m}$ 和 $2.20\mu\text{m}$ 处具有双吸收峰特征。绢云母和伊利石在 $2.20\mu\text{m}$ 处具有较为明显的吸收特征,其主要是由 Al-OH 基团的振动引起。然而,绢云母比伊利石具有更深的吸收峰,此特征可将二者区分开来。 $2.34\mu\text{m}$ 吸收峰则是绿泥石的吸收特征,其主要是由 Mg-OH 基团的振动引起。

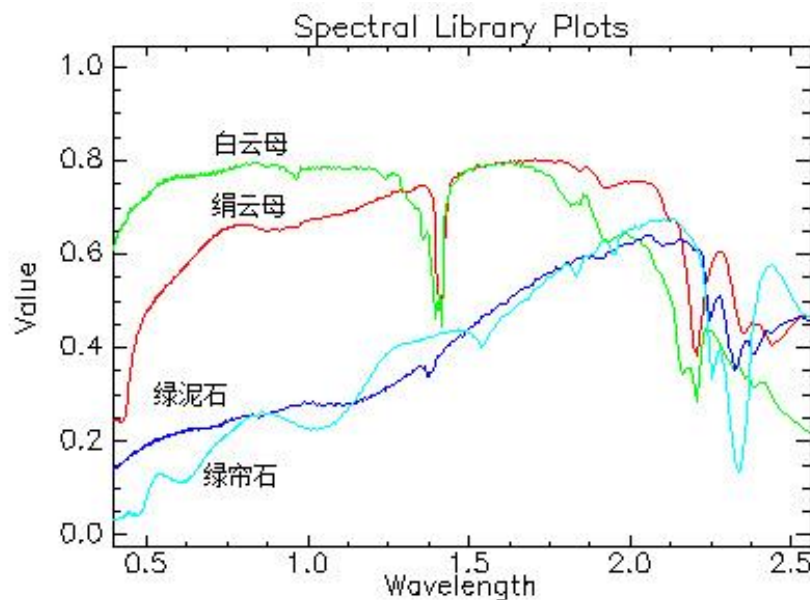


图 3-1 典型粘土矿物波谱特征

3.1.2 碳酸盐矿物光谱特征

碳酸盐矿物中,阴阳离子和其结合体是光谱曲线主要影响因素。 CO_3^{2-} 阴离子中的 C 与 O 为强共价键,而离子键为 CO_3^{2-} 离子与金属阳离子结合的方式。金属离子跃迁决定着在碳酸盐岩矿物在 $1.3\mu\text{m}$ 之前的光谱特征。基团振动影响着碳酸盐矿物在 $1.3\mu\text{m}$ 之后的光谱特征。在近红外区域,碳酸盐矿物有五个显著光谱特征带: $1.9\mu\text{m}$ 、 $2.0\mu\text{m}$ 、 $2.16\mu\text{m}$ 、 $2.35\mu\text{m}$ 和 $2.55\mu\text{m}$ 。其中, $2.35\mu\text{m}$ 和 $2.55\mu\text{m}$

是相对清晰的两个光谱吸收特征，强度比其余三个强，是碳酸盐矿物的诊断光谱特征(Bandfield J L et al., 2003)。白云石诊断吸收特征的中心波长位于 $2.30\mu\text{m}$ ，而石灰岩中心波长位于 $2.33\mu\text{m}$ 。

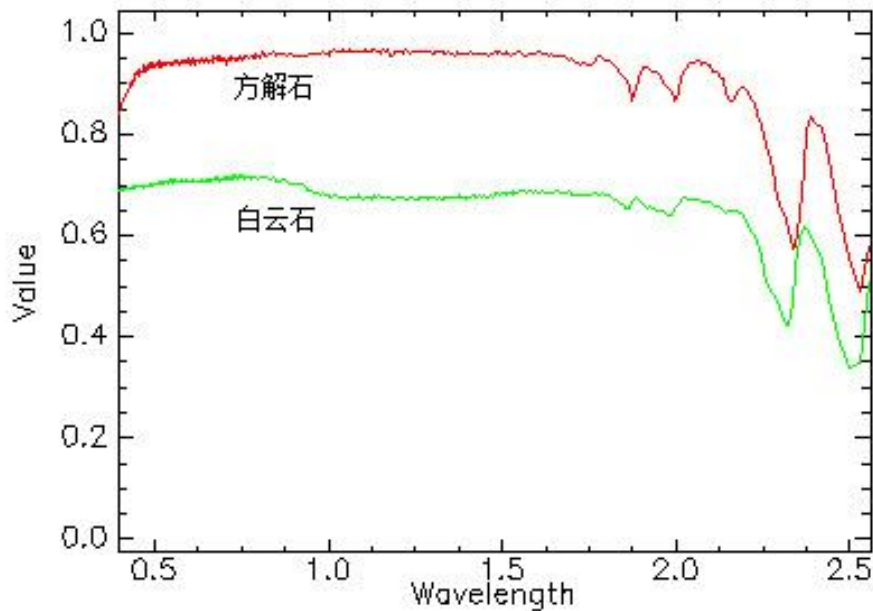


图 3-2 典型碳酸盐矿物的波谱特征

3.1.3 铁染矿物光谱特征

铁是地壳中含量第二的金属元素，其单质、合金化合物在生产生活中的应用广泛。在矿物成分中铁元素是十分重要组成部分，铁染矿物通常与金、铜以及相关的其他重金属有关，因此铁染矿物对金矿和铜矿等重金属矿床具有及其重要的指示意义。

自然界中的铁元素常常以二价铁和三价铁的形式存在。 Fe^{2+} 和 Fe^{3+} 都有特征吸收峰存在，含 Fe^{2+} 的矿物在 $1.0\text{-}1.1\mu\text{m}$ 处有特征吸收峰存在，是强而宽的吸收谱带；含 Fe^{3+} 的矿物在 $0.6\text{-}0.9\mu\text{m}$ 处有特征峰，相对 Fe^{2+} 弱，由于自然界中由于氧化作用等，二价铁容易氧化成为三价铁，因此铁化合物的光谱特征主要显示在这个波段间。

二价铁矿物中黄铁矿最典型的矿物。黄铁矿在可见光波长范围内几乎没有光谱吸收特征。在近红外范围内，光谱吸收特征逐步展现。 Fe^{2+} 离子在 $1.1\mu\text{m}$ 和 $1.5\mu\text{m}$ 之间存在吸收带，但光谱特征不明显，无法通过光谱判断。但天然黄铁矿易收

到环境影响氧化成由针铁矿和水针铁矿等组成的褐铁矿。在氧气充足的条件下，可导致二价铁的完全氧化，成为黄钾铁矾。 $0.8\mu\text{m}$ ， $2.195\mu\text{m}$ ， 1.9 m 和 $1.4\text{ m}\mu\text{m}$ 附近的吸收峰成为识别褐铁矿、赤铁矿和黄钾铁矾的主要特征吸收谱带(Crowley J K, et al., 2003)。通过这些吸收谱带建立矿物识别模型，可反演铁在含量百分比，为地质专家推断区域地质环境提供可靠的依据。

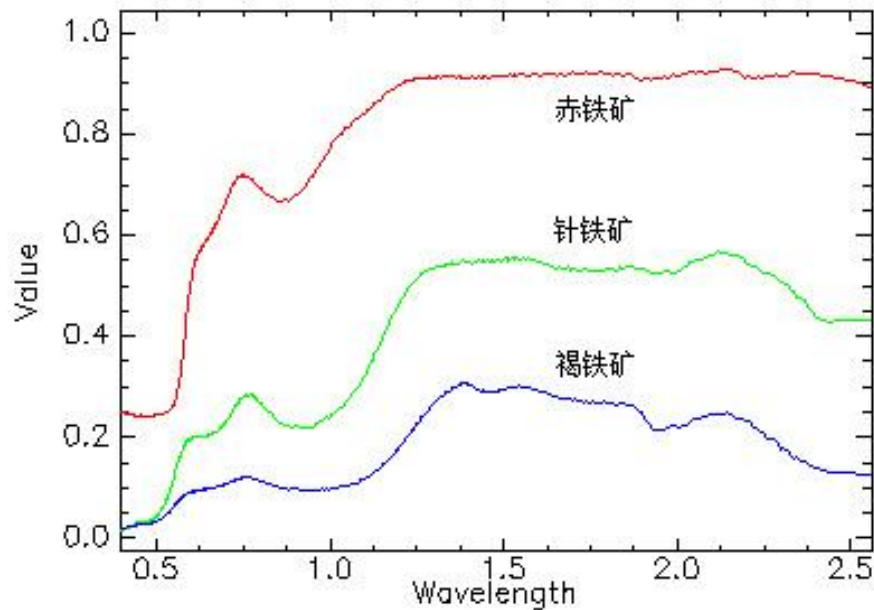


图 3-3 典型含铁离子矿物波谱特征

3.2 光谱匹配技术

在对岩心成像光谱数据的获取和研究中，得到了大量丰富的不同岩心、不同矿物的光谱数据。因而，可以根据矿物的光谱反射特征利用光谱匹配技术直接对岩心地物类别进行区分。匹配技术的实质是判断经过预处理后的光谱反射率曲线与标准光谱库中的矿物光谱的相似性进行地物分类，从而达到判别的目的。常用的光谱匹配技术主要是基于光谱曲线的整体相关性进行处理，下面介绍常用的光谱匹配方法。

3.2.1 最小距离匹配

如果两条光谱曲线仅仅只有很小的差异，则说明这两条光谱曲线类似。最小距离匹配采用距离度量两条光谱曲线的差异，并通过设定最大阈值判别二者是否

为同一类别。光谱匹配分类需选定每一类端元的标准向量即标准光谱曲线，通过计算未知类别的光谱曲线与各个标准光谱曲线之间的距离，将其划分到距离最小的一类。通常用“广义距离”来表示“距离”。其属性如下：

$$\begin{aligned} D(x, x) &= 0; & D(x, y) &\geq 0 \\ D(x, y) &= D(y, x); & D(x, y) &\leq D(x, z) + D(z, y) \end{aligned} \quad \text{公式 3-1}$$

其中，明氏距离可用如下式子表示：

$$D_{ij}(q) = \left[\sum_{k=1}^n |x_{ik} - x_{jk}|^q \right]^{1/2} \quad \text{公式 3-2}$$

当 $q=1$ 时上式为曼氏距离，当 $q=2$ 时，上式即为欧几里德距离。

其中马氏距离可用如下式子表示：

$$D_{ij}^2 = (x_i - x_j)^T \sum_{ij}^{-1} (x_i - x_j) \quad \text{公式 3-3}$$

其中 x_i ， x_j 为 n 维特征向量， \sum_{ij} 为协方差矩阵， \sum^{-1} 为该矩阵的逆矩阵。马氏距离考虑了各个标准光谱曲线的相关性，因而比明氏距离更为合理。当 $\sum=1$ ，即各特征间完全不相关时，马氏距离则为欧式距离。

未知目标矿物与标准矿物光谱库的最小距离匹配如下流程所示：

1. 从标准光谱库中选定一种矿物类型（一般以第一种开始）；
2. 对该矿物的标准光谱曲线做重采样，重采样到与待识别地物 x_i 的光谱分辨率相同。
3. 计算该矿物标准光谱曲线与未知目标光谱曲线的距离，以欧几里德距离为例：

$$d_i(x_k) = \left[\sum_{j=1}^n (x_{kj} - M_{ij})^2 \right]^{1/2} \quad \text{公式 3-4}$$

其中： i 为光谱库中地物类别数； n 为总波段数； M_{ij} 为光谱库中第 i 种矿物在 j 波段的反射率。

4. $d_m(x_k) = \{d_i(x_k)\}_{\min}$ ， $(i=1, 2, \dots, c)$ c 为光谱库中的地物类别数，且 $d_m(x_k)$ 小于设定的阈值（根据实际情况而定），则待识别的矿物 x_k 与光谱库中

的第 m 种矿物是同一种矿物。

5. 如果有 N 个待识别的矿物，则循环上述步骤，依次求出

$$d_m(x_k) = \{d_i(x_k)\}_{\min}, \text{ 其中 } k = 1, 2, \dots, N, \quad i = 1, 2, \dots, c。$$

3.2.2 光谱角度匹配

两光谱曲线之间的广义夹角余弦称为光谱角度 (spectral angle)。光谱角度匹配 (Spectral Angle Match, SAM) 即为用的较为广泛的广义角匹配模型。它通过计算未知类别光谱与已知类别光谱之间的光谱角度来判别未知类别与已知类别的相似性(Yuhas R H et al.,1992)。已知类别光谱的获取形式有其多样性。它可以是标准光谱库中的参考光谱，也可以是人工测定的光谱，亦或者是从图像上提取的光谱。光谱角度匹配的实质是在多维光谱空间中，不同类别的地物其光谱角度方向是不同的，而同类地物之间的光谱角度、方向相似。下面通过二维空间中的一个简单例子来说明参考光谱和测试光谱的光谱角度关系，如图 3-4 所示。

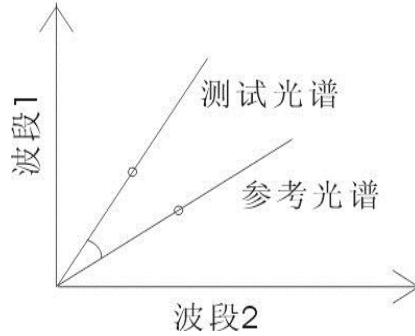


图 3-4 二维空间光谱角度示意图

对于两个 n 波段光谱向量 $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 和 $Y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$ ，其光谱角度表达如式子所示(Yuhas et al., 1992):

$$\theta_{SAM}(X, Y) = \arccos \frac{\sum_{i=1}^n x_i \times y_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^n y_i^2}}, \quad \theta \in \left[0, \frac{\pi}{2}\right] \quad \text{公式 3-5}$$

