

doi: 10.12029/gc20220120003

高扬, 奚歌, 陈春霞, 修连存, 郑志忠, 颜培胜, 董金鑫, 闫柏琨, 柳稼航, 赵宇浩, 俞正奎. 2023. 小型机载高光谱成像仪在高山峡谷地区遥感地质岩性解译应用[J]. 中国地质, 50(4): 1032–1043.

Gao Yang, Xi Ge, Chen Chunxia, Xiu Liancun, Zheng Zhizhong, Yan Peisheng, Dong Jinxin, Yan Bokun, Liu Jiahang, Zhao Yuhao, Yu Zhengkui. 2023. The application of a small airborne hyperspectral imaging spectrometer on remote sensing geology and lithology interpretation in alpine canyon regions[J]. Geology in China, 50(4): 1032–1043(in Chinese with English abstract).

## 小型机载高光谱成像仪在高山峡谷地区遥感地质岩性解译应用

高扬<sup>1,2</sup>, 奚歌<sup>3</sup>, 陈春霞<sup>1,2</sup>, 修连存<sup>1,2</sup>, 郑志忠<sup>1,2</sup>, 颜培胜<sup>3</sup>, 董金鑫<sup>1,2</sup>,  
闫柏琨<sup>4</sup>, 柳稼航<sup>5</sup>, 赵宇浩<sup>1</sup>, 俞正奎<sup>1,2</sup>

(1. 中国地质调查局南京地质调查中心, 江苏 南京 210016; 2. 江苏省光谱成像与智能感知重点实验室, 江苏 南京 210094;  
3. 中水北方勘测设计研究有限责任公司, 天津 300222; 4. 中国地质调查局自然资源航空物探遥感中心, 北京 100083; 5. 南京航空航天大学, 江苏 南京 210016)

**提要:**【研究目的】水利工程项目通常位于地势险峻的山区, 交通不便、环境恶劣, 勘察工作十分艰苦。同时, 视界限制使地质人员不能整体上掌握地质体的面貌, 尤其在高山峡谷地区, 人力、物力及时间成本耗费巨大。高光谱遥感技术在地质领域中的应用主要集中在地物分布反演方向, 通过未知地物与已知矿物之间相同的特征吸收峰来判定地物种类, 利用其极高的光谱分辨率、空间分辨率和“图谱合一”的特性, 可对高山峡谷区的地物目标进行精细分类, 从而提高地质调查工作的效率, 降低风险。【研究方法】中水北方勘测设计研究院利用中国地质调查局南京地质调查中心自主研发的高效率小型机载高光谱成像光谱仪, 首次对位于甘南藏族自治州迭部县高山峡谷地带的工作区进行高光谱遥感探测, 获取了工作区航空高光谱影像数据。采用最小噪声分离法、波段比值分析法对高光谱遥感数据进行岩性解译。【研究结果】结果表明: 以白龙江为界, 以北大部分为板岩及第四系黄土, 以南则大部分为灰岩。解译结果与已知区域地质图岩性分布一致。【结论】本次研究验证了国产高光谱成像仪的可靠性与实用性, 同时提高了水利工程前期地质勘查工作的效率和水平, 并提供了险要地形地质勘察的一手资料。

**关键词:** 板岩; 灰岩; 黄土; 岩性识别; 机载高光谱遥感技术; 小型短波红外成像系统; 高山峡谷; 水利工程; 地质调查工程

**创新点:** 首次采用国产小型机载高光谱成像仪对甘南藏族自治州迭部县高山峡谷地区进行遥感探测, 并对获取的高光谱影像进行岩性解译, 分析结果与已知区域地质图岩性分布一致, 验证了国产高光谱成像仪的高效性、可靠性与实用性。

中图分类号: P627 文献标志码: A 文章编号: 1000–3657(2023)04–1032–12

## The application of a small airborne hyperspectral imaging spectrometer on remote sensing geology and lithology interpretation in alpine canyon regions

收稿日期: 2022–01–20; 改回日期: 2022–04–08

基金项目: 国家重点研发计划“城市地下空间开发地下全要素信息精准探测技术与装备(2019YFC0605101)资助。

作者简介: 高扬, 女, 1989年生, 高级工程师, 主要从事高光谱遥感地质探测、数据处理与信息提取相关研究;

E-mail: coco\_rocha1900@126.com。

通讯作者: 陈春霞, 女, 1980年生, 正高级工程师, 主要从事光谱探测地质仪器研发和高光谱技术在地质领域的应用研究;

E-mail: ccx\_ccx@sohu.com。

GAO Yang<sup>1,2</sup>, XI Ge<sup>3</sup>, CHEN Chunxia<sup>1,2</sup>, XIU Liancun<sup>1,2</sup>, ZHENG Zhizhong<sup>1,2</sup>, YAN Peisheng<sup>3</sup>,  
DONG Jinxin<sup>1,2</sup>, YAN Bokun<sup>4</sup>, LIU Jiahang<sup>5</sup>, ZHAO Yuhao<sup>1</sup>, YU Zhengkui<sup>1,2</sup>

(1. Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, Jiangsu, China; 2. Key Laboratory of Spectral Imaging and Intelligent Perception of Jiangsu Province, Nanjing 210094, Jiangsu, China; 3. Bei Fang Investigation, Design & Research Co., Ltd, Tianjin 300222, China; 4. Aerogeophysical and Remote Sensing Center of Natural Resources, China Geological Survey, Beijing 100083, China; 5. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, Jiangsu, China)

**Abstract:** This paper is the result of geological survey engineering.

**[Objective]** Water conservancy projects are usually located in mountainous areas with steep terrain, inconvenient transportation and harsh environment, so that the survey work is very difficult. Meanwhile, the limitation of horizon makes it impossible for geologists to grasp the features of geological units as a whole, especially in high mountain and canyon areas. The application of hyperspectral remote sensing technology in the geological field mainly focuses on the extraction and identification of geological composition. The types of surface features are determined by similarity of spectral features between unknown geological units and known minerals and rocks. Using its extremely high spectral resolution, spatial resolution and the advantage of union of imagery and spectrum, the technology can be applied on fine classification of rock types in alpine and canyon areas, so as to improve the efficiency of geological survey and reduce costs and risks. **[Methods]** This paper introduces Bei Fang Investigation, Design & Research Co., Ltd. adopting the SSMAP-II small short-wave infrared imaging system independently developed by the Nanjing Center, China Geological Survey in the project of "Research on Remote Sensing Geological Interpretation Methods Based on Hyperspectral Image Data", taking a helicopter as platform to carry out hyperspectral ground-based remote sensing surveys in Diebu County, Gannan Tibetan Autonomous Prefecture. The surveys aerial hyperspectral image data of the study area, then used MNF minimum noise fraction (MNF) method and band ratio analysis method to interpret the lithology. **[Results]** The interpretation result is basically consistent with the lithology distribution of the known regional geological map, providing first-hand information for the water conservancy projects of the dangerous areas. **[Conclusions]** This research improves the work efficiency and the level of geological exploration, meanwhile it also verifies the reliability and practicability of the domestic hyperspectral imaging spectrometer.

**Key words:** slate; limestone; loess; lithology identification; airborne hyperspectral remote sensing technology; small short-wave infrared imaging system; mountains and valleys; water conservancy engineering; geological survey engineering

**Highlights:** The domestic small airborne hyperspectral imager was used to remotely detect the lithology of alpine canyon area in Diebu County, Gannan Tibetan Autonomous Prefecture for the first time, and the lithology was interpreted. The analyzed results are consistent with the lithology distribution of the known regional geological map, which verifies the efficiency, reliability and practicability of the domestic hyperspectral imaging spectrometer.

