

doi: 10.12029/gc20210502

修连存, 郑志忠, 杨彬, 殷靛, 高扬, 姜月华, 黄岩, 周权平, 石剑龙, 董金鑫, 陈春霞, 梁森, 俞正奎. 2021. 机载高光谱成像技术在长江经济带苏、皖、浙地区生态环境保护中的应用[J]. 中国地质, 48(5): 1334–1356.

Xiu Liancun, Zheng Zhizhong, Yang Bin, Yin Liang, Gao Yang, Jiang Yuehua, Huang Yan, Zhou Quanping, Shi Jianlong, Dong Jinxin, Chen Chunxia, Liang Sen, Yu Zhengkui. 2021. Application of airborne hyperspectral imaging technology to the ecological environment protection of Jiangsu, Anhui and Zhejiang Provinces at Yangtze River Economic Belt[J]. Geology in China, 48(5): 1334–1356(in Chinese with English abstract).

## 机载高光谱成像技术在长江经济带苏、皖、浙地区生态环境保护中的应用

修连存<sup>1,2</sup>, 郑志忠<sup>1,2</sup>, 杨彬<sup>1,2</sup>, 殷靛<sup>1,2</sup>, 高扬<sup>1,2</sup>, 姜月华<sup>1,3</sup>, 黄岩<sup>4</sup>, 周权平<sup>1,3</sup>, 石剑龙<sup>4</sup>,  
董金鑫<sup>1,2</sup>, 陈春霞<sup>1,2</sup>, 梁森<sup>4</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. 江苏光谱成像与智能感知重点实验室, 江苏 南京 210094; 3. 自然资源部流域生态地质过程重点实验室, 江苏 南京 210016; 4. 江苏省地质勘查技术院, 江苏 南京 210049;)

**摘要:**机载高光谱成像是一种快速、无损的检测技术,具有光谱分辨率高、波段窄而多和图谱合一的特点。国内小型化的机载高光谱成像仪主要依赖进口,价格昂贵,且高性能的高光谱设备进口困难,限制了高光谱技术在国内的推广和普及。中国地质调查局南京地质调查中心在国家重大仪器开发专项和国家重点研发计划支持下,成功研制出以推扫式小型化成像光谱仪 HMS400/1000 为核心的轻型机载高光谱成像系统 SSMaP,建立了机载高光谱遥感综合调查技术方法和作业流程,形成了一套可靠的地物分类方法和水土污染光谱定量反演模型。本文在介绍机载高光谱成像技术基本原理和分析国内外研究现状的基础上,以自主研发的机载高光谱成像系统 SSMaP 为例,结合长江经济带生态环境的需求,详细探讨了总面积 4500 余 km<sup>2</sup> 的航空高光谱遥感作业方法、信息提取与调查应用。通过长江经济带江苏、安徽、浙江等地区的生态环境地质调查应用示范,取得了高质量机载遥感数据,获得了一批重要调查成果。研究表明,机载高光谱成像技术在生态环境调查、水体监测、土地利用和土地质量评价等方面具广阔应用前景。具有自主知识产权的国产化机载高光谱成像仪降低了采购成本,推动了机载高光谱技术普及,服务了国家重大区域发展战略,具有显著的经济和社会效益。

**关键词:**机载高光谱成像;遥感;生态环境调查;地质调查应用;矿产勘查工程;水文地质工程;长江经济带;江苏;安徽;浙江

中图分类号: X87 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2021)05-1334-23

## Application of airborne hyperspectral imaging technology to the ecological environment protection of Jiangsu, Anhui and Zhejiang Provinces at Yangtze River Economic Belt

XIU Liancun<sup>1,2</sup>, ZHENG Zhizhong<sup>1,2</sup>, YANG Bin<sup>1,2</sup>, YIN Liang<sup>1,2</sup>, GAO Yang<sup>1,2</sup>, JIANG Yuehua<sup>1,3</sup>,