式中 n_b 代表光谱曲线的波段数目，光谱角越小，光谱间的相似度越大，完全匹配 θ 为 0。

两条光谱曲线之间光谱角度并不受增益因素（如光谱曲线整体上移）影响。

若只是研究两条光谱之间的匹配程度，SAM 流程分为以下三步：

1. 从光谱数据库中选定一种矿物类型，考虑到图像光谱分辨率相对与光谱数据库相对较低，因此将光谱数据库中的矿物重采样到与岩心高光谱数据相同的光谱分辨率。
2. 计算待分类矿物与参考矿物两者光谱曲线之间的角度 θ ，以评价待分类矿物与参考矿物光谱曲线的相似性。光谱角度的值域在 0 到 $\pi/2$ 之间，当 $\theta=0$ 时表示两条光谱曲线完全相同，而 $\theta=\pi/2$ 时则表示两条光谱曲线完全不相似，通过设定具体阈值判别二者的相似性。
3. 如果有 N 个待识别的矿物，则循环上述步骤，依次求出每条光谱与光谱库中每条标准矿物光谱曲线的 θ_i ，选择光谱角度最小的标准类别将未知矿物分类，如 $\theta_i = \{\theta_j\}_{\min}$ ，($j=1, 2, \dots, c; j \neq i$)，则 x 被判为第 i 类矿物。

光谱角度匹配常常应用于岩心矿物分类中。对于未知矿物，光谱角度匹配通过判别其光谱曲线与光谱库中的矿物光谱曲线的相似度，可以达到快速准确的匹配，实现岩心高光谱数据快速处理利用的效果。

3.2.3 光谱信息散度匹配

光谱信息散度匹配 (Spectral Information Divergence, SID) 是通过计算未知光谱和标准光谱之间的信息散度来确定二者之间的相关性。

光谱信息散度的计算公式如下：

$$SID(A, B) = D(A \| B) + D(B \| A) \quad \text{公式 3-6}$$

$$D(A \| B) = \sum_{i=1}^m p_i \log(p_i / q_i) \quad \text{公式 3-7}$$

$$D(B \| A) = \sum_{i=1}^m q_i \log(q_i / p_i) \quad \text{公式 3-8}$$

$$p_i = t_i / \sum_{i=1}^m t_i, \quad q_i = r_i / \sum_{i=1}^m r_i \quad \text{公式 3-9}$$

光谱信息散度取值范围在 $[0,1]$ 之间，信息散度越大，说明两者的光谱曲线差异越大，两者越不相似 (白继伟, 2002)。通过寻找光谱库中与待测光谱具有最小信息

散度的标准光谱，就能够判别改待测光谱所代表的矿物。

3.2.4 光谱匹配滤波

匹配滤波（Matched Filtering, MF）是信号处理领域的目标检测算法（Chen and Reed, 1987），光谱匹配滤波是在匹配滤波计算的过程中，有目的的加入了已知目标的光谱曲线作为参考光谱，去判别未知目标的光谱曲线过程（甘甫平等, 2005）。光谱匹配滤波可以用下式表示（Manolakis, et al. 2005; DiPietro, et al., 2010）:

$$y_{MF} = k(\boldsymbol{\mu}_t - \boldsymbol{\mu}_b) \sum_b^{-1} (\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu}_b) \quad \text{公式 3-10}$$

其中,

$$k = \frac{1}{(\boldsymbol{\mu}_t - \boldsymbol{\mu}_b)^T \sum_b^{-1} (\boldsymbol{\mu}_t - \boldsymbol{\mu}_b)} \square \frac{1}{\Delta^2} \quad \text{公式 3-11}$$

$\boldsymbol{\mu}_t$ 目标光谱向量, $\boldsymbol{\mu}_b$ 背景平均光谱向量, \mathbf{x} 未知目标光谱曲线。

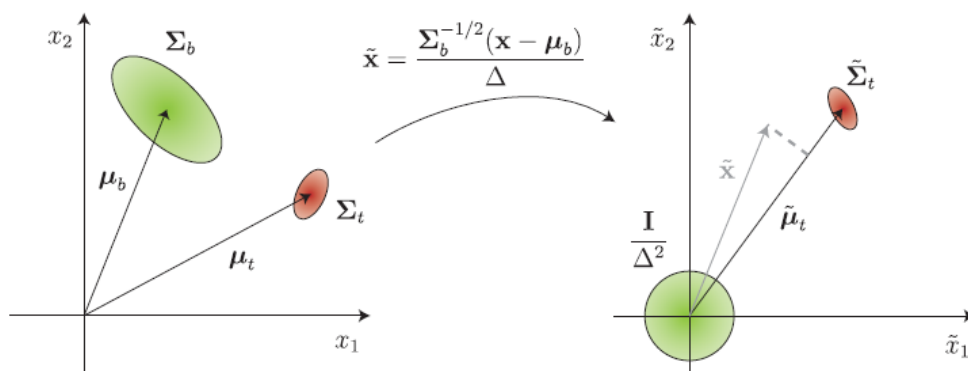


图 3-5 匹配滤波示意图（DiPietro, et al., 2010）

光谱匹配滤波它最大化已知端元波谱的响应信号，压制未知背景的响应信号，基于对特定波谱库或者影像端元波谱的匹配，提供了快速探测物质的手段。

3.2.5 光谱吸收指数

光谱吸收指数（Spectral Absorption Index, SAI）于 1996 年由王晋年等提出（王晋年, 郑兰芬. 1996）。SAI 指数衡量的是不同类别的地物其光谱曲线的特征，基本描述参量是波峰波谷的波长位置，吸收的深度、吸收的宽度以及其对称性。

采用一系列的参数将地物的光谱特征信息参量化，以此作为遥感解译的指标。

如图图 3-6 所示，一条光谱曲线的吸收特征可以由光谱吸收谷点 M 与两个肩部 $S1$ 和 $S2$ 参量化， $S1$ 与 $S2$ 的连线成为非吸收基线。“非吸收基线”与吸收谷点 M 之间的距离称为光谱吸收深度（ H ），吸收的对称性参数 d 可以表达为

$$d = (\lambda_m - \lambda_2) / (\lambda_1 - \lambda_2), \quad \text{公式 3-12}$$

吸收肩端反射率差值为

$$\Delta\rho_s = \rho_2 - \rho_1, \quad \text{公式 3-13}$$

则光谱吸收指数可表示为

$$SAI = \rho / \rho_m = \frac{d\rho_1 + (1-d)\rho_2}{\rho_m} \quad \text{公式 3-14}$$

其中， ρ_1, ρ_2, ρ_m 分别为左肩端 $S1$ 、右肩端 $S2$ 和吸收谷点 m 的反射率； $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_m$ 分别为左肩端 $S1$ 、右肩端 $S2$ 和吸收谷点 m 的波长位置； $\Delta\rho_s$ 为吸收波段宽度。

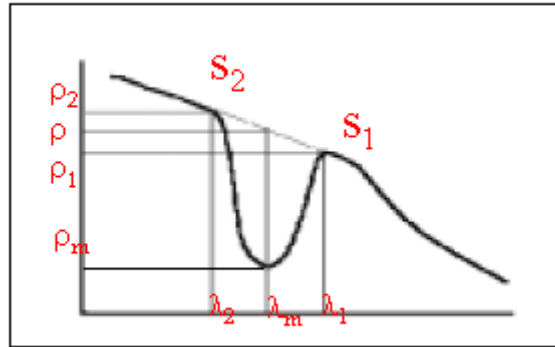


图 3-6 光谱吸收质素参量示意图

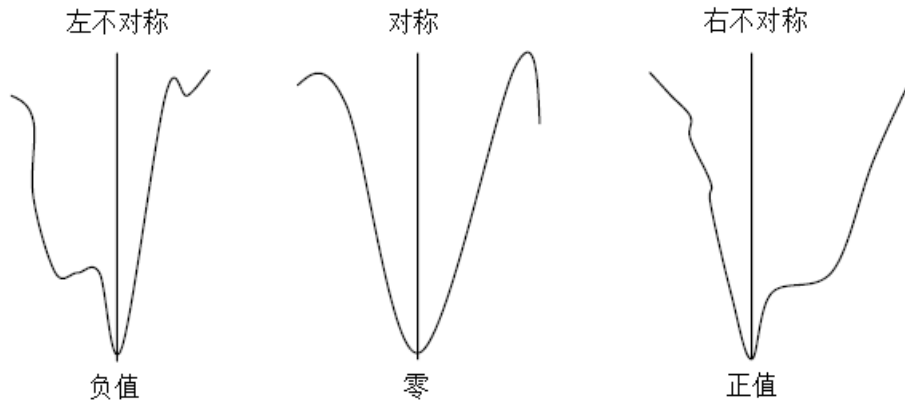


图 3-7 光谱吸收对称性分析

3.3 矿物光谱匹配实验

3.3.1 数据光谱质量分析

由于 HyCore 系统采用的是基于光谱的匹配技术，因此需要对测量系统的光谱测量能力进行分析。为了分析岩心光谱测量系统所得数据的光谱质量，本文选取了已知矿物类别、较为纯净的岩石进行分析。所选择的矿物类型有铬铁矿、蒙脱石、方解石、石膏、斜长石、闪透石。将岩心光谱测量系统所测得的几种矿物的光谱曲线与 USGS 光谱中相应矿物的光谱曲线进行比较分析，采用光谱角度和光谱信息散度量二者的相似性结果如表 3-1，如图 3-8、图 3-9、图 3-10 所示。

表 3-1 HyCore 数据与 USGS 光谱库的比较

矿物类别	光谱角度/mrad	光谱信息散度
铬铁矿	0.092	0.037
蒙脱石	0.061	0.043
方解石	0.057	0.059
石膏	0.181	0.048
斜长石	0.039	0.036
闪透石	0.067	0.030

从图中可以看出，这六种矿物的光谱吸收特征与 USGS 光谱库中该矿物的特征基本吻合，个别矿物的个别吸收特征有二者有微小差异，可能是由于所测的矿物并非完全一致而产生的结果。采用光谱角度和光谱吸收散度定量分析各类矿物 HyCore 岩心数据与 USGS 光谱库的差异，光谱角度和光谱信息散度值越接近 0，二者的一致性越高。从表 3-1 中可以看出，六类矿物的光谱角度除了石膏光谱角度测量结果偏高之外，其他光谱角度都小于 0.1mrad；六类矿物的光谱信息散度范围都在 0.03-0.06 之间，表现较强的匹配度。因此表明 HyCore 岩心数据矿物光谱特征与 USGS 光谱库中的相同矿物的光谱特征基本保持一致。

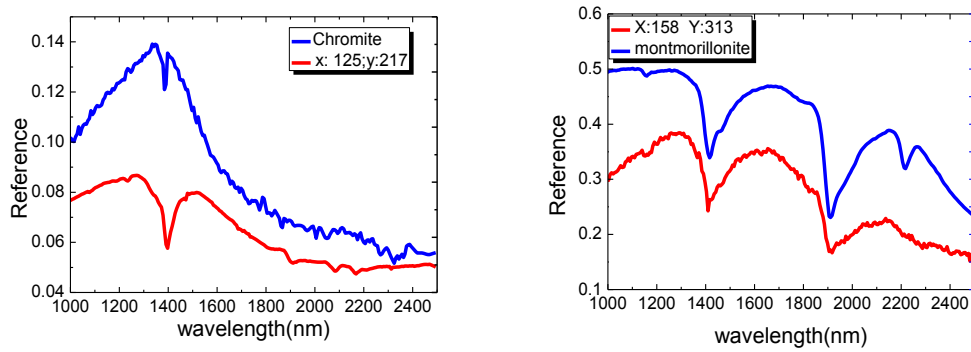


图 3-8 铬铁矿和蒙脱石

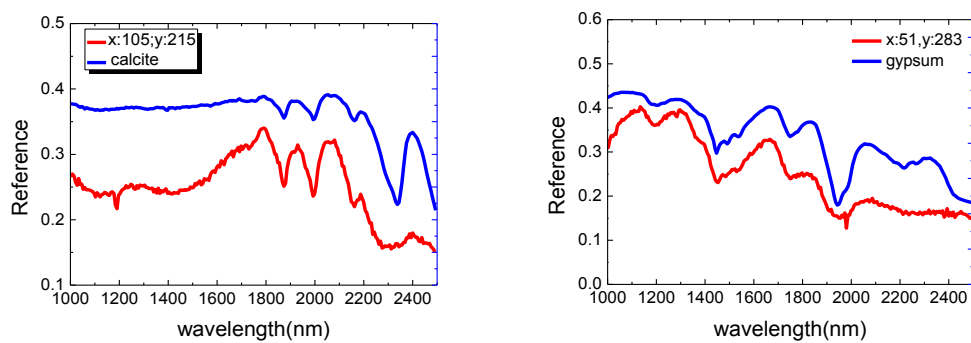


图 3-9 方解石和石膏

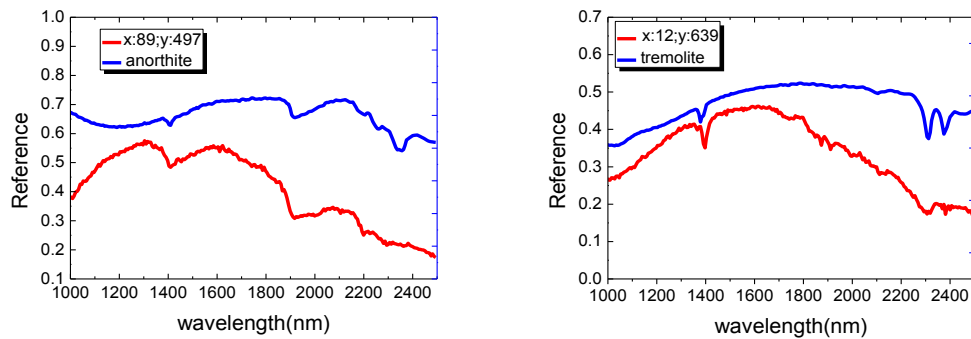


图 3-10 斜长石和闪透石

3.3.2 光谱匹配算法精度

由于 HyCore 光谱编录系统对岩心数据采用裁切拼接的办法去除背景的干扰，因此本文将各类已知矿物从背景中裁剪并拼接，验证最小距离、光谱角度、光谱信息散度和光谱匹配滤波的分类精度，可用混淆矩阵对融合前后的提取结果进行评估分析。混淆矩阵能够反映识别结果与真实属性之间的关系，常用于分类结果评价。