**About the first author:** GAO Yang, female, born in 1989, senior engineer, mainly engaged in hyperspectral geological application, data processing and information extraction; E-mail: coco\_rocha1900@126.com.

**About the corresponding author:** CHEN Chunxia, female, born in 1980, professor level senior engineer, mainly engaged in the research and development of spectral detection geological instruments and the application research of hyperspectral technology in the field of geology; E-mail: ccx\_ccx@sohu.com.

**Fund support:** Supported by China National Key R & D Program of The accurate detection technology and equipment of the underground all element information in urban underground space development (No.2019YFC0605101).

## 1 引言

高光谱遥感属于第三代遥感技术,是20世纪80年代以来遥感领域最大的技术进展(Berger et al., 2003; Campbell, 2010),在对地观测时可获取众多连

续波段的光谱图像,达到识别地球表面物质的目的。高光谱数据是一个光谱图像的立方体,其图像维度显示地表二维空间的特征,其光谱维度揭示每个像元的光谱曲线特征,实现了遥感数据图像维与光谱维的有机融合(张卡等, 2004; 杜培军等,

2018)。高光谱遥感在地质应用中主要体现在矿物识别与岩性填图、矿产资源勘探、矿业环境监测、矿山生态恢复和评价等方面(张达和郑玉权,2013;姜廷轩,2018)。根据水利工程行业特点,前期地质勘查工作区域多为山区,地势偏僻,地形复杂,为地质勘查人员顺利开展勘测工作带来了极大的困难。此外,更有一些陡山、戈壁等区域实地勘查异常困难,人员几乎无法进入该类区域(Wang et al., 2018; Petrov and Zhuzhulina, 2021)。为了减轻地质勘查工作人员繁重的体力劳动,保障作业人员的人身安全,快速获取险要地形的地质勘查一手资料,提高地质勘查的工作效率和勘查水平,进行高光谱遥感地质解译研究十分必要。高光谱遥感技术以其纳米级的光谱分辨率、窄而多的波段、包含地物的空间和光谱双重信息的“图谱合一”的特点,能够为地质勘查工作提供有效的技术支持(张宗贵和王润生,2000;王润生等,2010,2011)。

在国外,美国喷气推进实验室(JPL)、欧空局(ESA)、澳大利亚联邦科工组织(CSIRO)、加拿大宇航局(CSA)等均有专门的研究机构开展高光谱技术研究和设备研发,研究的设备除了为完成深空探测科学目标外,另一重大需求为对地观测,开展遥感调查应用,搭载平台包括卫星和飞机。其中最具代表性的美国JPL研制的航空高光谱成像仪,开发历史已近40年,先后研制出摆扫式成像光谱仪AVIRIS和推扫式成像光谱仪AVRIS-New(甘甫平和王润生,2004;Govender et al., 2007;杜培军等,2016;董新丰等,2020)。中国在高光谱技术方面有丰富的积累,但光谱仪器的一些关键器件仍需要进口,且高性能的短波红外高光谱设备进口困难,一定程度上影响了中国高光谱技术应用的自主性,并且限制了高光谱技术在国内的普及和推广(白宇,2022)。中国地质调查局南京地质调查中心是国内较早开展小型成像光谱仪研发的单位,在国家重大仪器开发专项和国家重点研发计划支持下,成功研制了以推扫式小型化成像光谱仪HMS1000/2500为核心的机载高光谱成像系统SSMAP-II,在中水北方勘测设计研究院的“基于高光谱影像数据的遥感地质解译方法研究”项目中,对位于高山峡谷之中的工作区进行了高光谱对地探测。本文介绍了SSMAP-II的工作原理,重点阐述了在甘南迭部县

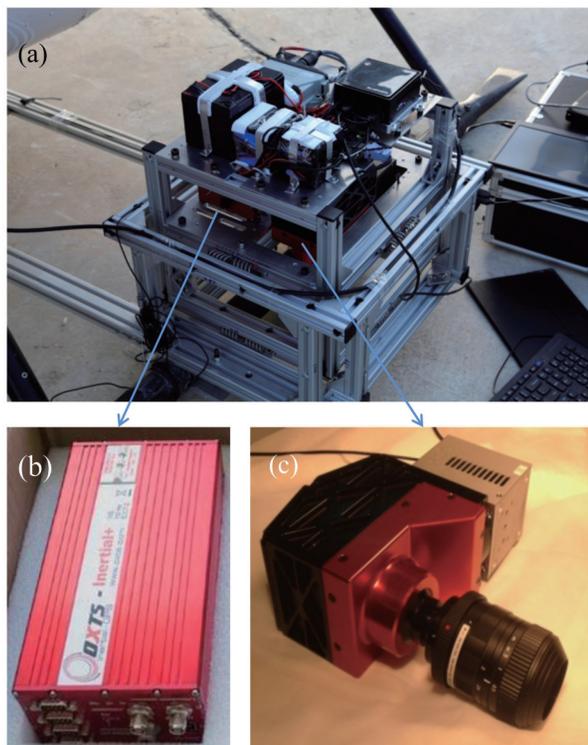


图1 机载高光谱成像系统SSMAP-II(a)和短波红外高光谱成像仪(b)及惯性导航系统(c)

Fig.1 Airborne hyperspectral imaging system(a), SWIR imaging spectrometer(b) and GPS/INS(c)

进行的高光谱遥感对地探测的作业流程及数据处理方法,并基于高光谱反射率数据进行高光谱影像岩性解译,通过光谱波段重采样、植被、水体掩膜、光谱数据归一化、最小噪声分离变换、波段比值法等处理对工作区域进行岩性研判解译,为水利工程勘察提供了直接的岩性关键信息,同时验证了国产高光谱成像仪的可靠性与实用性。

## 2 设备与方法

### 2.1 设备介绍

SSMAP-II机载高光谱成像系统由小型短波红外高光谱成像仪、微型上位机、惯性导航系统、达标板及供电电源组成(图1),分为三层集成在铝型材支架上,架杆内置减震弹簧,开有布线槽。上层安装电源、上位机、惯导基站和打标板,中层安装惯性导航设备,保持水平,底层安装光谱仪,镜头垂直向下。所有连线卡位固定在线槽内,惯性导航系统的外设天线和主从双天线水平放置于飞行器上。

表1 与国内外典型系统主要指标对比

Table 1 Comparison with main indexes of typical systems at home and abroad

制造厂商	光谱范围/ $\mu\text{m}$	光谱分辨率/nm	总视场/ $^\circ$	瞬时视场/mrad	信噪比波段2.0~2.5 $\mu\text{m}$	重量/kg
SASI (加拿大)	1.0~2.5	7.0	40	0.698	约420:1 (地面反射率50%)	80 (不含三轴平台)
AVIRIS-NG (美国)	0.4~2.5	5	36	1.0	设计400:1 (地面反射率50%)	480 (含三轴平台)
HyMap (澳大利亚)	0.45~2.48	15~20	60	2.5	约500:1 (地面反射率50%)	约100 (含三轴平台)
APEX (瑞士、比利时)	0.41~2.42	6~11	28	0.48	约300:1 (地面反射率50%)	150 (不含三轴平台)
OMIS-1 (中国)	0.4~12.5	40 nm@1.06~1.7 $\mu\text{m}$ 15nm@2.0~2.5 $\mu\text{m}$	大于70	3	约80:1 (地面反射率50%)	约100 (不含三轴平台)
SWIR光谱仪 (本项目)	1.0~2.5	优于10	大于34	优于2	大于200:1 (地面反射率30%)	小于15 (含三轴平台)