收稿日期: 2021-03-17; 改回日期: 2021-05-26

基金项目: 中国地质调查局项目“高速高灵敏度光谱成像理论技术与仪器研制”(BK20192003)资助。

作者简介: 修连存,男,1962年生,研究员,博士生导师,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: 598575276@qq.com。

通讯作者: 高扬,女,1989年生,硕士,工程师,地球探测与信息技术专业; E-mail: coco\_rocha1900@126.com。

HUANG Yan<sup>4</sup>, ZHOU Quanping<sup>1,3</sup>, SHI Jianlong<sup>4</sup>, DONG Jinxin<sup>1,2</sup>,  
CHEN Chunxia<sup>1,2</sup>, LIANG Sen<sup>4</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. *Key Laboratory of Watershed Eco-Geological Processes, Ministry of Natural Resources, Nanjing 210016, Jiangsu, China*; 4. *Geological Exploration Technology Institute of Jiangsu Province, Nanjing, 210049, Jiangsu China*)

**Abstract:** Airborne hyperspectral imaging is a fast and non-destructive detection technology, which has the characteristics of high spectral resolution, narrow and multiple bands and combination of spectrum and images. Domestic miniaturized airborne hyperspectral imagers mainly rely on importing, which are expensive. Moreover, it is difficult to import high-performance hyperspectral equipment, which restricts the promotion and popularization of hyperspectral technology in China. With the support of the national major instrument development project and the national key research and development plan, Nanjing Center for China Geological Survey successfully developed the light airborne hyperspectral imaging system SSMaP with the push-broom miniaturized imaging spectrometer HMS400/1000 as the core components, and established the airborne hyperspectral remote sensing comprehensive survey technology methods and operation process, as well as formed a set of reliable ground object classification methods and spectrum quantitative inversion models of water and soil pollution. Based on the introduction of the basic principle of airborne hyperspectral imaging technology and the analysis of research status at home and abroad, taking the self-developed airborne hyperspectral imaging system SSMaP as an example, combined with the requirements of the ecological environment in the Yangtze River Economic Belt, the operation methods, information extraction and investigation application of aerial hyperspectral remote sensing covering an area of 4500 km<sup>2</sup> are discussed in detail. Through the demonstration of eco-environmental geological survey in Jiangsu, Anhui, Zhejiang and other regions of the Yangtze River Economic Belt, high quality airborne remote sensing data has been obtained, and a number of important survey results have been obtained. The results show that airborne hyperspectral imaging technology has broad application prospects in ecological environment investigation, water monitoring, land use and land quality evaluation. The home-made airborne hyperspectral imager with independent intellectual property rights reduces the procurement cost, promotes the popularization of airborne hyperspectral technology, serves the national major regional development strategy, and has significant economic and social benefits.

**Key words:** airborne hyperspectral imaging; remote sensing; ecological environment survey; geological survey application; mineral exploration engineering; hydrogeological engineering; Yangtze River Economic Zone; Jiangsu; Anhui; Zhejiang

**About the first author:** XIU Liancun, male, born in 1962, senior researcher, doctoral supervisor, engaged in the research and development of spectral detection geological instruments and the application of hyperspectral technology in the field of geology; E-mail: 598575276@qq.com.

**About the corresponding author:** GAO Yang, female, born in 1989, master, engineer, majors in earth exploration and information technology; E-mail: coco\_rocha1900@126.com.

**Fund support:** Supported by the project of High-speed and high-sensitivity spectral imaging theoretical technology research and instrument development (No. BK20192003).