给定一个类别集合 $C = \{c_1, c_2, \dots, c_k\}$ ，它与另一个类别集合 $M = \{m_1, m_2, \dots, m_k\}$ 的混淆矩阵可以表示（张静，2003）：

$$CM = \begin{bmatrix} cm_{11} & \cdots & cm_{1j} & \cdots & cm_{1N} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ cm_{i1} & \cdots & cm_{ij} & \cdots & cm_{iN} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ cm_{N1} & \cdots & cm_{Nj} & \cdots & cm_{NN} \end{bmatrix} \quad \text{公式 3-15}$$

其中，对角线元素表示 C 集合中的像元被正确识别的百分率，理想情况下，混淆矩阵是一个对角阵。

针对混淆矩阵的基本统计估量包括（赵英时，2003）：

1) 总体分类精度：

$$P = \sum_{k=1}^n cm_{kk} / cm \quad \text{公式 3-16}$$

总体分类精度是针对每一个随机样本，所识别的结果与真实属性之间相一致的概率。

2) 用户精度（对于第 i 类）：

$$P_{u_i} = cm_{ii} / \sum_{j=1}^N cm_{ij} \quad \text{公式 3-17}$$

用户精度表示从识别结果中任取一个随机样本，其所具有的类型与地面实际类型相同的条件概率。

3) 制图精度（对于第 j 类）：

$$P_{A_j} = cm_{jj} / \sum_{i=1}^N cm_{ij} \quad \text{公式 3-18}$$

制图精度表示相对于真实属性中的任意一个随机样本，分类结果图上同一地点的分类结果与其相一致的条件概率。

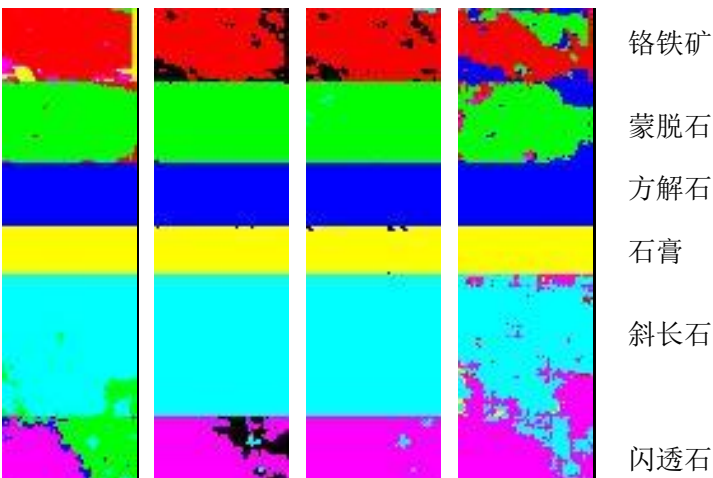


图 3-11 从左到右分别为最小距离、光谱角度、光谱信息散度、光谱匹配滤波

表 3-2 最小距离混淆矩阵

矿物类型	制图精度/%	用户精度/%
铬铁矿	87.63	94.81
蒙脱石	95.64	63.68
方解石	100.0	91.25
石膏	100.0	94.11
斜长石	93.70	98.76
闪透石	48.0	87.90
总体精度/%	86.96	Kappa 系数 0.84

表 3-3 光谱角度混淆矩阵

矿物类型	制图精度/%	用户精度/%
铬铁矿	84.38	100.0
蒙脱石	99.71	100.0
方解石	100.0	100.0
石膏	99.7	100.0
斜长石	100.0	99.36
闪透石	82.08	99.93
总体精度/%	94.66	Kappa 系数 0.93

表 3-4 光谱信息散度混淆矩阵

矿物类型	制图精度/%	用户精度/%
铬铁矿	87.36	100.0
蒙脱石	99.29	100.0
方解石	100.0	100.0
石膏	98.61	100.0
斜长石	100.0	98.15
闪透石	98.11	100.0
总体精度/%	97.59	Kappa 系数 0.97

表 3-5 光谱匹配滤波混淆矩阵

矿物类型	制图精度/%	用户精度/%
铬铁矿	56.25	89.08
蒙脱石	79.25	80.43
方解石	100.0	70.59
石膏	100.0	97.01
斜长石	77.56	88.00
闪透石	81.49	67.91
总体精度/%	80.54	Kappa 系数 0.76

从图 3-11 的分类结果图来看,光谱角度匹配和光谱信息散度匹配对铬铁矿、蒙脱石、方解石、石膏、斜长石和闪透石这六种矿物取得了较好的分类效果,而最小距离匹配存在较大的错分现象。

为了进一步定量分析四种匹配算法的分类结果,本文采用混淆矩阵的方法对这三种分类方法进行分类精度的定量比较。从表 3-2、表 3-3、表 3-4 和表 3-5 中可以看出,最小距离分类的总精度为 86.96%, Kappa 系数为 0.84; 光谱角度分类的总精度为 94.66%, Kappa 系数为 0.93; 光谱信息散度分类的总精度为 97.59%, Kappa 系数为 0.97; 光谱匹配滤波分类精度的总精度为 80.54%, Kappa 系数为 0.76。

因此为了准确的识别岩心矿物,光谱角度和光谱信息散度的匹配效果更佳。

3.4 本章小结

本章主要探讨了自然界中主要蚀变矿物的光谱特征，主要包括粘土矿物、碳酸盐矿物和铁染矿物；针对矿物的识别介绍了常用的光谱匹配技术，包括最小距离匹配、光谱角匹配、光谱信息散度匹配、光谱匹配滤波和光谱吸收指数；根据 HyCore 数据特点，定性定量分析了 HyCore 数据的光谱质量；比较最小距离匹配、光谱角度匹配、光谱信息散度匹配和光谱匹配滤波的分类精度。

第4章 HyCore 系统详细设计

4.1 HyCore 系统整体设计

4.1.1 系统需求与目标

1. 需求分析

需求分析是一个软件设计的基石，主要是通过对用户需求的调查，以用户的使用习惯为出发点，从实用性、经济性、稳定性等方面确定软件的主题功能和目标，因此是一个软件成功的关键因素之一。可以说对需求分析的把握程度决定了一个软件的推广程度和使用的年限。岩心成像光谱编录系统的用户主要为各个地矿局、矿山的岩心资料管理人员以及利用岩心进行地质分析的地质工作者，即普通用户。

针对岩心资料管理人员，第一需求侧重于改变传统岩心扫描系统效率低，不利于查找等缺陷，实现岩心高效扫描、快速编录，即其需要快速、稳定的岩心编录系统；其次需要有强大的查找、增加和删除等功能，实现高光谱编录系统软件高效管理岩心资料，达到高效完成日常岩心入库资料编辑和纠错的能力；同时其需要建立相应的岩心资料查找库，空间地理坐标可视化、钻孔资料图文并茂的方式展开岩心资料的查找，从而满足用户对岩心资料的需求，增进岩心资料的使用次数。

而对于地质工作者，其需要一个能够根据空间地理坐标、地质属性等内容实现快速高效查询、调阅的系统，同时其需求能够实现多种矿物识别方法，为其矿物研究提供基本支撑，再结合已有地质资料，如断层、岩性等，为其做出准确的地质判断提供可靠的依据。

2. 系统目标

根据需求的分析结果，在功能上岩心编录系统要求在岩心成像光谱测量系统获取岩心高光谱数据的基础上，实现岩心高光谱数据的快速入库、自动裁剪、编辑深度信息、矿物种类识别、匹配度、误差情况和矿物统计等功能。

高光谱岩心编录系统与一般管理系统的区别之一在于其管理的数据为岩心

高光谱数据，他不单单实现数据的管理（如深度位置描述、地质编号等）还包括岩心数据的分析（如矿物种类和矿物统计等）。其次高光谱扫描数据在提高岩心编录效率的同时需要克服数据量大的问题，因此，高光谱岩心编录系统的总体建设目标如下：

1. 系统性能稳定，无 BUG 出现；界面友好美观，操作简单，使用方便。
2. 充分发挥高光谱岩心成像系统的优势，实现岩心数据快速扫描；
3. 针对岩心高光谱数据，系统提供岩心数据的自动裁剪功能，并根据卡槽固有长度自动编辑岩心深度信息。
4. 系统提供高级的岩心矿物分析功能，例如：矿物种类识别、丰度统计分析等，为管理者提供岩心矿物成分和丰度信息，对进一步圈定找矿靶区提供决策依据。
5. 地质资料存储功能。系统提供岩心资料编辑功能，此功能可实现地质专家与高光谱矿物提取结果的对比分析。
6. 地质资料管理功能。系统将通过地理坐标实现岩心数据资料的查找、添加、更新、删除等操作功能，系统管理员可以方便地对数据库进行调用、更新，保持系统数据库的实用性。
7. 帮助功能。系统提供帮助文档方便用户快速掌握岩心编录系统的使用方法。

4.1.2 系统整体架构

系统体系结构的设计是编录系统设计的重要一步，高光谱岩心编录系统的需求决定了系统需具有扩展性，网络性能和跨平台性，因此必须选择一个合理的系统结构。目前较为常用的系统整体架构有 C/S 即 Client/Sever 模式和 B/S 即 Brower/Sever 模式。其中 C/S 结构为客户机和服务器结构，大多数应用软件都采用此结构。它通过连接两端硬件的优势，将任务合理非配到客户机和服务器来实现，降低系统的通讯开销。B/S 结构为浏览器和服务器结构，是随着互联网技术的发展而对 C/S 结构的改进。这种结构具有三层结构：用户工作界面主要通过网络浏览器来实现；主要实物逻辑在服务器端（Sever）实现，极少部分事物逻辑在前端（Brower）实现。本文高光谱岩心编录系统只针对桌面版，因此采用 C/S 结

构系统，主要包括用户表示层，中间层和数据层，如图 4-1 所示。

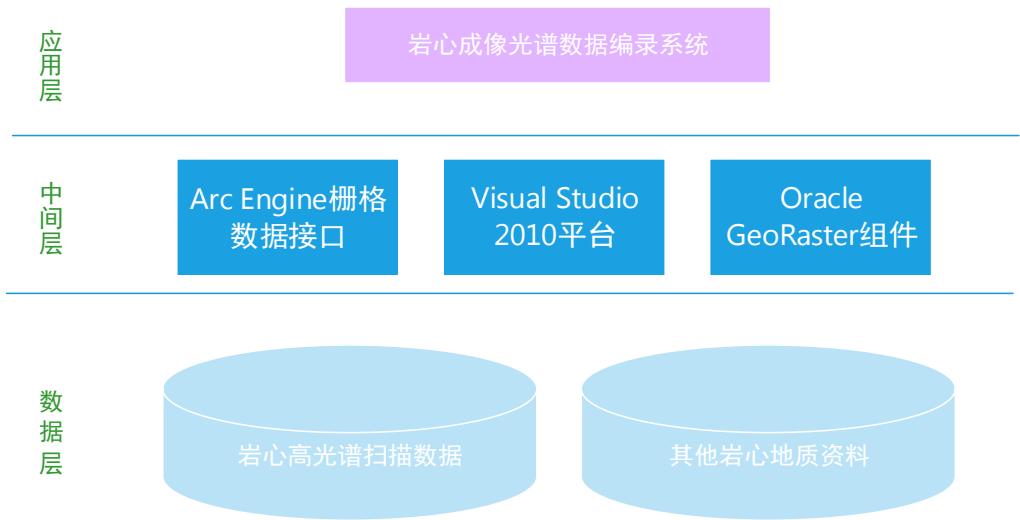


图 4-1 岩心成像光谱编录系统架构图

应用层位于最上层，是链接用户与中间层的桥梁，用于接收用户输入的数据并转化为相应语言提交与中间层和显示数据，为用户提供一种交互式的操作界面。本研究中应用层主要表现为岩心成像光谱数据编录系统，实现用户需求的输入以及输出显示结果，基本功能包括数据输入输出、可视化、检索查询、用户管理和系统管理等功能。

中间层主要负责对数据的操作，包括 Visual Studio 平台接口、Arc Engine 栅格数据接口和 Oracle GeoRster 组件接口，这些接口实现了所有数据操作，在整个系统中发挥了极其重要的作用。

数据层为中间层和应用层提供数据服务。主要包括岩心高光谱数据和其他岩心地质资料数据。高光谱数据的特点决定了系统数据访问和检索方式需要慎重审视，不仅需要考虑海量数据的存储问题，还需要考虑高光谱数据的读取效率，更要考虑将来数据的扩展和分布方式。因此为了方便数据库的移植，我们需要对数据存储结构进行细致的设计，通过降低系统开销，提高处理下来，便于系统的维护和功能扩展。对应岩心成像光谱编录系统具有非常大的意义。