### 2.1.1 高光谱成像仪

中国地质调查局南京地质调查中心所研制的短波红外(SWIR)高光谱成像仪采用全反射光学设计和凸面光栅分光,增加了能量传递,减小了体积,减轻了重量,适合以无人机或飞艇为平台对地遥感探测,适用于地质、环保、海洋、农业、国土和防伪鉴定等领域遥感探测(魏桂华等,2019;郑志忠等,2020a)。成像光谱仪基于Offner型的凸面光栅分光系统,相比较其他分光系统,具有光学相对孔径大、色散线性度好、结构紧凑和图像成像质量佳等优点。该种类型高光谱成像仪在效率(能量利用率)和光学畸变相方面比较其他类型的成像光谱仪中性能表现最佳(郑志忠等,2017,2020b)。系统所采用的自主研发的闪耀光栅平均效率高达60%以上。基于指标对比,本项目中的成像光谱仪在光谱分辨率、瞬时视场与对比仪器等效的情形下,信噪

比与国外先进水平一致,且仪器体积重量远小于同类仪器(郑志忠等,2020c)。该仪器与国外典型机载高光谱仪指标对比如表1所示。

### 2.1.2 惯性导航系统

本次任务中所使用的惯性导航系统(GPS/INS)是英国Oxts公司的Inertial+2型号组合惯导。该设备将陀螺、磁力计、加速度计、GPS等有机组合,可输出载体三轴的角速度、姿态角度、航向角度、三轴的加速度值、位置信息、速度、时间等。GPS/INS通过惯性传感器陀螺仪和加速度计来计算位置速度、方位姿态等测量数据,依靠传感器输出数据,没有GPS跳动。外接的GPS用于消除惯性器件漂移而带来的稳定性误差。即使GPS信号丢失,GPS/INS仍然能通过内部的惯性传感器来继续输出数据。这样不仅能提高位置和速度性能指标,同时也能增强方位和姿态性能指标。飞机在平飞的条件下,可以输出恒稳定的航向数据,但单纯使用惯性会降低航向精度,因此外部采用双天线设计,提高了航向精度,在低动态条件下,依然可以得到高精度、恒稳定的航向数据。

### 2.1.3 飞行器

本次搭载的飞行平台为罗宾逊R66直升机(图2)。该机型具有飞行稳定,飞行航时长,载重量适中等特点。整机长8.99 m,宽1.47 m,高3.48 m,有效载荷为590 kg,最大速度可达259 km/h。

## 2.2 高光谱遥感调查

### 2.2.1 工作区

本次高光谱遥感调查的工作区位于甘南藏族



图2 罗宾逊R66直升机

Fig.2 Picture of Robinson R66 helicopter

自治州迭部县东南方向,地处秦岭西延岷山、迭山山系之间的高山峡谷之中,是青藏高原东部边缘甘川交界处,直线距离迭部县约15 km左右,总面积约46 km<sup>2</sup>。迭部县县城海拔为2400 m,县域地形自西北向东南倾斜。工作区最低海拔约2180 m,最高海拔约3300 m,平均坡度30°~35°,境内白龙江干流自西向东横穿岷、迭两大山系水系之间。年均降水量625.5 mm,地表水资源十分丰富,白龙江自西向东流经县境110 km。达拉、多儿、阿夏、腊子河等20余条支流,从南北两侧汇入白龙江,水电资源开发条件较好。迭部县地处南秦岭印支冒地槽褶皱带,白龙江复式北背斜南翼。地质构造复杂,有较好的成矿条件,属中国十大矿产地之“白龙江大断裂多金属成矿带”的一部分,甘肃省五大矿业综合经济之“甘南州贵金属-铁-铀-非金属企业综合经济区”。工作区植被覆盖率达88%,主要为林地和牧场,对地质解译有一定的影响。

### 2.2.2 航测设计

综合考虑仪器参数、成图精度的要求,结合工作区地理环境、地形起伏、野外工作条件和作业效率等因素,沿东西方向部署了31条航线,工作区覆盖面积达46 km<sup>2</sup>。在实际飞行中,相邻条带应尽量选择光照条件相似的时间进行数据采集,高光谱航测一般选择在太阳正午前后2小时,太阳高度角大于45°为最佳观测时间,考虑天气、云量、风向、气流以及空域管制等影响因素,在11:00~15:00可获取较好的数据。根据工作区的探测目标大小、光谱特征和地形特点的要求,出于缩短成图周期、降低成本、提高综合效益的原则,确定高光谱数据空间分辨率为2 m。

表2 航摄飞行参数表

Table 2 The list of aerial flight parameters	
区域	甘肃迭部县
平均海拔/m	2226
地面分辨率GSD/m	2
相对航高/m	833
飞行速度/(km/h)	100
旁向重叠率/%	约30
航线/条	31
航线间隔/m	150
航线总长/km	309.38
摄区面积/km <sup>2</sup>	46.028
数据获取时间	2017年11月13日—15日

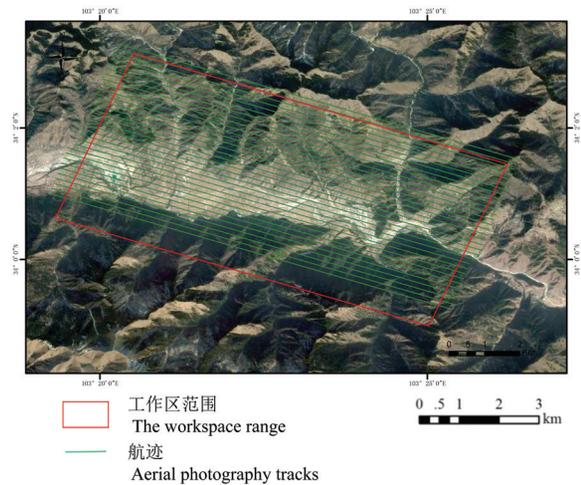


图3 工作区范围和航摄航迹示意图(底图来自Google地图)  
Fig.3 Schematic diagram of the workspace range and aerial photography track (basemap is from Google Maps)

根据工作区地形情况和飞行条件,在保证无绝对漏洞的情况下,考虑飞行成本和效率,设计旁向重叠度为30%,单项航带覆盖宽度150 m。航飞参数如表2。

由于工作区南部高差过大,飞行存在一定危险性,所以在实际飞行中,减少南部5条航线。这5条航线基本为植被覆盖区域,对整体研究的影响较小。工作区与航迹如图3所示。

### 2.2.3 同步地物光谱测量

结合卫星遥感影像和1:25万地质图资料,根据地形复杂程度和露头发育程度及交通状况、合理布置采样路线。采样路线以穿越为主,总长度17 km,采集实验区内典型岩石样品46块,选用ASD FieldSpec4光谱扫描仪进行光谱测量,同时使用南方RTK-S82记录采样点地理坐标。对工作区范围内采集的典型样品进行分析,在工作区内白龙江以北,共发现三类典型岩石,分别为板岩、砾岩、砂岩。板岩分布占绝大多数,砾岩、砂岩分布较少,并且岩石露头面积较少。对岩石样本新鲜面的不同位置进行多次光谱采集,平均后得到每一块样本的特征光谱曲线,之后对每一类典型岩石样本的特征光谱曲线进行平均计算。工作区地面采样点位置与典型曲线对比如图4所示。