## 1 引言

机载高光谱成像是一种新兴技术,它是一种快速、无损的检测技术,具有光谱分辨率高、波段多和图谱合一的特点。自从1982年美国航天局喷气推进实验室(Jet Propulsion Laboratory, JPL)研制出第一台机载成像光谱仪(AIS-1)并获取遥感飞行数据

以来,高光谱遥感的出现为遥感技术带来一场革命。而后包括中国在内的许多国家都研制成功了一系列高光谱遥感设备,开展对地观测和空间目标探测任务,搭载于卫星平台、车载平台(月球车、火星车等)和航空平台。进入21世纪以来,机载高光谱应用发展出现井喷态势,高光谱仪器性能的提高、功能的日益完善和高光谱数据快速、准确、自动

化的分析处理,使得机载高光谱日益得到行业重视,广泛应用于地质调查、环境监测、精准农业、海洋观测、土地质量和城市规划等领域(张宗贵等,2000;甘甫平,2004;王润生等,2010)。

作为光谱细分遥感成像技术,光谱成像仪研制朝着高光谱、高空间分辨率和微型化轻量化发展。目前国外商业化的光谱成像仪有3种:光机扫描型、推扫型和凝视型(郑志忠等,2017;郑志忠等,2020a,b)。以澳大利亚的HyMap为代表的光机扫描型机载成像仪,成为国内外高光谱行业应用的主打仪器。推扫型成像光谱仪有加拿大的CASI,芬兰的SPECIM、挪威的AISA和美国的Headwall成像光谱仪(郑志忠等,2020b,c)。凝视型成像光谱仪有美国CRI的液晶可调谐成像光谱仪Varispec。国内小型化的机载高光谱仪器依赖进口,价格昂贵,且高性能的高光谱设备进口困难,限制了高光谱技术在国内的普及和推广应用。

近些年来,在可见光-近红外(400~1000 nm)和短波红外(1000~2500 nm)波段范围的高光谱成像仪研制方面,国内取得长足进步,优势单位包括上海技术物理研究所、长春光机所和中国地质调查局南京地质调查中心等。从20世纪80年代开始,上海技物所研制出OMIS高光谱成像系统,深圳中达瑞和科技有限公司研制了液晶可调谐滤波器(LCTF),基于LCTC的成像光谱仪SHIS等。中国地质调查局南京地质调查中心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HMS400/1000为核心的轻型机载高光谱成像系统SSMap(魏桂华等,2019),已在江苏、安徽、浙江等地进行了生态地质环境调查应用示范,取得了高质量的机载遥感数据,获得了一批重要调查成果。

## 2 机载高光谱基本原理及其应用领域

### 2.1 基本原理

机载高光谱波段通常工作在400~2500 nm(0.4~2.5  $\mu\text{m}$ )范围内,由可见光和近红外两个谱段组成,可见光谱段为400~780 nm(0.4~0.78  $\mu\text{m}$ ),主要用于区分岩心颜色、植被、水体等;近红外光谱的波长在780~2500 nm(0.78~2.5  $\mu\text{m}$ ),主要用于区分含羟基的物质,对此波段的近红外光谱产生吸收的官能团主要是含氢基团,包括C-H(甲基、亚甲基、甲氧基、

羧基、方基等)、羟基O-H、巯基S-H、氨基N-H等,它们的合频和一级倍频位于780~2500 nm波段。由于含有羟基物质晶格中原子间的化学键的弯曲、伸缩和电子能级跃迁吸收某些区域的近红外光谱,所以根据某些官能团的在近红外区域的这种特征吸收光谱可以区分不同的物质(修连存等,2007)。

### 2.2 应用领域

随着机载高光谱遥感技术的发展,数据处理方法成熟,广泛应用于地质调查、环境监测、海洋生态评价、土地质量评估、精准农业、林业生态和城市规划领域(Berger et al.,2003)。在地质调查领域中,利用机载高光谱遥感具有空间分辨率高,能够精确反映地物目标这一特质,可以区分层状硅酸盐中单矿物(黏土矿物,绿泥石,蛇纹石等),含羟基之硅酸盐矿物(绿帘石,闪石等),硫酸盐矿物(明矾石,黄铁钾矾,石膏等),碳酸盐矿物(方解石,白云石等);而矿物种类揭示矿化作用过程中热液蚀变体系结晶时的温度、压力和化学环境,矿物中的离子交换反映在羟基的波长移动上,矿物的含量反映在羟基的吸光度上,这些参数揭示地质事件和成矿规律(修连存等,2009)。在环境监测领域,可迅速识别植物、建筑、水质、道路、湿地、土壤等分布与面积,通过建模,评价水土环境质量、农田作物长势和病虫害等。