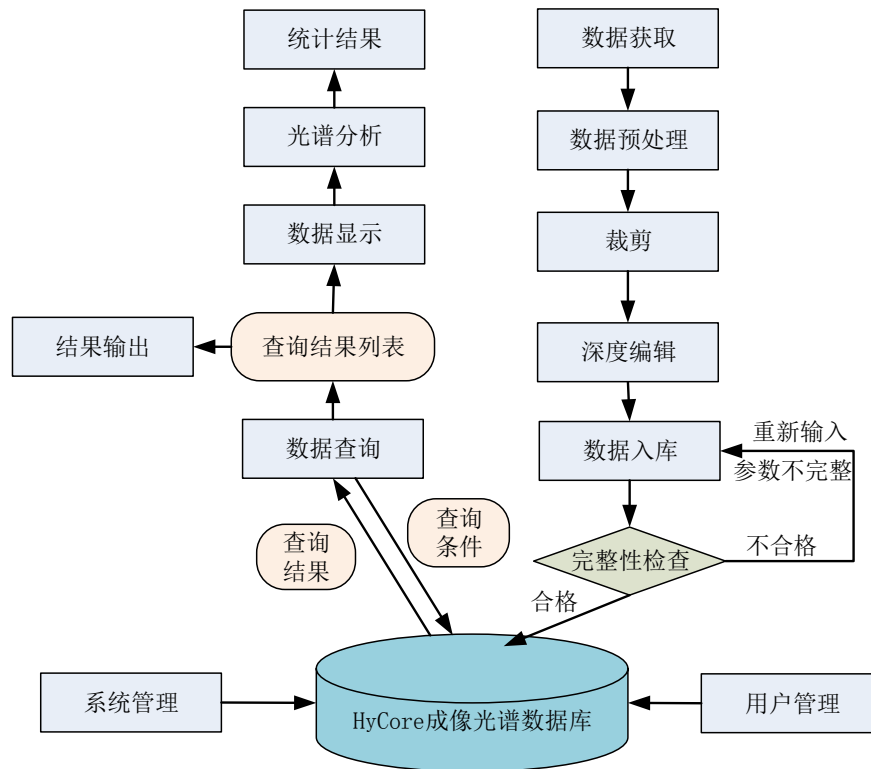


图 4-2 HyCore 岩心成像光谱数据库业务流程图

4.1.3 数据库存储结构设计

数据存储功能主要实现岩心成像光谱数据入库的功能，这些数据包含了海量的岩心矿物信息，数据在入库存储之前，需要将数据格式转换成 GeoRaster 支持的栅格数据类型，可以将数据以 BIP 格式存储为 TIFF 或 GeoTiff 类型数据；然后为每个影像建立唯一的主码，根据岩心成像光谱数据自身的特点以及相互之间的管理，设置好表的字段、通过初始化、导入等步骤，将影像导入数据库中。

根据岩心数据的地理空间位置可以将岩心成像光谱数据分为三个阶层，如图 4-3 所示。

高光谱岩心成像光谱数据通过岩心代码、起始深度、终止深度、岩心长度、岩性描述信息等内容定义，其中岩心代码是唯一的标识码，每一个岩心的标识码都必须不同；钻孔通过钻孔代码、钻孔名称、经纬度、钻孔描述信息等内容定义，其中每一个钻孔都有唯一的钻孔代码为标识码，每个钻孔包含多个岩心数据；区域通过区域代码、名称以及描述信息定义，每个区域有唯一的区域代码，每个区域下有一个或者多个钻孔。



图 4-3 岩心成像光谱数据存储模型

为了提高工作效率，对数据结构进行优化设计，需分配好相应数据空间，避免操作过程中产生反复读取，将岩心、钻孔、区域进行有效的数据表设计。如表 4-1、表 4-2、表 4-3 表 4-4 所示。

1. 岩心栅格数据表（rock-grid），用于存储岩心栅格数据块。

表 4-1 岩心栅格数据表

字段名	数据类型	说明
Grid_ID	number	影像唯一主码
pyramidLevel	number	金字塔级别
bandNumber	number	波段号
RowNumber	number	行号
columnNumber	number	列号
GridBlock	BLOB	存储实际数据

2. 岩心表（rock）用于存储描述岩心的基本信息。

表 4-2 岩心表

字段名	数据类型	说明
rockID	number	岩心唯一主码
startDeep	number	起始深度
endDeep	number	终止深度
Rocklength	number	长度

RockObject	SDO_GEORASTER	存储岩心的 Georaster 对象
rockDiscription	Varchar2(256)	岩心描述
CoreID	Number	钻孔编码

3. 钻孔表（core）用于描述钻孔的基本信息

表 4-3 钻孔表

字段名	数据类型	说明
coreID	number	钻孔唯一主码
coreName	Varchar2(32)	钻孔名称
longitude	number	经度
latitude	number	纬度
coreDiscription	Varchar2(256)	岩心描述
districtID	Number	区域编码

4. 区域表（district）用于描述岩心所处的省份信息等。

表 4-4 区域表

字段名	数据类型	说明
districtID	number	区域唯一主码
districtName	Varchar2(32)	区域名称
districtDiscription	Varchar2(256)	区域描述

4.1.4 系统功能模块设计

HyCore 岩心成像光谱数据编录系统编录功能模块是系统的核心内容，功能模块的完整、全模块的完整、全面是一个编录系统实现岩心成像光谱数据快速编录的基石。HyCore 岩心成像光
HyCore 岩心成像光谱数据编录系统的基本功能模块包括：岩心数据管理、数据预处理、可视
预处理、可视化、光谱分析、用户管理和系统管理。如

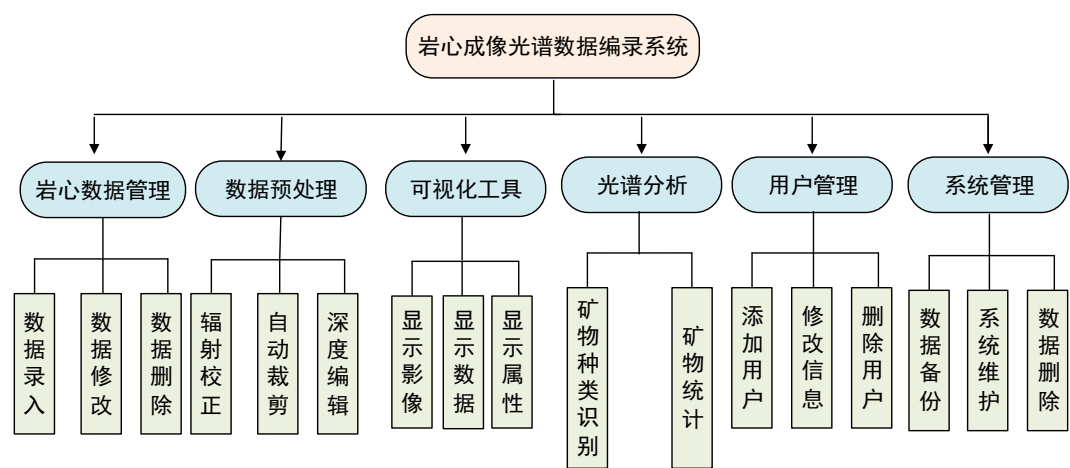


图 4-4 所示。

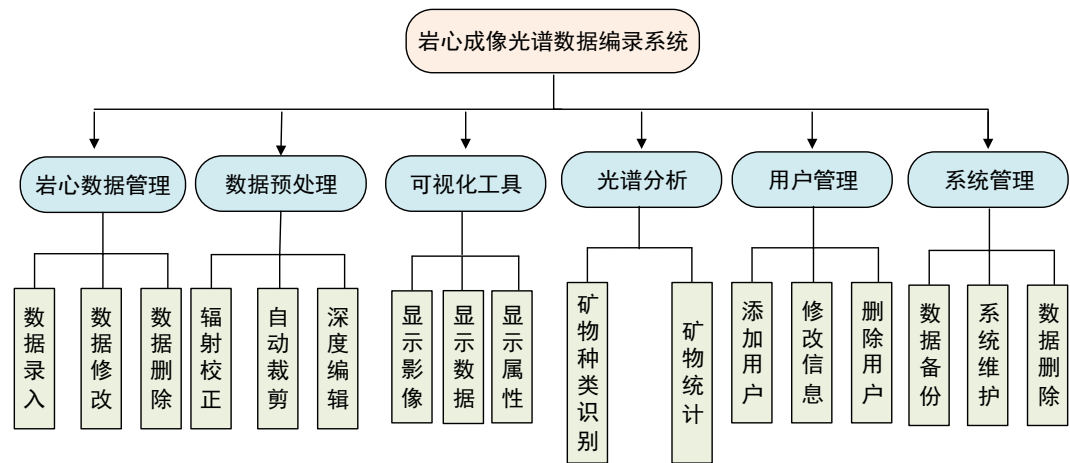


图 4-4 系统功能模块设计

1. 岩心数据管理

岩心数据管理功能主要是针对系统数据库中的数据进行录入、删除和修改，完成数据的更新操作。岩心成像光谱数据编录系统中主要数据来源于岩心高光谱数据和岩心地质资料。岩心数据管理是岩心成像光谱数据编录系统中不可或缺的功能，是更新数据库的一个重要工具，岩心数据只有管理起来才能实现地质解译和后期调用。

2. 数据预处理

数据预处理模块主要包括辐射校正、自动裁剪和深度编辑。原始采集的岩心数据为 DN 值，经过辐射校正成为反射率数据，为后期光谱分析做准备；由于一幅 HyCore 高光谱岩心数据包含多个岩心槽，而岩心数据是包含深度信息，因此需将每段岩心进行裁剪，为了方便快捷的实现大量数据的裁剪，采用自动裁剪；

深度编辑信息为真实反映地底情况所必须的一个步骤。

3. 可视化工具

可视化工具包含显示影像、数据和属性。设置默认彩色合成波段，实现岩心高光谱数据自动显示；采用表格形式显示数据波段数据，像元数据等；采用表格形式显示岩心属性数据以及地质描述。

4. 光谱分析

光谱分析功能是岩心成像光谱数据编录系统的主要功能之一，针对岩心矿物种类识别、光谱匹配程度以及矿物统计等内容，实现岩心资料的快速处理，为地质专家判别提供依据。

5. 用户管理和系统管理

用户管理主要实现用户信息的新建、添加和删除等操作。系统管理主要通过设置权限实现对数据库的维护和数据的安全管理，保证数据的正确性。

4.1.5 系统界面设计原则

人机界面（interface）也就是人和机器的互动过程（Human Machine Interaction），通过键盘、鼠标和显示器，实现人机对话功能，这一部分程序模块实现了试验人员和整个平台系统之间的信息交流。HyCore 岩心编录系统界面的设计一般遵循简易性、界面一致性、规范性、美观与协调性的原则，一下为各原则的具体内容：

1. 简易性（simplicity）

HyCore 的界面布局应该清晰简单，包括逻辑清晰、图标清晰、结构简单等，便于用户了解和使用各个功能和快捷键，防止用户混淆各个功能，造成混乱。同时，充分利用空间，合理安排控件位置，建立有序的界面风格，营造舒适简易的界面环境，在视觉效果上便于用户理解和使用。

2. 一致性(consistency)

每个优秀界面都具备界面一致性的特点。为了给用户统一而不混乱的感觉，清晰一致是界面的基本要求。HyCore 编录系统应充分考虑用户的使用习惯，采用一致的设计风格。如在不同窗口之间采用相似的按键布局风格、相同的颜色表示相同的功能、相似的提示窗口和措辞风格，从每个微小的细节出发真正实现的

界面设计的一致性。

3. 规范性 (standardization)

界面设计规范性是指导界面需要统一的标准格式，是 HyCore 界面设计的一个重要原则。如 HyCore 必须拥有菜单栏、工具栏、钻孔显示栏、钻孔显示窗口、参数设置窗口等。在不同的窗口中，相同的功能需放置在同一地方。界面规范化的程度越高界面的越简单易懂。将功能相似的按键放在一起便于操作也能够减少界面的错误操作，按键的位置必须不影响窗口整体的布局。

4. 美观与协调性(aethetics and harmony)

界面应该大小适合美学观点，使用户感觉协调舒适：窗口大小比例因适宜，以黄金比例为最佳；字体大小应与界面的大小比例适宜合理利用颜色，针对软件类型以及用户工作环境选择恰当色调。原则上尽量少的使用类别不同的颜色，如果使用其他颜色，主色要柔和，具有亲和力与磁力。对于 HyCore 编录系统界面设计要求如下：

- 1) 功能模块位置相对固定，符合美学分布。窗口界面可独立可衔接，窗口之间转换编辑方便，每个窗口的大小可以根据需求而调节，也可以突出显示为一个独立的窗口。
- 2) 岩心高光谱数据能够实现数据的自动裁剪，也可以手动选择裁剪范围；
- 3) 能够通过软件界面实现钻孔深度信息的编辑；
- 4) 光谱柱状图、光谱曲线和矿物匹配类别、矿物匹配程度、误差和矿物统计等内容自动生成及打印；
- 5) 界面自动调用数学公式,自动分析处理试验数据，同时可以选择手动操作。

4.2 编录系统界面设计

界面概念设计用于确定系统的架构、功能模块，描述系统做什么、如何工作。并描述设计界面的布局、结构、菜单等。对于岩心成像光谱数据编录系统来说，在保证实现岩心成像光谱数据的编录、可视化和信息提取等功能上的问题时，也需要注意编录系统的界面设计，做到功能实用无 Bug，界面简单易操作，这就需要我们对岩心编录系统的功能、界面安排做出详细的设计。因此本章重在解决岩心成像高光谱数据库的数据编录、影响的和光谱曲线的显示以及信息提取技术，并安排好这些功能的布局，设计出界面美观大方，功能齐全的编录系统原型。根据用户需求，将编录系统模块划分成以下 6 个部分，如图 4-5、图 4-6 所示。

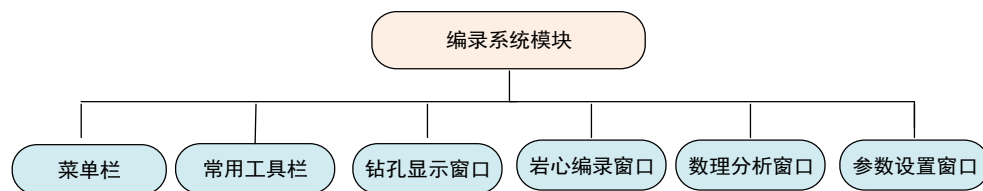


图 4-5 编录系统整体页面布局

1. 菜单栏：每个菜单下有下拉菜单，功能包括文件、工具、岩心信息提取、编录和帮助文档等功能。
2. 常用工具栏：包括视图控制的功能主要有放大、缩小、旋转等操作和编辑工具条。
3. 钻孔显示窗口：可以浏览和编辑同一地理位置的不同钻孔信息。
4. 岩心编录主窗口：根据岩心深度实现岩心高光谱数据的输入、显示。同时根据不同算法实现矿物丰度图、每一段岩心的基本描述也显示在此区域内。
5. 数理分析窗口：通过数理分析窗口达到对岩心高光谱数据的处理。
6. 参数设置窗口：控制每一个小窗口的参数设置。