经过大气校正后的高光谱影像反演的地物反射率光谱曲线如图4b所示,原位测得光谱曲线如图4c所示。其中,图4b在1400 nm和1900 nm波长位置,由于水汽吸收对光谱的影响,造成了谱线不连贯,

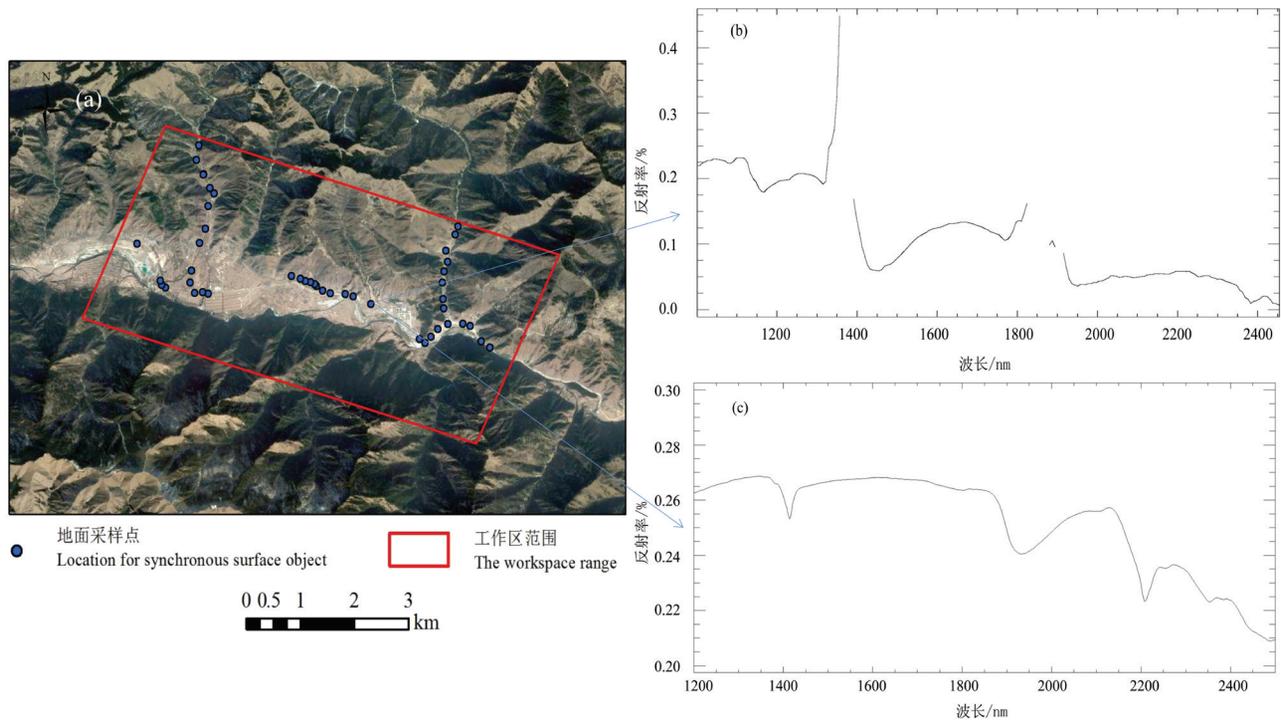


图4 工作区地面采样点位置(a)和高光谱影像反演的同位地物反射率光谱曲线(b)及ASD测得的地物曲线(c)

Fig.4 The schematic diagram of the location for synchronous surface object spectrum measurement(a), the processed hyperspectral image spectrum(b) and the ASD synchronous spectrum (c)

2350 nm处的吸收峰表明有灰岩存在。比较和分析两幅光谱曲线谱图表明:基于高光谱影像反演的光谱曲线与原位实测光谱曲线波形吻合,两条光谱走向趋势与吸收特征基本趋于一致,实测光谱曲线反射率值分布区间大于图像光谱,这是由于机载高光谱成像仪接收到太阳辐射远小于地面光谱仪造成的,符合实际情况。证明机载高光谱获取的地物光谱信息是真实且准确的,对于后续地物信息提取了保障。

### 3 光谱数据处理与信息提取

高光谱影像数据处理及地质岩性解译技术流程如图5所示。

#### 3.1 高光谱影像数据处理

飞行获取高光谱数据处理主要包括辐射校正和辐射定标、大气校正和光谱重建、逐航带几何校正和无缝拼接制图等(Bierwirth et al., 2002; 刘康等, 2020)。首先采用ENVI软件对所获取的各航带原始DN值去除数据坏线和条带,其次进行单航带影像系统的辐射定标处理,生成单航带辐亮度数据;利用IMU姿态数据和GPS数据,基于工作区的DEM数据,对各航带进行几何校正和地理编码;在

保留图像数据整体灰度特征、纹理特征的基础上,通过选择与之匹配的模型,消除太阳高度角和BRDF影响,调整灰阶,实现不同航带图像的拼接;最后通过FLAASH大气校正模型对数据进行反射率反演,得到全区的反射率数据(武复宇等, 2020; 刘银年, 2021)。处理后得到的高光谱反射率影像很清晰,几何畸变较小,如图6所示。

#### 3.2 地质岩性解译

高光谱影像岩性解译工作基于高光谱反射率数据,进行光谱波段重采样、植被、水体掩膜、光谱数据归一化、MNF最小噪声分离变换、AI羟基提取、碳酸根提取等处理。

##### 3.2.1 光谱波段重采样

岩矿的光谱特征主要分布在2000~2500 nm范围内,岩性分析基于矿物光谱特征。本次获取的高光谱数据光谱范围为1000~2500 nm,用ENVI软件将其光谱重采样,采样光谱范围为1915~2500 nm。

##### 3.2.2 植被、水体掩膜

高光谱遥感影像不具有穿透性,进行岩性分析需要直接照射岩石露头。植被的光谱特征在400~1000 nm范围内,水体的反射率很低,影像中阴影区

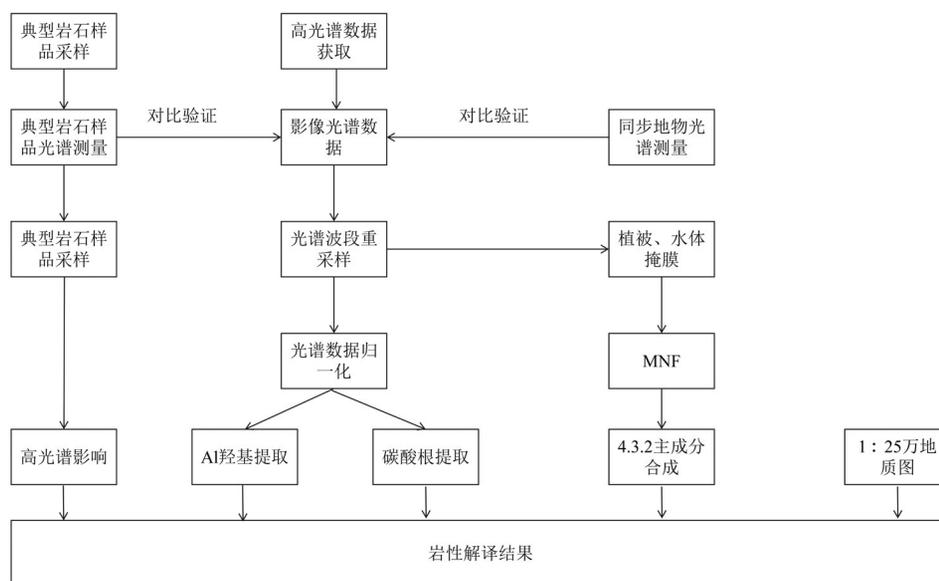


图5 高光谱影像数据处理及岩性解释流程

Fig.5 Hyperspectral image data processing and lithology interpretation process

域由于太阳光强度差,造成反射率极低,并且信、噪比较低,不适合做光谱特征提取(徐明钻,2021;倪斌,2023)。可用ENVI软件将影像中的植被、河流、阴影区域等噪声信息划为ROI,制作掩膜,将噪声信息掩盖,之后剔除,使之不参与光谱计算。通过之前对植被农田的光谱测试及影像特征,确定图像分割与掩膜的合理阈值,其结果如图7所示。