高光谱遥感具有图谱合一的特点(图1),避免了以往航摄带来的弊端,它不仅能够用图像表达目标,还可以根据光谱识别目标,利用高光谱遥感技术,能够高效地对长江经济带生态环境、经济发展和城镇布局进行评价,为政府规划和治理提供技术服务。

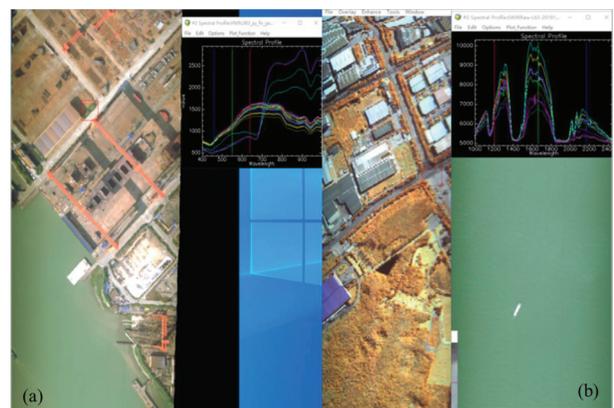


图1 VNIR(a)和SWIR(b)光谱数据  
Fig.1 Spectra data of VNIR(a) and SWIR(b)

### 3 机载高光谱成像系统 SSMaP 研发及参数指标

#### 3.1 系统研发

SSMaP 采用中国地质调查局南京地质调查中心自主研发的 VRIN 可见光-近红外高光谱成像仪与 SWIR 短波红外高光谱成像仪(图2)进行机载航空高光谱测量系统集成(图3~图5),并研发了配套的软件对机载高光谱遥感数据进行预处理与信息提取。

系统由成像光谱仪、三轴稳定平台、惯性导航仪和计算机控制与采集模块等多个部分组成。

#### 3.2 主要技术参数

机载高光谱成像仪系统参数如表1和表2所示。

#### 3.3 数据处理软件研发

机载高光谱数据具有数据量大、处理过程复杂等特点,因此需要高性能的服务器电脑和专业的处理软件。硬件部分由多台高性能戴尔服务器电脑组成的运算系统,其服务器操作系统性能稳定,计算能力强,使数据处理工作得到了可靠保障。机载高光谱数据处理采用 NovAtel 的 IE8.8 软件进行 Pos 数据后差分解算,采用自主研发的 HyperPic 软件进行光谱数据处理,包括飞行规划、大气校正、几何校正、辐射定标和反射率反演等功能(Bierwirth et al., 2002)。

## 4 机载高光谱数据采集流程与方法

#### 4.1 系统安装及检查

飞行前将仪器设备安装在固定翼飞机、直升机或者无人机等平台上。检查系统外观是否有意有磕、碰和摔等情况。检查测量系统及其配套设备、地面测量基站等工作状态是否正常,确保系统各个



图2 VNIR 可见光-近红外及 SWIR 短波红外成像光谱仪  
Fig.2 Visible-near-infrared and short-wave infrared imaging spectrometer

部分组装牢固安全。电源、电缆连接正确无误,各仪器设备读数正常。进行光谱成像仪的数据采集测试,保证设备工作正常。进行惯性导航仪检查,确保 GPS 导航定位接收信号良好,通讯系统保持畅通。对系统进行干扰测试,保证数据收录正常。

#### 4.2 野外数据采集

航空数据采集作业流程包括现场踏勘、飞行准备、飞行测量和地物测量。

飞行前,工作小组需对测区边缘和测区内进行现场踏勘,熟悉测区的地形地貌,对于地形复杂不容易达到的测区,通过地形图进行了解,确定地面测量基站和像控点的布设选址。通过调研,确定最佳机场,制定应急迫降方案。