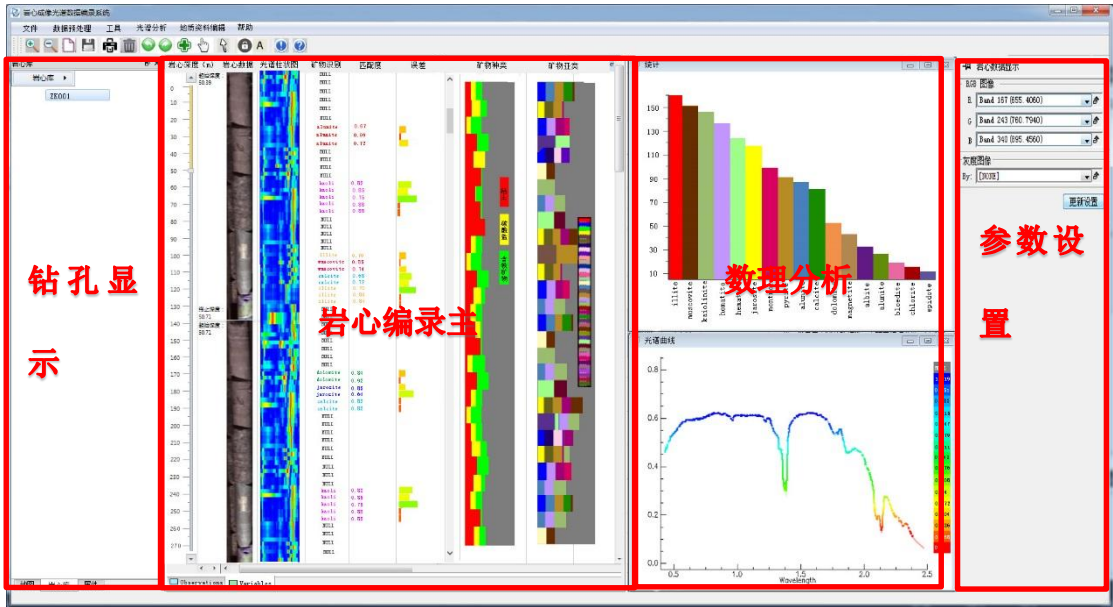


图 4-6 岩心成像光谱编录系统主界面

4.2.1 菜单栏

菜单栏是按照程序功能组分排列的按钮集合，在标题栏下的水平栏，其将系统可以执行的命令以阶层的方式显示出来，几乎包含程序功能的所有命令并依据重要程度排列，从左到右的重要程度降低。一般根据以往的操作习惯而进行分类，设定不同的下拉菜单，最左边是各种设置操作，最右边是帮助，并使用左键进行操作。

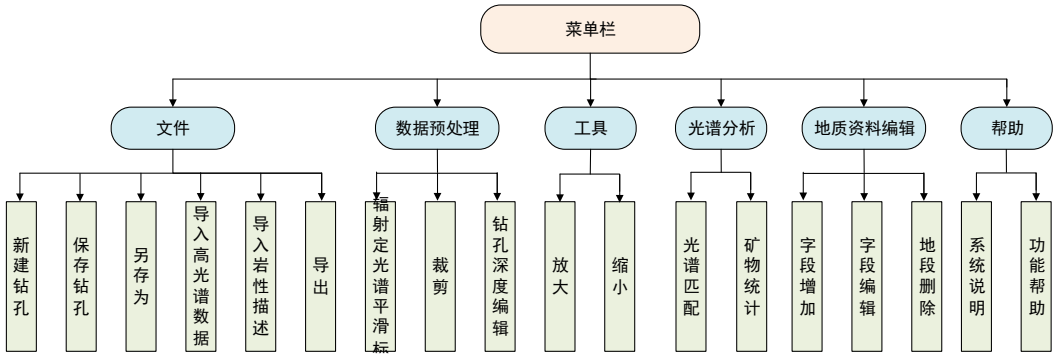


图 4-7 菜单栏及其下拉菜单

4.2.2 常用工具栏

为了方便使用以提高效率，系统一般在操作界面的相应位置上设立各种工具

图标。常用工具栏一般置于菜单栏之下，通常包含系统常用的基本编辑工具。如放大、缩小、新建、保存、打印、删除、恢复、撤销、添加、手指、箭头、锁定、文字编辑、询问、帮助。使用左键单击即可快速打开功能模块或者实现某种属性。



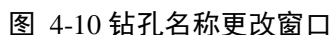
图 4-8 常用工具栏

4.2.3 钻孔显示窗口

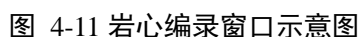
钻孔显示窗口是针对岩心库中的岩心进行显示，一个岩心库中包含多个钻孔资料，头盖骨钻孔显示窗口可以轻松进行钻孔转换，实现不同钻孔数据的同时浏览、编辑、对比等。在钻孔显示界面可以进行钻孔名称更改、增加数据、存储钻孔、复制钻孔、删除钻孔、合并钻孔等操作，钻孔显示窗口可以根据需求进行显示界面大小调整。



图 4-9 钻孔显示窗口右键功能



岩心编录窗口是岩心成像光谱数据编录系统的核心部分，系统的各个功能都是围绕岩心高光数据的编录显示。在这个窗口内从左到右包括岩心深度标尺、岩心数据、光谱柱状图、矿物识别、匹配度、误差、矿物种类、矿物大类和岩性描述。



岩心高光谱数据具有深度属性, 因此岩心深度标尺是不可或缺的部分。由于钻孔深度从几十米到几百米不等, 而岩心高光谱数据每个像元的分辨率为厘

米级，裁剪的一条岩心数据位 1m，因此在深度信息数据下具有极为不对称的现象。据此，将编录系统的岩心深度标尺设计为两列，左边为整体显示钻孔的深度信息，而右边显示岩心高光谱数据的采集深度。

整体深度标尺，在起始深度上有一个▲按钮，点击后能够使深度标尺像上移动，在底部有一个▼按钮，点击后能够使深度标尺像下移动。

局部深度标尺显示钻孔经过裁剪的岩心高光谱图像，因此在“岩心深度”和岩心数据的之间建立新的深度信息，标注岩心高光谱数据的起始深度和终止深度。

2. 岩心数据显示

岩心高光谱数据具有海量的波段信息，而窗口只能由 3 个波段显示而成。为了编录系统快速高效的完成编录工作，因此岩心数据的显示采用预设波段自动显示，根据数据特点选择默认设置，如真彩色波段显示(0.65um, 0.76um, 0.89um)，或者近红外 RGB(2.1um, 2.2um, 2.34um)。如若不包含这些波段信息，择自动选择第 10 的波段，中间波段和倒数第 10 的波段分别赋予 RGB。



图 4-12 岩心数据显示参数设置

3. 光谱柱状图

岩心高光谱数据每行有 30 多个像元，而每个像元的空间分辨率高达 1 厘米，那么 200 米长的岩心具有个 60 万多个像元，将每个像元进行光谱分析，耗时太大。考虑岩心编录系统的高效原则，采用固定间隔抽取图像像元，并以光谱柱状

图的方式显示数据，作为岩心光谱分析的数据。

在光谱柱状图显示方面，根据反射率采用默认色标自动显示，色标通常选用彩虹色标，为了突出吸收谷特征，将反射率从低到高（0-1）设置为红到蓝。点击光谱柱状图上的光谱曲线，可以在数理分析窗口显示光谱曲线的细节信息，方便地质专家做出判别。



图 4-13 光谱柱状图参数设置

4. 矿物识别

矿物识别是针对光谱柱状图中显示的光谱曲线与光谱库中的标准矿物进行匹配，将匹配的结果显示于此窗口中。通常不同的矿物采用不同的颜色显示，无法与光谱库中的光谱匹配，则显示为 NULL。将光谱匹配算法默认设置为基于整条光谱的光谱角匹配算法（SAM），实现矿物的快速匹配。同时在参数设置窗口内实现光谱匹配算法的更改，阈值的设定等内容。

5. 匹配度

匹配度为显示光谱匹配的效果，为判别匹配效果的参数。颜色设置为与矿物种类的颜色相同。

6. 误差

误差为矿物识别的显示光谱匹配效果的另一个评价指标，为了显示效果好，将误差从低到高采用从红到蓝的彩虹色标显示。

7. 矿物种类

矿物种类统计根据传统的矿物分类方法将其分为粘土矿物、碳酸盐矿物和含铁矿物三大类，分别用红、绿、蓝三种颜色表示。根据此三类矿物的统计，粗略判别各段岩心的基本地质情况。

8. 矿物亚类

矿物亚类统计针对每种矿物进行统计分析，确定每 10 米岩心所含有的矿物种类以及每种矿物所具有的光谱数目。每种矿物采用不同的颜色表示，颜色类别应与矿物识别中的矿物颜色一致。

9. 岩性描述

根据地质专家解译的岩心地质资料，将资料编辑到岩性描述内，也可以通过 EXCEL 导入此编录系统，也能在软件中也能实现新建字段、添加内容和删除字段等操作。

4.2.5 数理窗口

数理窗口实现岩心矿物的一些基本功能，以方便简洁和色彩丰富的界面实现。包括岩心整体的矿物类别统计，以及光谱曲线的显示。

其中岩心整体矿物类别统计，是针对几百米的岩心钻孔高光谱数据光谱识别后的整体统计，它反映的是岩心总体含有的矿物种类以及光谱个数，按照从左往右由高到底的顺序排列识别出的各类矿物像元数。横坐标代表矿物类别，纵坐标代表像元数。

光谱曲线横坐标代表波长，一般为 0.4-2.5 μm ，纵坐标为光谱反射率，范围值在 0-1 之间，光谱曲线采用彩虹色显示，反射率从低到高分别赋予从红到绿再到蓝的方式赋予颜色，目的是为了突出矿物的吸收特征，有利于目视判别。

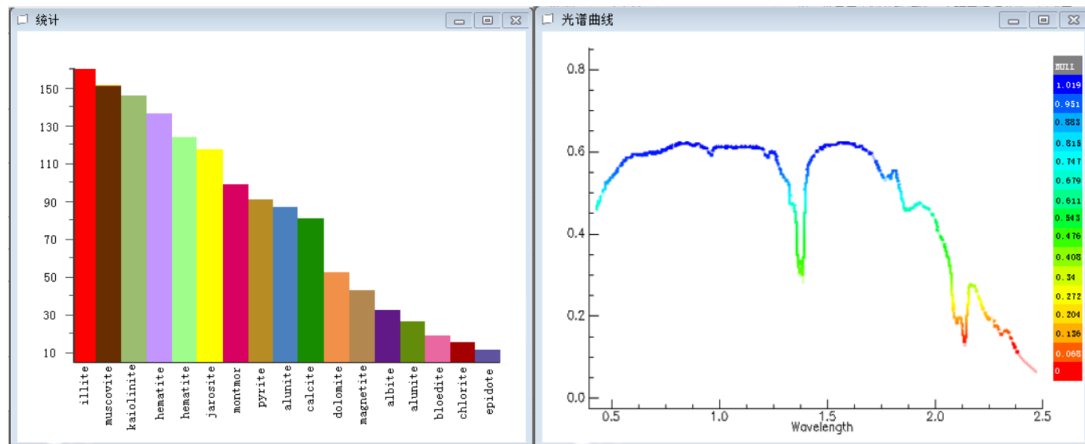


图 4-14 数理分析窗口（统计图和光谱显示图）

4.2.6 参数设置窗口


参数设置窗口根据是预留于窗口中的位置，每个功能模块的参数设置都在此处完成。当鼠标点击激活哪个窗口，参数设置窗口就同步显示该功能模块的默认参数设置，同时提供更改参数的可能。

4.3 编录系统设计

4.3.1 编录功能设计

1. 导入高光谱数据

高光谱数据的导入是岩心成像光谱编录系统最基本的功能，其具体实现步骤如下：

- 点击菜单栏-文件-新建钻孔，或者点击工具栏中的新建按钮，可快速实现新建，使原本为灰色界面的变为白色，可编辑的状态。
- 点击菜单栏-文件-保存钻孔，或者点击工具栏中的保存按钮，可实现钻孔的保存功能。
- 用户单击菜单栏“文件”-导入高光谱数据；或者点击文件输入按钮 ；或者右击“ZK601”-导入高光谱数据
- 弹出选择文件的对话框选择岩心高光谱数据文件。

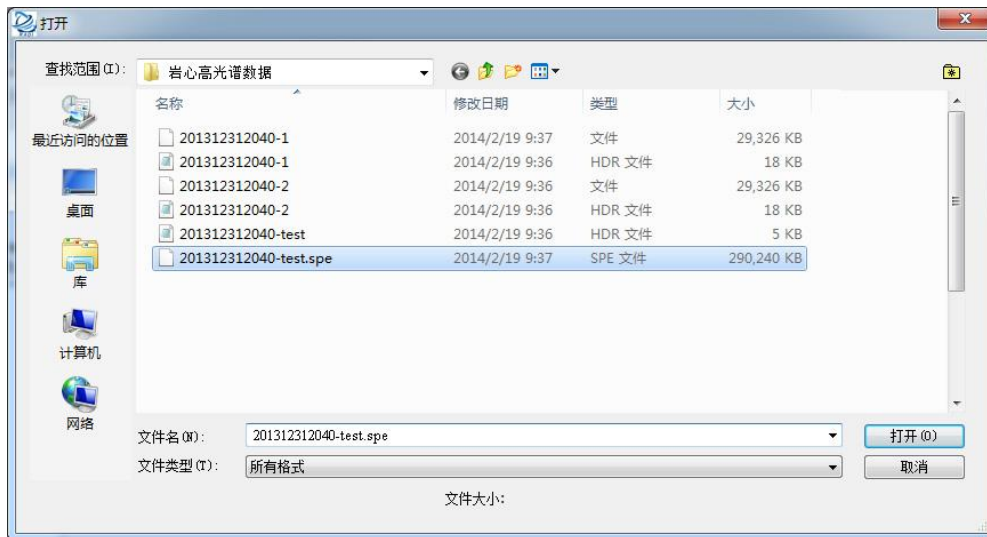


图 4-15 光谱数据导入界面

2. 数据自动预处理

岩心组分成像光谱测量系统获得岩心的像元亮度值，即 DN 值，因此需对岩心高光谱数据进行预处理。在对测量系统的进行光谱定标、辐射定标之后，系统需实现噪声去除、反射率转换和光谱重采样。