### 3.2.3 光谱数据归一化

高光谱数据经FLAASH大气校正后,得到地物反射率数据。但一些区域由于反射率值很低,经FLAASH模型计算后,其值为负,用波段运算的方法将影像中反射率小于0的值全部归为0值,然后去除包络线。包络线消除可以有效突出光谱曲线的吸收、反射和发射特征,并将其归一到一个一致

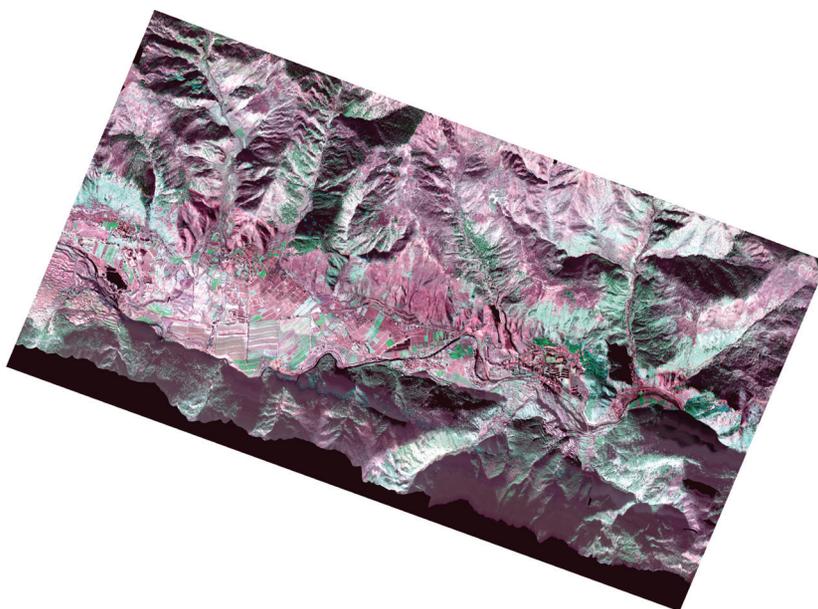


图6 工作区高光谱反射率影像(RGB-79-16-49)

Fig.6 Hyperspectral imaging data(RGB-79-16-49)

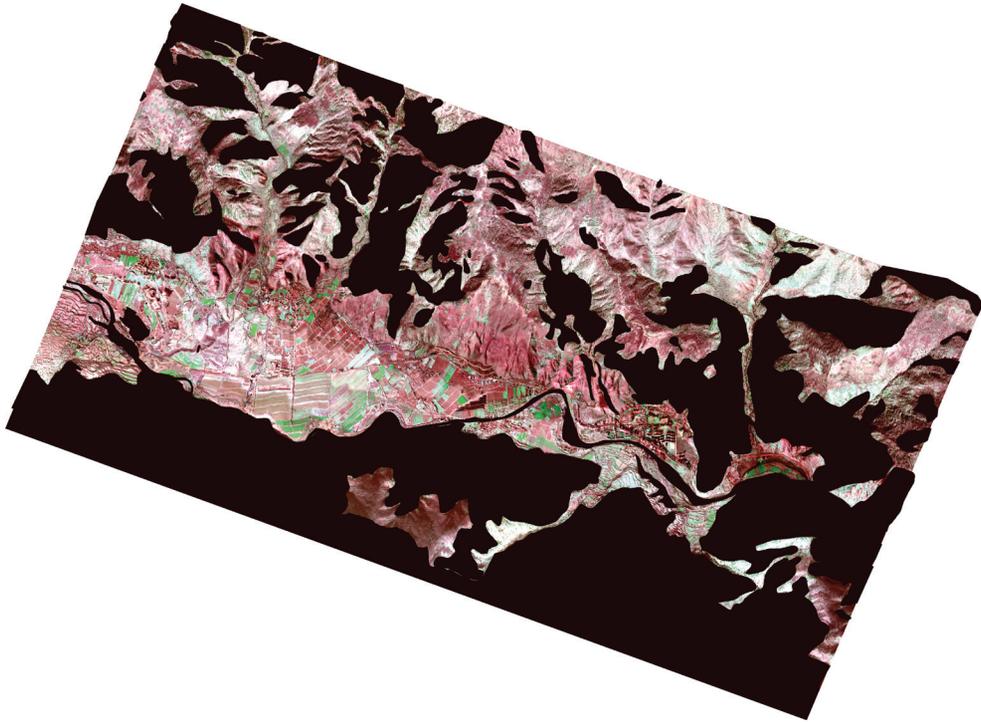


图7 植被、水体、阴影掩膜后数据示意图

Fig.7 Schematic diagram of vegetation, water and shadow mask

的光谱背景上,其值全部在0~1,有利于和其他光谱曲线进行特征数值的比较。

#### 3.2.4 最小噪声分离变换(MNF)

目前常用的图像增强方法主要有主成分分析(PCA)和最小噪声分离(MNF)。但PCA变换对噪声比较敏感,即信息量的主成分分量,信噪比不一定高,当某个信息量的主成分中包含的噪声的方差大于信号的方差时,该主成分分量形成的图像质量就差。而MNF本质上是2次层叠的主成分变换。第1次变换(基于估计的噪声协方差矩阵)用于分离和重新调节数据中的噪声,这步操作使变换后的噪声数据只有最小的方差并且没有波段间的相关。第2次是对噪声白化数据(Noise-whiten)的标准主成分变换(Wu, 2020)。因此本文中采取了MNF变换方法对影像进行增强处理。变换后的MNF波段1代表整个波段的亮度背景,即光谱背景,在影像上都较其他的MNF波段亮;岩矿地质体的光谱信息集中在第2~6波段,影像十分清晰,但噪声也逐渐出现;第7波段的空间地形等纹理十分清晰,但开始明显出现系统噪声;第10波段以后出现随即噪声,淹没地质体光谱信息及其空间信息。在MNF变换中,通过信号与噪声分离,使信息更加集

中在有限的特征集中,一些微弱信息则在去噪转化中被增强。同时在MNF转化过程中,使光谱特征向类特征向量汇集,增强分类信息。工作区高光谱数据MNF变换后4、3、2波段合成结果如图8所示。

图8中东西向可以明显看出,有两条颜色为红色的带状区域。这些是山谷,经野外实地验证,山谷中全部为土路,岩壁较陡峭,基本被第四系黄土覆盖,偶有岩石露头。红色区域光谱无明显特征(图9),结合影像及野外实地调查结果,推断为第四系黄土。图8中南北向可以明显看出,实验区大体可以分为三个带:北部颜色较单一,为冷色调绿色、蓝绿色,结合光谱分析及野外实地采样推断,北部为大面积的板岩,在2200 nm处有光谱特征峰(图10);中部颜色嘈杂,以暖色调红色、紫色为主,有少量橘红、黄色、暖绿色,从影像中可以看出,此地大多为人工开发的草场或耕地。裸露的土壤和稀疏的草地分布在图像中部,导致颜色较多,光谱无明显特点(图9),结合野外实地调查,推断此带为第四系黄土;南部白龙江以南部分,90%被茂密植被覆盖,地形陡峭,影像中有很小区域有岩石露头,露头部有蓝色、绿蓝色及少量红色,由于现场实地调查过程中,此区域为大片保护林,很少有岩石露头,并