飞行准备包括:收集气象资料,了解适航天气;收集测区内的地图并扫描成电子版;地图裁切,输入角坐标,进行地图定位,作为飞行导航底图;由专业机组人员对飞机及成像系统进行飞行前例行检查,检查飞机安全状况,成像系统的各接口及仪器性能稳定性进行调试监测和评估。

在飞行测量中,飞机引擎启动后,接通电源,启动仪器设备,检查设备状态是否正常,并按照设计要求,设置相关技术参数。起飞后,打开镜头窗口遮挡板。进入测线前 2 km 开始记录数据,并于飞出测线 2 km 后停止记录数据,检查记录状态,监测仪器状态,根据信号强弱调整相关参数。操作人员

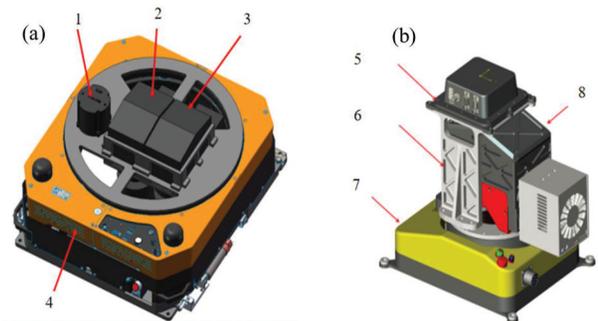


图3 有人机系统组成(a)和无人机系统组成(b)

1—姿态传感器;2—短波红外成像光谱仪;3—可见光成像光谱仪;  
4—稳定平台;5—诺瓦泰惯性导航仪;6—支撑架;7—三轴稳定平台;  
8—短波红外成像光谱仪

Fig.3 The composition of the manned vehicle system (a) and the composition of the UAV system (b)

1— Attitude sensor; 2— Short-wave infrared imaging spectrometer;  
3— Visible light imaging spectrometer; 4— Stable platform; 5— Novartis  
inertial navigator; 6— Support frame; 7— Three-axis stabilized platform;  
8— Short-wave infrared imaging spectrometer

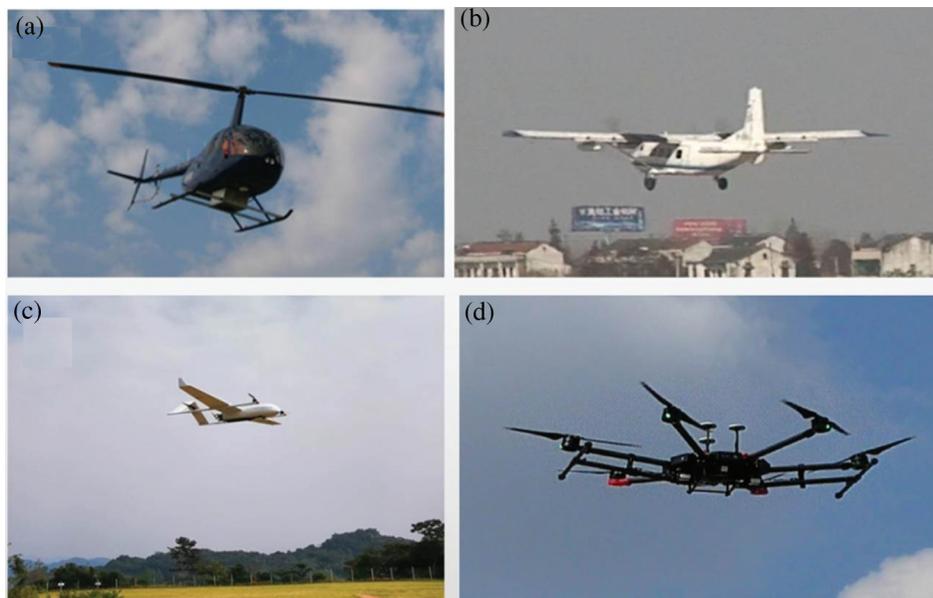


图4 直升机(a)运输机(b)固定翼无人机(c)和旋翼无人机(d)飞行平台

Fig.4 Helicopter (a) transport aircraft (b) fixed-wing UAV (c) and rotor UAV (d) flying platform