针对岩心高光谱数据的噪声去除，可采用三维均值滤波、三维中值滤波、MNF 变换和 PCA 变换。

针对反射率转换，采用如下公式：

$$R_{\lambda} = \frac{DN_{\lambda}}{W_{\lambda}} \cdot P_{\lambda} \quad (5-1)$$

其中 R_{λ} 表示被测目标反射率， DN_{λ} 表示被测目标 DN 值， P_{λ} 为参考板反射率。

此种方法要通过控制曝光将被测物体的 DN 值尽量落于 CCD 响应较好的量化范围内，并且使用的参考板反射率与被测物体接近。

为了快速高效完成岩心数据编录，当导入高光谱数据之后，默认设定采用三维均值滤波以及采用传统非成像光谱辐射计的转换方法对岩心高光谱数据进行处理，同时系统也提供其他预处理方法，可手动选择。如图 4-16 所示：

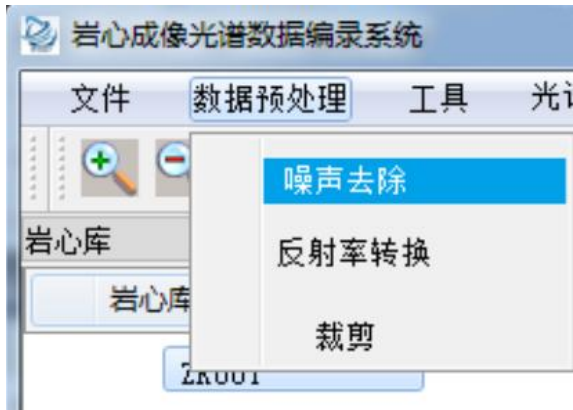


图 4-16 数据预处理菜单栏



图 4-17 数据预处理参数设置

3. 自动裁剪

将导入的高光谱岩心数据实现自动裁剪，图 4-18 所示。

默认自动裁剪采用默认参数设置，同时可以手动选择裁剪参数，裁剪块数由此幅图像岩心列数决定，“单块列数”指每条岩心所包含的列数；“间隔列数”指两条相邻的岩心之间间隔所包含的列数；“总裁剪列数”指图 4-18 所示中左边红色线条到最右边红色线条所包含的列数；“总裁剪行数”指裁剪中包含的行数以及起始

和终止行数。从左到右依次编号为 1,2,3,4,5,6,7,8。

4. 深度编辑

该模块实现的功能是真实反映岩心的深度信息，是岩心成像光谱编录系统中的基本功能之一，如图 4-19 所示。深度编辑首先根据岩心成像光谱数据的空间分辨率和行列数，确定每小段岩心的长度；然后默认设置起始深度为 0 米，实现岩心深度的默认设置；然而并不是所有的钻孔都是从 0 米开始编录，钻孔也并非完全连续，中间可能存在岩心破裂，并未保存的情况，因此为了实现岩心深度人工编辑，在深度编辑窗口上右键，点击编辑能够实现每小段岩心起止深度的更改。

5. 岩心自动解译

该模块主要干是实现岩心资料的岩心像元的光谱匹配以实现矿物识别。首先以岩心高光谱抽样数据，即光谱柱状图中显示的光谱曲线为对象，采用光谱匹配技术将其与标准光谱库中的光谱进行匹配，用于完成对岩心矿物的识别、矿物种类统计和矿物亚类统计等操作。其中光谱匹配技术有光谱角度匹配、光谱吸收指数、最小距离匹配等方法。通过预先设定的阈值来显示匹配的效果。为了实现高效提取，将光谱角度匹配方法设定为默认方法，而其他方法的选择可以在菜单栏光谱分析的下拉窗口中选择，也可以通过参数设置窗口设置，如图 4-20 所示。

6. 地质资料编辑

该模块主要实现岩心地质资料的导入和添加新的字段信息，如图 4-21 示。首先岩心地质专家根据每段岩心的进行解译获得岩心地质资料，根据起始深度、终止深度、岩石名称和岩心描述四个字段进行地质资料编辑。同时可事先在 EXCEL 中编辑好，通过导入 EXCEL 文档直接将岩心地质资料导入编录系统中。

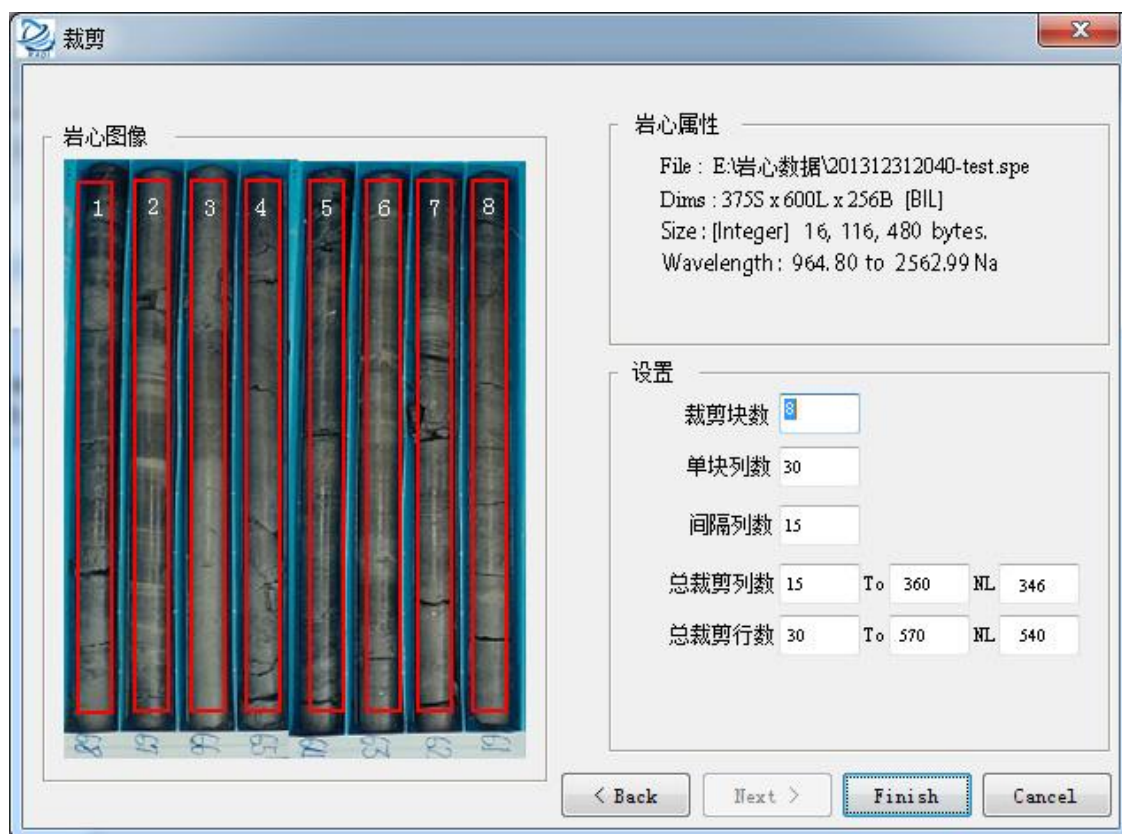


图 4-18 裁剪窗口

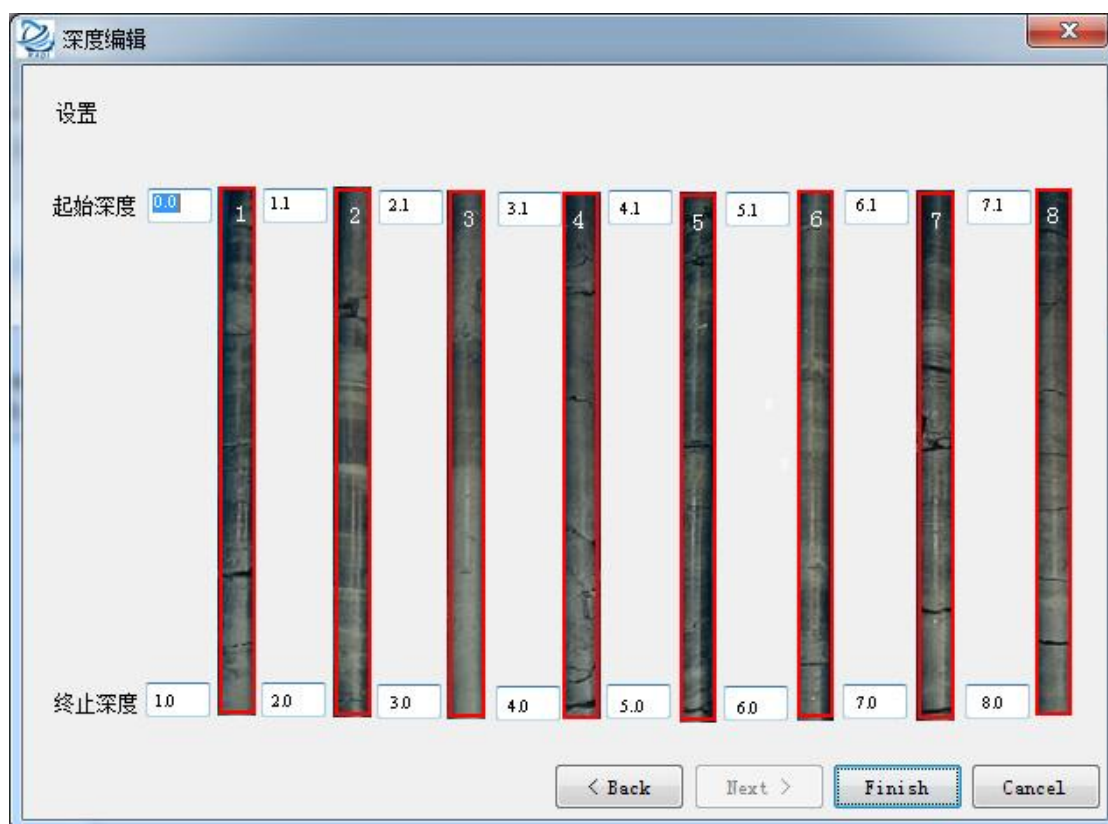


图 4-19 深度编辑窗口



图 4-20 光谱匹配技术参数设置

起始深度	终止深度	岩石名称	岩性描述
20.87	24.22	变质硅质岩	灰、灰白色，致密坚硬，主要矿物为石英，次为绢云母等，顶部裂隙发育。
24.22	25.47	条纹状重晶石矿	灰白色，条纹状构造，主要矿物为重晶石，顶底质量较中部差。
25.47	28.19	千枚岩	深灰色，千枚理发育，水平层理发育，主要矿物为绢云母，少量重晶石。
28.19	36.27	石英千枚岩夹薄层变质硅质岩、千枚岩	灰—深灰色，薄—中层状，单层厚0.2-0.5米，主要矿物为石英、绢云母、少量星点状黄铁矿等，三者常互相渐变过渡，组成清晰的水平层理，变质硅质岩等，千枚岩约占20-30%。
36.27	38.82	变质硅质岩夹石英千枚岩	深灰色，鳞片粒状变晶结构，成分主要为石英，次为绢云母及少量碳质，岩石水平层理发育。局部可见黑、浅灰色相间的条带状构造。
38.22	57.33	变质粉砂岩与千枚岩互层	浅灰、灰、深灰色，中厚层，单层厚0.4-1米不等。主要矿物为石英、绢云母、少量星点状黄铁矿等。千枚岩约占35%，呈深灰色，千枚状构造，两种岩性呈不等厚度的相间双层产出，与上、下层呈渐变过渡关系。
57.33	58.42	含碳质千枚岩	灰黑色，千枚状构造，主要矿物为绢云母、石英，少量硅质，污手。
58.42	59.1	含重晶石变质硅质岩	浅灰色，致密坚硬，主要矿物为石英，次为绢云母重晶石，顶底界线呈过渡关系。
59.1	61.91	条纹状重晶石矿	灰白色条纹状构造，条纹为硅质，宽0.2-3毫米，主要矿物为重晶石，脉石矿物为石英、绢云母、黄铁矿。
61.91	63.31	含重晶石变质硅质岩	浅灰色，较坚硬，含绢云母较高，具千枚岩构造，局部见石英脉。
63.31	67.6	条纹状重晶石矿	灰白色，条纹状构造，条纹为硅质，宽0.5-10毫米，主要矿物为重晶石，次为石英，绢云母及少量星点状黄铁矿，与上层渐变过渡，底界清楚。
67.6	69.85	含重晶石千枚岩	浅灰-深灰色，千枚状构造，主要矿物为绢云母、石英，次为重晶石。
69.85	76.45	条纹状、条带状重晶石矿	浅灰、灰白色，条纹状条带状构造，宽0.5-10毫米，由硅质组成，水平层理发育，主要矿物为重晶石，脉石矿物为石英、绢云母、黄铁矿，矿石质量中等。
76.45	79.28	含重晶石千枚岩	浅灰-深灰色，千枚状构造，水平层理发育，主要矿物为绢云母、石英、少量重晶石、黄铁矿。顶板界线清楚，底界呈过渡关系。
79.28	86.58	条纹状重晶石矿	浅灰、灰白色，条纹状条带状构造，条带宽0.5-7毫米，由硅质、绢云母组成，矿石矿物为重晶石，脉石矿物为石英、绢云母、黄铁矿，中上部矿石质量较差，中下部较佳，底界清楚。
86.58	88.06	含重晶石变质硅质岩	浅灰色，成分主要为石英（80%），次为绢云母、黄铁矿、重晶石，黄铁矿呈散状分布在岩石中，晶形完好。