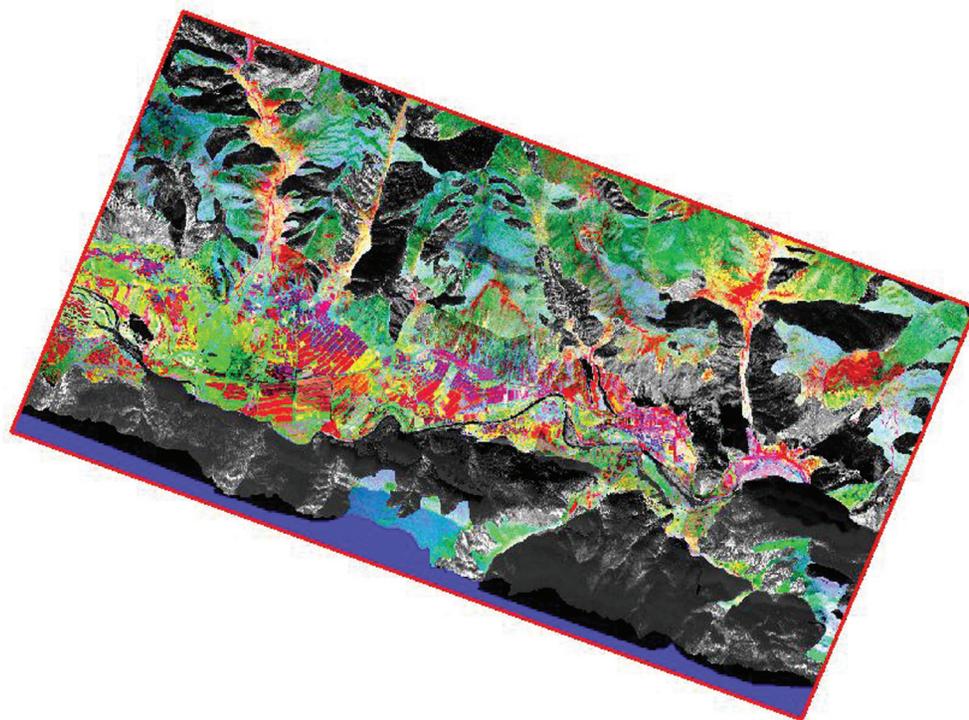


图8 MNF最小噪声分离4、3、2波段合成图

Fig.8 The synthesis results of bands 4, 3 and 2 after MNF transformation

且山体陡峭,没有采集到岩石样本,根据2235 nm处的光谱吸收特征峰(图11),推断南部绝大部分为灰岩。在图中东北部有一处红色区域,无明显光谱特征,分析推断为第四系黄土。

### 3.2.5 Al羟基及碳酸根提取

从上述分析中,可知工作区内主要以灰岩、板岩和第四系黄土覆盖层构成。通过提取铝羟基光谱特征可初步判断板岩分布情况;通过提取碳酸根光谱特征可初步判定灰岩分布情况;第四系黄土覆盖层无明显光谱特征。利用波段比值法分别提取Al羟基和碳酸根的光谱特征,深度提取示意图如图10:图中

从红色到蓝色,分别代表了像元光谱含Al羟基和碳酸根置信度的由高至低。从图10a中可以看出,整个图面绝大部分为绿色,有少量黄、红色斑块零星分布于图中。从图10b中可以看出,整个图面绝大部分为蓝色,有少量绿、黄、红色斑块零星分布于图中。结合实地调查来看,出现这种情况很可能是因为地表被第四系黄土或矮短植被覆盖,岩石露头较少导致的。图中的红色斑块分别为含Al羟基和含碳酸根矿物置信度较高区域,可以判定其岩性为板岩和灰岩。

综合高光谱影像、光谱曲线、MNF合成结果、波

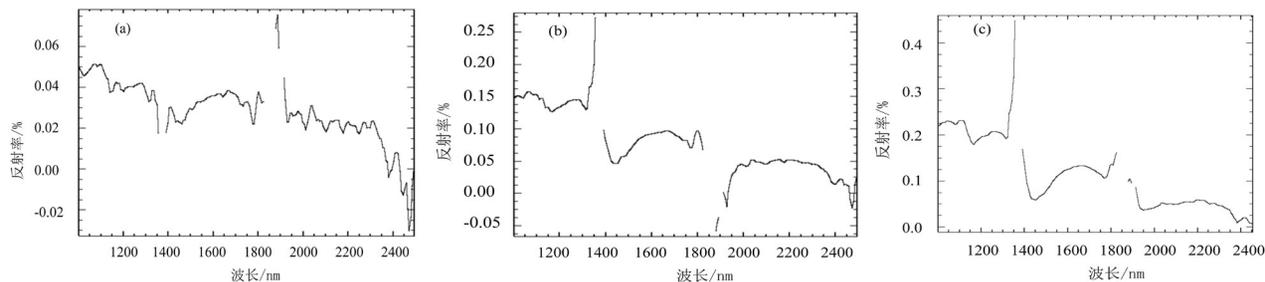


图9 高光谱影像反射率的黄土光谱曲线(a)、板岩光谱曲线(b)和灰岩光谱特征(c)

Fig.9 Spectral characteristics of quaternary loess(a), slate (b) and limestone(c) based on reflectance of hyperspectral images,

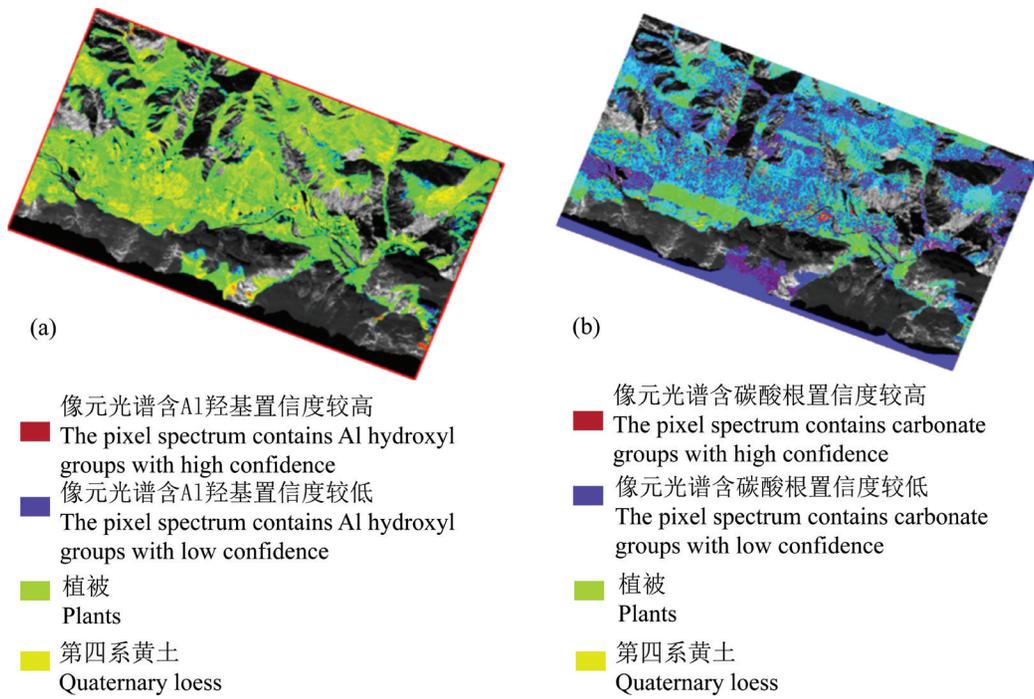


图 10 Al 羟基深度提取示意图(a)和碳酸根深度提取示意图(b)  
Fig.10 Schematic diagram of Al hydroxyl (a), and carbonate depth extraction(b)