要时刻监测航迹、航高、航速是否符合要求,同时监测气象条件(云量、能见度),填写飞行记录表。如不符合设计要求,及时进行补飞,补飞按原设计要求进行。飞行结束后,根据机上定位设备的需要,在静止状态下收集满足定位要求的数据后,关闭仪器,备份数据,为下一架次测量存储做好准备。

地面数据的获取主要包括GPS地面基站测量、地面光谱采样、水样采集等三个部分,在航飞数据采集的同时,地面同步进行测量工作。

#### 4.3 GPS地面基站测量

使用地面卫星导航定位基站数据做后差分计算,在飞行前30 min打开地面基站,在卫星导航定

位基站搜索卫星成功后(至少8颗卫星),采用静态测量模式记录数据,数据记录频率高于1 Hz。飞行结束半小时后停止记录,关闭地面基站,导出基站数据并备份。

#### 4.4 光谱采样及采样点定位

地面光谱采样采用宽谱段地物波谱仪(350~2500 nm),采样点定位采用中海达iRTK2型号设备和江苏Cors定位系统,定位精度达厘米级。作业需要获取航空组规划好的飞行路线图,根据飞行路线图,设计地面定标路线。选择地面定标路线要求兼顾飞行路线条件与地面地物条件,每条航线范围内有至少一个地面采样点,每个采样点采样的地物种



图5 有人机平台安装(a)和无人机平台安装(b)

Fig.5 The installation of the manned vehicle system (a) and the UAV system (b)

表1 小型成像光谱仪参数

Table 1 Parameters of the small-size imaging spectrometer

光谱范围	400~1000 nm	1000~2500 nm
光谱分辨率	1.5~4 nm (12~25 μm狭缝)	8~12 nm (25 μm宽狭缝)
光谱通道	256~1152(可变)	280
空间通道	2048	384
镜头焦距	17 mm	16 mm
数据孔径	F/2.2	F/2.0
视场角	34°	34°
瞬时视场角(IFOV)	1.20 mrad	1.20 mrad
狭缝长度方向视场角	1.0 mrad	1.0 mrad
帧频	大于50 fps (2048×1152模式)	60
动态范围	93 db	69 db
像元大小	6.5 μm	25 μm
曝光时间范围	20 μs~10 ms	1 ms~10 min

类数量视具体情况确定,在确保时间足够的情况下,尽量多采地物光谱。在地面道路条件允许的情况下,尽量使定标路线垂直或近似垂直地斜交航线,保证每条航线地面采样时间与飞行时间相差不大。在符合以上基本条件的地面路线中,选取沿途地物种类丰富,房屋建筑物遮挡较少,便于采样作业的地面路线。飞行测量过程中,地面光谱采样工作同步进行,并记录采集点位置、时间和对应的架次及航带,测量完成后,备份光谱数据和定位数据(荆平等,2017;孙家波等,2018;蔡祥等,2021)。

表2 惯导定位精度参数

Table 2 The INS positioning accuracy parameters

中断时间	定位模式	位置精度/m/rms		速度精度/m/rms		姿态精度/度/rms		
		水平	垂直	水平	垂直	横滚	俯仰	方位
0s	单点	1	0.6	0.02	0.01	0.015	0.015	0.035
	后处理	0.01	0.02	0.02	0.02	0.015	0.015	0.015
10s	单点	1.15	0.7	0.04	0.03	0.02	0.02	0.045
	后处理	0.03	0.02	0.02	0.02	0.015	0.015	0.015
60s	单点	4.3	2.3	0.15	0.07	0.03	0.03	0.055
	后处理	0.28	0.09	0.03	0.03	0.016	0.016	0.02