图 4-21 地质资料编辑

4.3.2 地图管理功能设计

1. 地图管理

该模块主要是实现岩心资料的查询和添加岩心钻孔资料。首先以地图为底界面，采用视图控制功能方便用户操作，用于完成对地图的放大、缩小、拖动、前进、后退、漫游、刷新视图等功能操作。地图有基本地图、地形混合和卫星混合三种类型。放大、缩小功能实现对地图的比例和显示范围的改变；拖动功能实现显示区域的更改；漫游、刷新功能提供快捷的整体浏览地图和选定特定范围的功能；打开地图文件、添加新的岩心钻孔信息或删除已打开的钻孔信息等功能，方便用户了解岩心钻孔的空间位置，增强岩心资料空间显示的灵活性。

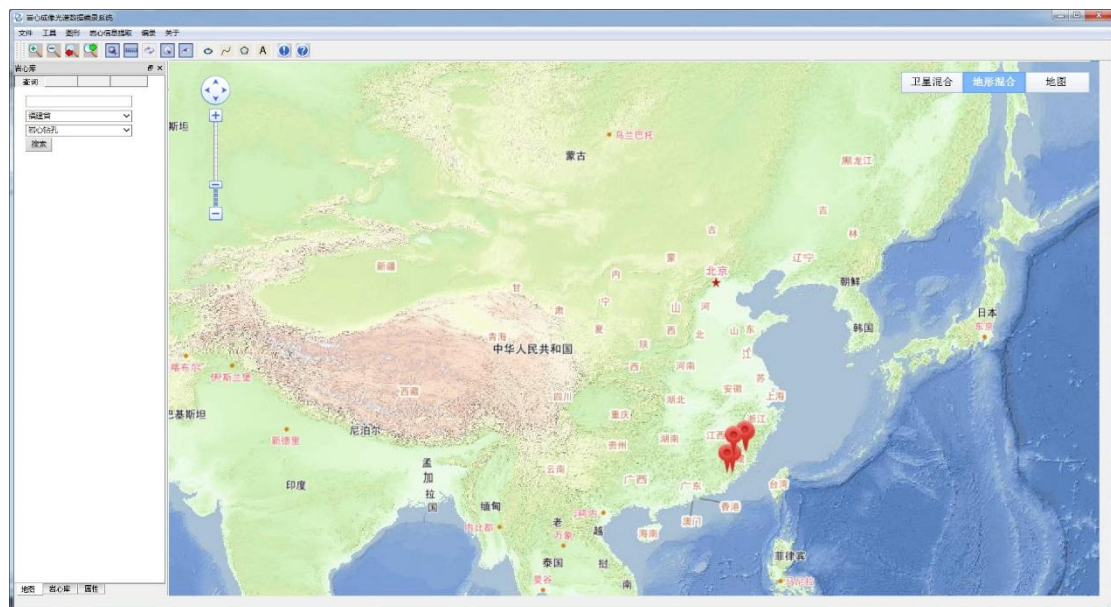


图 4-22 地图管理界面

2. 数据属性编辑

数据的编辑功能是一个最基本的信息管理系统不可或缺的一部分，HyCore 编录系统最终以地图的形式显示岩心钻孔的地理位置信息（根据经纬度控制），是全国众多岩心钻孔中的一部分。数据属性编辑功能实现了岩心钻孔数据的完善和管理，是保证岩心数据库的不断更新的重要方法。其中最基本的数据编辑功能主要包括数据添加、数据更新和数据删除等。岩心编录系统与一般信息管理系统的区别在于所管理的数据不仅具有二维空间坐标数据又有深度信息、属性数据以及高光谱立体图像数据，因此数据编辑功能相比一般信息管理系统复杂：不仅要

编辑属性数据库和二维空间坐标的信息还要编辑高光谱立体图像深度属性，实现图库一体化编辑和维护。本系统数据编辑功能主要通过菜单栏下的数据编辑对话框进行岩心高光谱数据的录入、更新、删除操作。

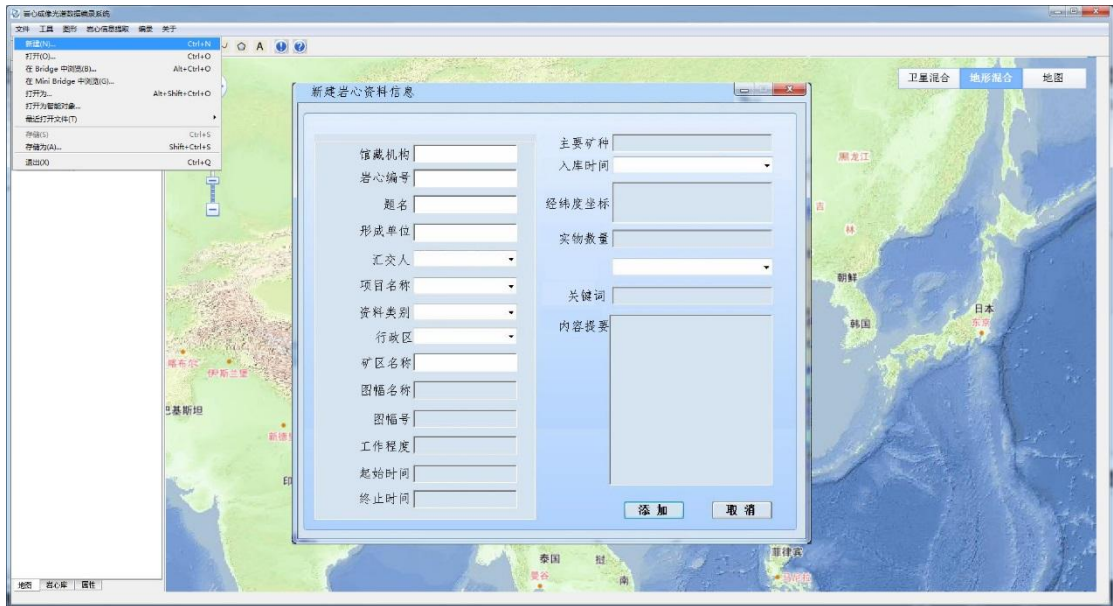


图 4-23 新建岩心资料信息

3. 钻孔查询

➤ 基于属性查询

属性查询，即根据属性查询地图上的要素，并显示要素的详细信息，也可即时定位到要素在地图上的位置并高亮显示。打开岩心菜单栏中的查询功能，选择想要查询的钻孔岩心的基本特点（如金矿、铜矿、铁矿等），点击查询。在地图中就能显示所有相关的岩心钻孔名称，点击查看详细就可以看到详细的岩心资料信息。

➤ 基于空间位置查询

空间位置即基于空间要素的查询，选择一个或多个要素后查询其属性并显示结果。鼠标移动到主视图中的某个区域并圈出查看范围，即可显示岩心钻孔位置标志，单击查看钻孔名称，选择想要查询的钻孔查看详细信息。

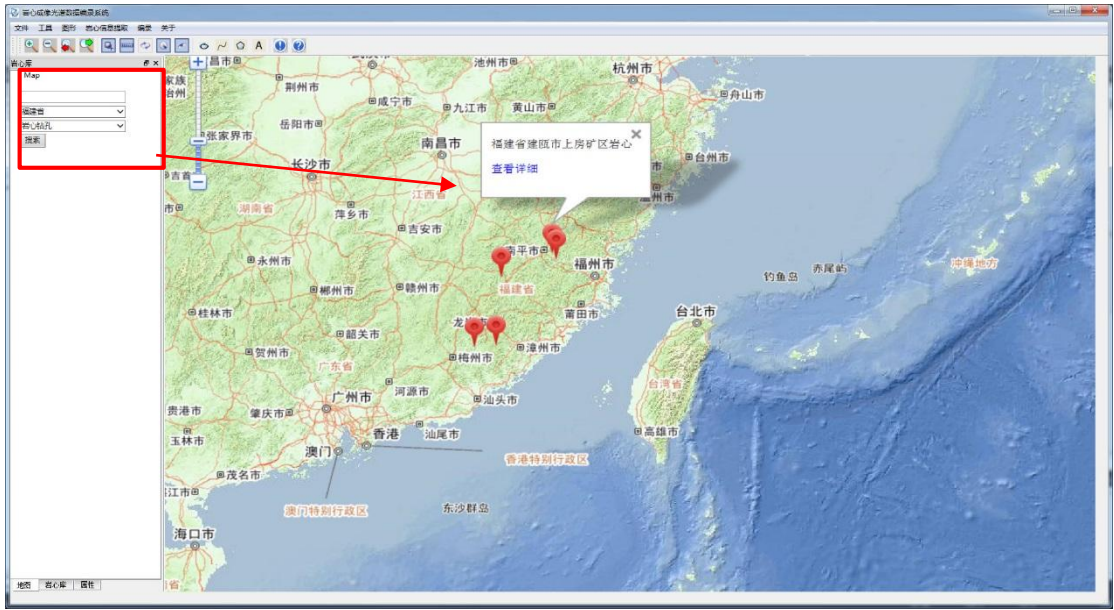


图 4-24 岩心钻孔查询功能

资料信息：福建省建瓯市上房矿区岩心			
馆藏机构:	国土资源实物地质资料中心		
档号:	000345		
题名:	福建省建瓯市上房矿区岩心		
形成单位:	福建省地质调查院		
汇交人:	福建省地质资料馆		
项目名称:	福建省建瓯市上房矿区下房矿段钨矿详查		
资料类别:	矿产勘查		
行政区:	福建省南平市建瓯市		
矿区名称:	福建省建瓯市上房钨矿		
图幅名称:		图幅号:	
工作程度:	详查		
起始时间:		终止时间:	
主要矿种:	钨、钼、镓、银		
入库时间:	2014-03-21	移交清单编号:	
实物数量:	岩心: 5个钻孔、0箱、1194.63米	岩心列表:	ZK601 (点击查看详细) ZK603 (点击查看详细) ZK606 (点击查看详细) ZK608 (点击查看详细) ZK610 (点击查看详细)
	岩屑: 0个钻孔、0箱、0袋	标本:	0箱、0块, 大标本: 0块
	光片: 0盒、0件	样品:	0箱、0袋 (瓶)
	薄片: 0盒、0件	其他实物:	0箱、7件
原始资料保存单位:		原始资料档号:	福建省、建瓯市、上房矿区、岩心
关键词:			
内容提要:			
备注:			

图 4-25 详细岩心资料信息示例

4.4 本章小结

本章主要针对岩心成像光谱数据编录系统进行了详细的设计。首先对 HyCore 系统做整体设计，从需求与目标，系统整体框架构架，数据库存储结构设计、编录系统用户界面设计和数据库设计做出了阐述；其次对 HyCore 系统进行了详细的界面设计，对各个窗口进行了规划，包括菜单栏、常用工具栏、钻孔显示窗口、岩心编录窗口、数理分析窗口和参数设置窗口 6 个部分；最后对 HyCore 功能进行详细设计，包括基本编录功能和地图管理模块，其中基本编录功能包括导入高光谱数据、自动裁剪、岩心自动解译和地质资料编辑；地图管理模块包括地图管理、数据属性编辑和钻孔查询。

第5章 结论与展望

随着矿产勘查技术的不断发展,在地表开展矿产勘查的工作难度越来越大,勘查的主要方向已转向地表之下的大地岩层。岩心作为矿产勘查的最终环节,记录着地质体垂向变化信息,是珍贵的地质资料。在不破坏岩心表面及内部结构的前提下,遥感作为一种新的矿产勘查手段具有宏观、快速、信息量丰富等优势,是地质找矿中不可或缺的手段。高光谱遥感技术具有依据不同矿物对不同波长光的反射差异探测岩心矿物组成及其相对含量的能力,所获得的遥感地质信息有利于地质专家分析地质成矿条件,圈定找矿远景区和目标靶区,为开展详细地质工作提供可靠的依据。

本文以实现岩心成像光谱数据编录系统设计为目标,对岩心成像光谱编录系统的关键技术和系统功能和界面进行详细的设计。在充分考虑用户需求的前提下,通过对岩心编录所需要的稳定、高效、准确等方面研究总结,针对矿物的光谱特征,分析岩心成像光谱数据的光谱质量,探讨光谱匹配技术的精度,对岩心成像光谱编录系统功能进行详细的分析和设计;从用户使用习惯、方便快捷掌握软件和界面美观大方三个方面展开了岩心成像光谱数据编录系统的详细设计。论文的主要成果和结论如下:

4. 分析和总结了常见蚀变矿物的光谱特征,并在此基础上探讨了高光谱数据的各种矿物的光谱信息提取方法,如最小距离匹配、光谱角度匹配、光谱吸收指数等。用这些方法评估岩心成像光谱数据的光谱质量,探讨光谱匹配技术的精度,将光谱特征量化,以数学计算的方法实现未知目标的判别,解决岩心矿物识别的问题,实现岩心快速解译和分析。
5. 在深入分析岩心成像光谱数据编录系统的功能需求和目标、全面设计系统体系结构以及对编录系统功能构架和界面设计原则的研究基础上,根据岩心成像光谱数据的特点和形态应用的需求,提出了 HyCore 编录系统的整体设计方案。
6. 详细设计了岩心成像光谱编录系统界面和功能模块。将界面分为菜单栏、常用工具栏、钻孔显示窗口、岩心编录窗口、数理分析窗口和参数设置窗口 6 个部分,并对每个部分的详细功能进行设计,在满足岩心编录各个功能的基础上,