段比值法的提取结果,进行岩性分析,得到工作区高光谱岩性解译图(图 11)。

#### 4 讨论

在本次研究中,利用 SWIR 高光谱成像系统搭

载直升飞机在位于迭部县的工作区进行遥感探测,同时采用 ASD 同步测量工作区的地面标志物,建立工作区典型地物光谱库。由于工作区植被覆盖率高,遮挡了岩石露头,对遥感地质解译的影响较大。航飞时间没有选择在太阳辐射强度最高的季

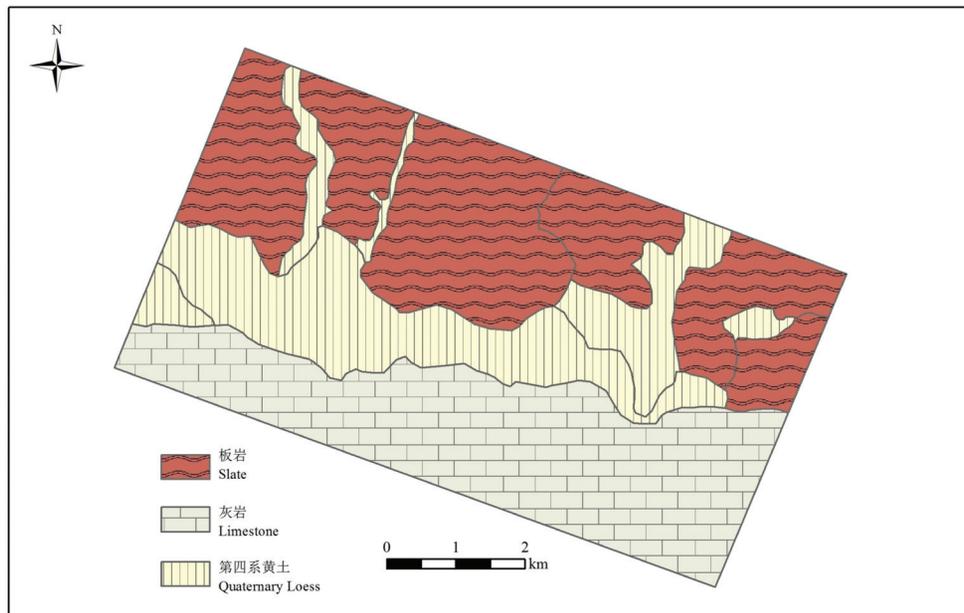


图 11 迭部地区高光谱岩性解译图  
Fig.11 Schematic diagram of lithological interpretation in Diebu area

节,光谱仪获取的能量不够高,一定程度上降低了信噪比,影响了地物光谱特征信息的获取。此次研究的目的是验证自主研发的SWIR高光谱成像仪在水利勘查中的遥感应用,第一次进行野外遥感调查,在经验不足的前提下,取得了尚且不错的解译效果。相信随着设备的不断优化以及后续数据处理技术的日趋完善,可以提取更多关于地质构造断层的信息,结合岩性与岩石的工程稳定性,以期为水利工程提供材料支撑与选址参考。

## 5 结 论

中水北方勘测设计研究院项目组首次利用中国地质调查局南京地质调查中心自主研发的SSMAP-II小型机载高光谱成像系统对甘南藏族自治州迭部县工作区进行高光谱遥感对地探测,飞行面积达46 km<sup>2</sup>,同时对地面标志物进行光谱采样测量;对获取的高光谱影像数据进行辐射校正和辐射定标、大气校正和光谱重建、逐航带几何校正,绘制无缝拼接的工作区影像图幅;综合高光谱影像、光谱曲线、MNF最小噪声分离波段合成结果、波段比值法的提取结果,进行地质岩性解译,解译的结果与已知区域地质图岩性分布一致,以白龙江为界,以北大部分为板岩及第四系黄土,以南则大部分为灰岩。这项研究表明,国产高光谱成像仪具有较高的可靠性与实用性。通过机载高光谱遥感的手段进行的岩性解译精确度高,可以极大的提高水利工程地质勘探的工作效率,在高质量完成高山峡谷区险要地形区地质勘察的同时保证了地质工作人员的人身安全。通过高光谱影像与同步地物测量相结合的方式,快速开展大面积的岩性解译工作,节省大量的财力物力。相对于传统的地质调查方式,这种方法更加方便快捷,既减轻了工作人员繁重的工作量,又提高了工程前期地质勘查工作的效率,满足了工程项目时间紧任务重的要求。

## References

Bai Yu, Zheng Zhizhong, Xiu Liancun. 2022. UAV hyperspectral remote sensing technology and its application progress in natural resources survey[J]. *East China Geology*, 43(4): 527–538 (in Chinese with English abstract).

Berger B R, King T V V, Morath L C, Phillips J D. 2003. Utility of high-altitude infrared spectral data in mineral exploration:

Application to northern Patagonia Mountains, Arizona[J]. *Economic Geology*, 98(5): 1003–1018.

Bierwirth P, Huston D, Blewett R. 2002. Hyperspectral mapping of mineral assemblages associated with gold mineralization in the central Pilbara[J]. *Western Australia Economic Geology*, 97: 819–826.

Campbell J B. 2010. Introduction to remote sensing[J]. *Photogrammetric Record*, 18(103): 259–259.

Dong Xinfeng, Gan Puping, Li Na, Yan Bokun, Zhang Lei, Zhao Jiaqi, Yu Junchuan, Liu Rongyuan, Ma Yanni. 2020. Fine mineral identification of GF-5 hyperspectral image[J]. *Journal of Remote Sensing*, 24(4): 454–464(in Chinese with English abstract).

Du Peijun, Bai Xuyu, Luo Jieqiong. 2018. Advances of urban remote sensing[J]. *Journal of Nanjing University of Information Science & Technology*, (1): 16–29 (in Chinese with English abstract).

Du Peijun, Xia Junshi, Xun Chaohui, Tan Kun, Su Hongjun, Bao Rui. 2016. Review of hyperspectral remote sensing image classification[J]. *Journal of Remote Sensing*, 20(2): 236–256(in Chinese with English abstract).

Gan Puping, Wang Runsheng. 2004. Study on Basic and Technical Methods of Extracting Information from Remote Sensing on Rocks [M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).

Govender M, Chetty K, Bulcock H. 2007. A review of hyperspectral remote sensing and its application in vegetation and water resource studies[J]. *Water S A*, 33(2): 145–151.

Jiang Tingxuan. 2018. Development and application of hyperspectral remote sensing technology in geology[J]. *World Nonferrous Metals*, 515(23): 254–255(in Chinese with English abstract).

Liu Kang, Zhou Zhuang, Li Shengyang, Liu Yunfei, Wan Xue, Liu Zhiwen, Tan Hong, Zhang Wanfeng. 2020. Scene classification dataset using the Tiangong-1 hyperspectral remote sensing imagery and its applications[J]. *Journal of Remote Sensing*, 24(9): 1077–1087 (in Chinese with English abstract).