力求空间的合理安排和界面的美观；功能模块设计中从用户角度设计为编录系统的自动功能，实现数据的导入、自动裁剪、自动解译和地质资料的编辑等。

虽然本文对 HyCore 系统进行了数据光谱质量和光谱匹配算法的研究，详细分析和设计编录系统的功能和界面。但是由于条件的限制，还需对光谱匹配算法在真实岩心的实际应用精度做进一步的研究；同时岩心成像光谱数据编录系统的界面和各个功能设计并没有实现，距离一个成熟的商业软件还有不小的差距，在岩心成像光谱数据编录系统的研究上，本文仅仅是拉开了万里长征的序幕，还有很多工作内容有待研究和完成。应在以后的研究中，逐步实现设计，在实现过程中发现问题，解决问题。

参考文献

- [1] A. Mauger, J. Keeling, and J. Huntington, Alteration mapping of the Tarcoola Goldfield (South Australia) using a suite of hyperspectral methods, *Applied Earth Science: Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy: Section B*, vol. 116, pp. 2-12, 2007.
- [2] B. J. Bolin and T. S. Moon, Sulfide detection in drill core from the Stillwater Complex using visible/near-infrared imaging spectroscopy, *Geophysics*, vol. 68, pp. 1561-1568, 2003.
- [3] Bandfield J L, Glotch T D, Christensen P R. Spectroscopic identification of carbonate minerals in the Martian dust[J]. *Science*, 2003, 301(5636): 1084-1087.
- [4] Bierwirth P, Blewett R, Huston D. Finding new mineral prospects with HYMAP: early results from a hyperspectral remote-sensing case study in the west Pilbara [J]. *AGSO Research Newsletter*, 1999, 31: 1-3.
- [5] Chen J. Y., Reed I.S. A Detection Algorithm for Optical Targets in Clutter [J]. *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, 1987, AES-23(1):46-59.
- [6] Clark R N, Roush T L. Reflectance spectroscopy: Quantitative analysis techniques for remote sensing applications [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* (1978-2012), 1984, 89(B7): 6329-6340.
- [7] Clark R N, Swayze G A, Gallagher A, et al. Mapping with imaging spectrometer data using the complete band shape least-squares algorithm simultaneously fit to multiple spectral features from multiple materials, *Proceedings of the third airborne visible/infrared imaging spectrometer (AVIRIS) workshop*. 1991, 42: 2-3.
- [8] Croudace I W, Rindby A, Rothwell R G. ITRAX: description and evaluation of a new multi-function X-ray core scanner [J]. *Special Publication-Geological Society of London*, 2006, 267: 51
- [9] Crowley J K, Williams D E, Hammarstrom J M, et al. Spectral reflectance properties (0.4-2.5 μm) of secondary Fe-oxide, Fe-hydroxide, and Fe-sulphate-hydrate minerals associated with sulphide-bearing mine wastes[J]. *Geochemistry: Exploration*,

- Environment, Analysis, 2003, 3(3): 219-228.
- [10] De Carvalho O A, Meneses P R. Spectral correlation mapper (SCM): an improvement on the spectral angle mapper (SAM) [C], Summaries of the 9th JPL Airborne Earth Science Workshop, JPL Publication 00-18. Pasadena, CA: JPL Publication, 2000, 9.
- [11] DiPietro R S, Manolakis D, Lockwood R, et al. Performance evaluation of hyperspectral detection algorithms for subpixel objects [C] SPIE Defense, Security, and Sensing. International Society for Optics and Photonics, 2010: 76951W-76951W-11.
- [12] F. A. Kruse, J. W. Boardman, and J. F. Huntington, Comparison of airborne hyperspectral data and EO-1 Hyperion for mineral mapping, Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, vol. 41, pp. 1388-1400, 2003.
- [13] F. Kruse, Identification and mapping of minerals in drill core using hyperspectral image analysis of infrared reflectance spectra, International journal of remote sensing, vol. 17, pp. 1623-1632, 1996.
- [14] Goetz A F H, Vane G, Solomon J E, et al. Imaging spectrometry for earth remote sensing [J]. Science, 1985, 228(4704): 1147-1153.
- [15] Manolakis D. Taxonomy of detection algorithms for hyperspectral imaging applications [J]. Optical Engineering, 2005, 44(6): 066403-066403-11.
- [16] Sokolik I N, Toon O B. Incorporation of mineralogical composition into models of the radiative properties of mineral aerosol from UV to IR wavelengths [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984–2012), 1999, 104(D8): 9423-9444.
- [17] Swayze G, Clark R N, Kruse F, et al. Ground-truthing AVIRIS mineral mapping at Cuprite, Nevada [J]. 1992.
- [18] Thomson J, Croudace I W, Rothwell R G. A geochemical application of the ITRAX scanner to a sediment core containing eastern Mediterranean sapropel units [J]. Geological Society, London, Special Publications, 2006, 267(1): 65-77.
- [19] Wang W, Zhao Y, Bunt R. HyLog: A High Performance Approach to Managing Disk Layout[C]//FAST. 2004, 4: 145-158.
- [20] Yuhas R H, Goetz A F H, Boardman J W. Discrimination among semi-arid landscape endmembers using the spectral angle mapper (SAM) algorithm [J]. 1992.

- [21] 白继伟, 赵永超, 张兵, 等. 基于包络线消除的高光谱图像分类方法研究[J]. 计算机工程与应用, 2003, 39(13): 88-90.
- [22] 白继伟. 基于高光谱数据库的光谱匹配技术研究 [D][D]. 北京: 中国科学院遥感应用研究所, 2002.
- [23] 甘甫平, 王润生, 马蔼乃, 等. 基于光谱匹配滤波的蚀变信息提取[J]. 中国图象图形学报: A 辑, 2005, 8(2): 147-150.
- [24] 甘甫平, 王润生, 马蔼乃. 基于特征谱带的高光谱遥感矿物谱系识别[J]. 地学前缘, 2003, 10(2).
- [25] 甘甫平, 王润生. 光谱遥感岩矿识别基础与技术研究进展[J]. 遥感技术与应用, 2002, 17(3): 140-147.
- [26] 郭峰利, 杨联荣. 浅谈地质找矿中的遥感技术[J]. 中国新技术新产品, 2012 (8): 54-54.
- [27] 郭娜, 郭科, 张婷婷, 等. 基于短波红外勘查技术的西藏甲玛铜多金属矿热液蚀变矿物分布模型研究[J]. 地球学报, 2012, 33(4): 641-653.
- [28] 郭娜, 甲玛斑岩—矽卡岩型铜矿床蚀变矿物组合研究, 成都理工大学, 2012.
- [29] 李晶, 祁进平, 修连存, 等. 岩心光谱扫描仪在紫金山矿产勘查中的应用[J]. 矿物学报, 2013, 2.
- [30] 李旭文. 光谱遥感数据波形分析法的应用[J]. 遥感学报, 1992, 3: 007.
- [31] 李幼平, 禹秉熙, 王玉鹏, 等. 成像光谱仪辐射定标影响量的测量链与不确定度[J]. 光学 精密工程, 2006, 14(5): 822.
- [32] 刘波. 基于地面成像光谱系统的植物信息提取研究[D]. 北京: 中国科学院遥感应用研究所, 2010.
- [33] 刘宁, 陈攀峰, 郑胜利, 等. 岩心扫描图像分析及其应用研究[J]. 石油实验地质, 2004, 26(5): 500-504.
- [34] 刘树臣. 发展新一代矿产勘探技术——澳大利亚玻璃地球计划的启示[J]. 地质与勘探, 2003, 39(5): 53-56.
- [35] 刘衍宏, 刘少峰, 张川, 等. 基于 Hyperion 数据的粘土矿物权重信息提取研究——

- (以江西省赣州地区为例[J]. 国土资源遥感, 2010, 22(3): 26-30.
- [36] 罗慧芬. 东昆仑遥感矿化蚀变信息提取方法研究 [D]. 成都理工大学, 2010.
- [37] 潘明忠, 亓洪兴, 肖功海, 等. 便携式地面成像光谱辐射计的设计[J]. 红外, 2010 (1): 1-7.
- [38] 祁进平. 2011. 近红外光谱在紫金山矿田勘查工作中的应用[R]. 第七届遥感及三维光谱蚀变矿物填图培训班.
- [39] 童亨茂. 成像测井资料在构造裂缝预测和评价中的应用[J]. 天然气工业, 2006, (26(9)): 58-61.
- [40] 童庆禧, 张兵, and 郑兰芬, 高光谱遥感: 原理, 技术与应用: 高等教育出版社, 2006.
- [41] 万应明, 高峻, 董建平, 等. 多测井曲线的综合处理合成[J]. 石油地球物理勘探, 2005, 40(2): 243-247.
- [42] 王建宇. 成像光谱仪的光谱响应函数及光谱分辨能力[J]. 成像光谱技术, 1991, 44: 50.
- [43] 王晋年, 李志忠, 张立福, 等. “光谱地壳”计划——探索新一代矿产勘查技术[J]. 地球信息科学学报, 2012, 14(3): 344-351.
- [44] 王晋年, 郑兰芬. 成像光谱图象光谱吸收鉴别模型与矿物填图研究[J]. 环境遥感, 1996, 11(1): 20-31.
- [45] 王润生, 甘甫平, 闫柏琨, 等. 高光谱矿物填图技术与应用研究, 国土资源遥感, vol. 1, pp. 1- 13, 2010.
- [46] 王润生. 高光谱遥感的物质组分和物质成分反演的应用分析[J]. 地球信息科学学报, 2009, 11(3): 261-267.
- [47] 向娟, 李钢. 高光谱遥感影像管理系统的设计与实现[J]. 测绘与空间地理信息, 2008(05).
- [48] 修连存, 郑志忠, 俞正奎, 等. 近红外光谱分析技术在蚀变矿物鉴定中的应用[J]. 地质学报, 2008, 81(11): 1584-1590.
- [49] 胥燕辉, 田庆久, 磁铁石英岩型铁矿岩心光谱编录研究, 国土资源遥感, vol. 17, pp. 70-73, 2005.

- [50] 胥燕辉. 铁矿岩心高光谱编录初探[J]. 地质找矿论丛, 2006, 21(B10): 113-117.
- [51] 张杰林, 黄艳菊, 王俊虎, 等, 铀矿勘查钻孔岩心高光谱编录及三维矿物填图技术研究, 铀矿地质, vol. 29, pp. 249-255, 2013.
- [52] 张静, 宋锐, 郁文贤, 等, 2005. 基于混淆矩阵和 Fisher 准则构造层次化分类器 准则构造层次化分类器. 软件学报, 16(9): 1560-1567.
- [53] 张筠. 川西坳陷裂缝性储层的裂缝测井评价技术[J]. 天然气工业, 2003 (z1): 43-45.
- [54] 张良培, 张立福. 高光谱遥感[M]. 武汉大学出版社, 2005.
- [55] 赵英时, 2003. 遥感应用分析原理与方法. 科学出版社, 202-208
- [56] 郑宝华. 数字化岩心扫描仪关键技术研究[D]. 吉林大学, 2010.

个人情况简介

硕士期间发表文章情况

- [1] 王桂珍, 张立福, 孙雪剑, 杨杭, 姜海玲, 童庆禧. 基于 SREM 融合数据的矿物蚀变信息提取方法[J]. 地球科学. 2015. (已接收)

硕士期间参与项目情况

- [1] 国家 863 项目《全球巨型成矿带矿产资源与能源遥感专题产品生产体系》
(课题编号 2013AA12A302)
- [2] 中国地质调查局项目《星空地一体化光谱关键技术与设备研发》(课题编号 1212011120222)

致谢

岁月如梭，如歌。转眼间，三年的研究生求学生活即将结束，站在毕业的门槛上，回首往昔，奋斗和辛劳成为丝丝的记忆，甜美与欢笑也都尘埃落定。中国科学院以其严谨的科研氛围教我求学，遥感地球所以其博大包容的情怀胸襟、充实的所内活动育我成长，高光谱实验室以其生动活泼学习风气促我进步。在毕业论文完成之际，我谨向所有关心、爱护、帮助我的人们表示最诚挚的感谢与最美好的祝愿。

首先向我的恩师张立福老师致以诚挚的敬意和感谢！感谢张老师对我论文的悉心指导，承蒙张老师的关爱和帮助，我得以进入高光谱研究室学习，在遥感所求学的三年时光里，老师严谨的治学态度，踏实的工作作风，亲切的待人风格，活跃的学术思维，给我留下了非常深刻的印象并产生了非常深远的影响。正是在张老师耐心细致的指导下，我完成了人生中的第一篇期刊文章。同时在撰写毕业论文的过程中，老师倾注了大量的心血，多次主动关心并与我进行讨论，没有张老师的辛勤栽培、孜孜教诲，就没有我的顺利毕业。

衷心感谢童庆禧院士。童老师是我国高光谱遥感事业的开山鼻祖，他知识渊博、治学严谨、视野广阔、老当益壮，为我国高光谱遥感事业的发展奠定了雄厚的基础，像高耸的灯塔照亮了后人远征的路程。

衷心感谢张霞老师。张霞老师严谨的科研态度，年轻的心态，给我树立了良好榜样。

衷心感谢吴太夏老师。在吴太夏老师的帮助下，我完成了研究方向的选定、毕设开题以及毕业论文的撰写。同时在实验室工作中，吴太夏老师认真的指导我，让我受益匪浅。

衷心感谢高光谱实验室的其他老师、博士后在学习上和生活上给与我的关心和帮助，以及在工作中所给予的大量支持、帮助、关心和理解。

感谢高光谱遥感研究室的师兄师姐们以及师弟师妹们所给予的关心和帮助。因为有你们，我的研究生生活才会如此的丰富多彩。特别感谢孙雪剑师兄和姜海玲师姐在我碰到疑问时给予的耐心解答。

我要衷心感谢我的父母和姐姐。你们无限的宽容和无尽的支持，是我多年来一直不断拼搏奋进的动力。

最后感谢所有关心和帮助过我的人们！衷心祝愿我国的遥感事业取得更大的成就！