Liu Yinnian. 2021. Development of hyperspectral imaging remote sensing technology[J]. *Journal of Remote Sensing*, 25(1): 439–459 (in Chinese with English abstract).

Ni Bin, Huang Zhaoqiang, Guo Jian. 2023. Identification of altered mineral information in the Wuyishan metallogenic belt based on airborne and spaceborne hyperspectral remote sensing[J]. *East China Geology*, 44(1): 67–81 (in Chinese with English abstract).

Petrov D V, Zhuzhulina E A. 2021. Spectral dependence of Quasi-Rayleigh polarization leap of nonspherical particles: Polystyrene beads application[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 41(2): 654–657.

Wang Denghong, Zhao Zhi, Yu Yang, Dai Jingjing, Deng Maochun, Zhao Ting, Liu Lijun. 2018. Exploration and research progress on ion-adsorption type REE deposit in South China[J]. *China Geology*, 1: 415–424.

Wang Runsheng, Gan Puping, Yan Bokun. 2010. Hyperspectral mineral mapping and its application[J]. *Remote Sensing for Land*

- & Resources, (1): 1–13 (in Chinese with English abstract).
- Wang Runsheng, Xiong Shengqing, Nie Hongfeng. 2011. Remote sensing technology and its application in geological exploration[J]. Acta Geologica Sinica, 85(11): 1699–1743(in Chinese with English abstract).
- Wei Guihua, Xiao Liang, Zheng Zhizhong. 2019. Auto-focusing method of push-broom hyperspectral camera[J]. Optics and Precision Engineering, 27(2): 185–192 (in Chinese with English abstract).
- Wu Fuyu, Wang Xue, Ding Jianwei, Du Peijun, Tan Kun. 2020. Improved cascade forest deep learning model for hyperspectral imagery classification[J]. Journal of Remote Sensing, 24(4): 439–453 (in Chinese with English abstract).
- Wu Zhonghai, Zhou Chunjing, Huang Xiaolong, Zhao Genmo, Tan Chengxuan. 2020. Main active faults and seismic activity along the Yangtze River Economic Belt: Based on remote sensing geological survey[J]. China Geology, 3: 314–338.
- Xu Mingzuan, Liang Sen, Shi Jianlong. 2021. Airborne hyperspectral inversion of heavy metal distribution in cultivated soil: A case study of the Guanhe area, north Jiangsu Province[J]. East China Geology, 42(1): 100–107.
- Zhang Da, Zheng Yuquan. 2013. Hyperspectral remote sensing and its development and application review[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 11(3): 72–78 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Ka, Sheng Yehua, Zhang Shubi. 2004. Some progresses and applications of new technologies in remote sensing[J]. Remote Sensing Information, (2): 58–62 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhonghui, Wang Runsheng. 2000. Imaging spectrometer remote sensing methodological technology and its application based on spectroscopy[J]. Remote Sensing Forland & Resources, 12(3): 16–37 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Zhizhong, Yang Zhong, Qin Yuantian, Wang Ligu. 2020a. Structure analysis and experiment of an offner-type short-wave infrared imaging spectrometer[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 57(5): 246–255 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Zhizhong, Yang Zhong, Xiu Liancun. 2020b. A lock-in amplifier applied to the measurement of weak spectral signals[J]. Modern Scientific Instruments, (2): 5–10(in Chinese with English abstract).
- Zheng Zhizhong, Yang Zhong, Xiu Liancun. 2020c. Development and application of shortwave infrared convex blazed grating with high diffraction efficiency[J]. Acta Optica Sinica, 40(12): 1205002 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Zhizhong, Yang Zhong, Xiu Liancun, Dong Jinxin, Chen Chunxia, Gao Yang. 2017. Design of a SWIR offner imaging spectrometer[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 37(7): 2267–2272 (in Chinese with English abstract).

## 附中文参考文献

- 白宇, 郑志忠, 修连存. 2022. 无人机高光谱遥感技术在自然资源调查中的应用进展[J]. 华东地质, 43(4): 527–538.
- 董新丰, 甘甫平, 李娜, 闫柏琨, 张磊, 赵佳琪, 于峻川, 刘镛源, 马燕妮. 2020. 高分五号高光谱影像矿物精细识别[J]. 遥感学报, 24(4): 454–464.
- 杜培军, 白旭宇, 罗洁琼. 2018. 城市遥感研究进展[J]. 南京信息工程大学学报, (1): 16–29.
- 杜培军, 夏俊士, 薛朝辉, 谭琨, 苏红军, 鲍蕊. 2016. 高光谱遥感影像分类研究进展[J]. 遥感学报, 20(2): 236–256.
- 甘甫平, 王润生. 2004. 遥感岩矿信息提取基础与技术方法研究[M]. 北京: 地质出版社.
- 姜廷轩. 2018. 高光谱遥感技术在地质领域的发展与应用概况[J]. 世界有色金属, 515(23): 254–255.
- 刘康, 周壮, 李盛阳, 刘云飞, 万雪, 刘志文, 谭洪, 张万峰. 2020. 天宫一号高光谱遥感场景分类数据集及应用[J]. 遥感学报, 24(9): 1077–1087.
- 刘银年. 2021. 高光谱成像遥感载荷技术的现状与发展[J]. 遥感学报, 25(1): 439–459.
- 倪斌, 黄照强, 郭健. 2023. 基于机载和星载高光谱遥感的武夷山成矿带蚀变矿物信息识别研究[J]. 华东地质, 44(1): 67–81.
- 王润生, 甘甫平, 闫柏琨. 2010. 高光谱矿物填图技术与应用研究[J]. 国土资源遥感, (1): 1–13.
- 王润生, 熊盛青, 聂洪峰. 2011. 遥感地质勘查技术与应用研究[J]. 地质学报, 85(11): 1699–1743.
- 魏桂华, 肖亮, 郑志忠. 2019. 推扫式高光谱相机自动调焦[J]. 光学精密工程, 27(2): 185–192.
- 武复宇, 王雪, 丁建伟, 杜培军, 谭琨. 2020. 高光谱遥感影像多级森林深度网络分类算法[J]. 遥感学报, 24(4): 439–453.
- 徐明钻, 梁森, 石剑龙. 2021. 航空高光谱反演耕地土壤重金属分布特征——以苏北灌河地区为例[J]. 华东地质, 42(1): 100–107.
- 张达, 郑玉权. 2013. 高光谱遥感的发展与应用[J]. 光学与光电技术, (3): 72–78.
- 张卡, 盛业华, 张书毕. 2004. 遥感新技术的若干进展及其应用[J]. 遥感信息, (2): 58–62.
- 张宗贵, 王润生. 2000. 基于谱学的成像光谱遥感技术发展与应用[J]. 国土资源遥感, 12(3): 16–37.
- 郑志忠, 杨忠, 秦远田, 王立国. 2020a. Offner型短波红外成像光谱仪的结构分析与实验[J]. 激光与光电子学进展, 57(5): 246–255.
- 郑志忠, 杨忠, 修连存. 2020b. 一种应用于弱光谱信号测量的锁相放大器[J]. 现代科学仪器, (2): 5–10.
- 郑志忠, 杨忠, 修连存. 2020c. 高衍射效率短波红外凸面闪耀光栅的研制与应用[J]. 光学学报, 40(12): 1205002.
- 郑志忠, 杨忠, 修连存, 董金鑫, 陈春霞, 高扬, 俞正奎. 2017. 一种Offner型小型短波红外成像光谱仪[J]. 光谱学与光谱分析, 37(7): 2267–2272.