图6为采集的几种典型地物地面光谱曲线。

#### 4.5 水体样采集及现场测试

采样前要根据检测项目的性质和采样方法要求,选择适宜材质的盛水容器和采样器,并充分清洗干净(李鑫星等,2021)。此外,还要准备好适当的交通工具。采样容器一般使用塑料容器或玻璃容器。塑料容器用作测定金属、放射性元素和其他无机物的盛水容器,玻璃容器则用作测定有机物和微生物等的盛水容器。有些项目要求提前加入保存剂,不同项目加入保存剂不同,根据保存剂的不同分别准备盛水容器。同时还准备一些采样的工具,比如水桶,采样器,现场使用的实验设备:pH计、温度计等。在采集河流、湖泊等地表水时,可以使用桶、瓶等容器直接采取。一般将其沉至水面下0.3~0.5 m处采集。在桥上等地方采样时,可将系着绳子的聚乙烯桶或带着坠子的采样瓶投于

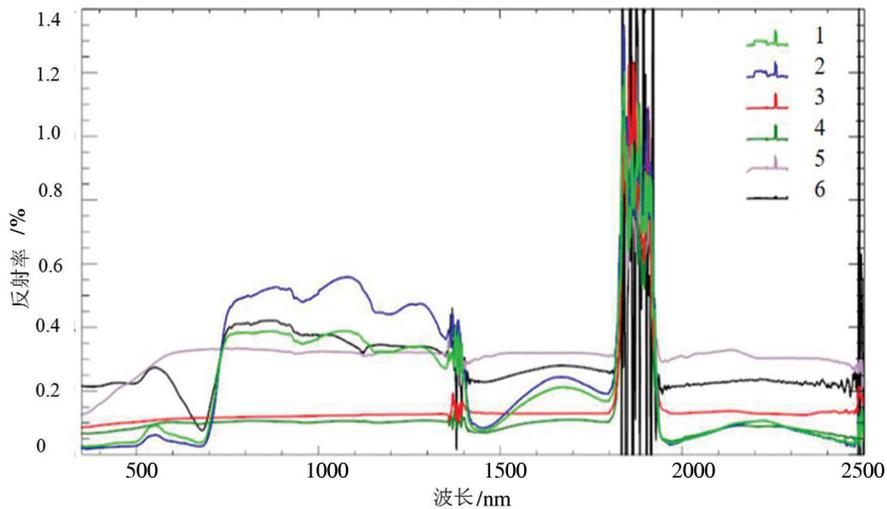


图6 几种典型地物地面光谱曲线

1—草地;2—槐树;3—沥青路;4—滩涂;5—水泥路;6—小麦

Fig.6 Spectrum curves of several typical ground features

1— Grassland; 2— Locust tree; 3— Asphalt road; 4— Beach; 5— Cement road; 6— Wheat

水中汲水,要注意不能混入漂浮于水面上的其他物质。采集深层水样时,可以使用带重锤的采样器。测定溶解氧的水样,要使用专门的双瓶采样器采样。湖泊、水库的采样点应该设置在湖水的主要出入口、中心区、沿湖泊(水库)水流方向、滞留区及湖边城市水源区(罗代洪等,2004;甘露等,2010;崔齐等,2018)。大部分水样在当天采样工作完成后,立即送往专业分析机构进行测试,测试的指标见表3。

## 5 高光谱数据处理与信息提取

### 5.1 高光谱数据预处理

高光谱机载平台获取数据时,由于平台高度及光谱仪视场角限制,导致数据获取幅宽有限,需多次飞行获取的多航带数据才能完整覆盖研究区域(王瑞军等,2020)。因此机载高光谱数据预处理包括辐射校正、几何校正和图像拼接等工作,以获得在空间和辐射能量探测上的精准匹配的完整研究区域影像。最后通过同步获取的地物波谱数据验证影像的辐射精度,以进一步检验成像数据质量。

#### 5.1.1 辐射定标

由于成像光谱仪输出的数据并不具有物理意义,因此通过辐射定标将成像光谱仪的DN值转为有物理意义的辐射亮度值,使遥感信息定量化。采用积分球系统(图7)完成成像光谱仪的辐射定标。

通过对比积分球能级数据即对应功率、积分时间下输入的辐射亮度值与光谱仪输出DN值之间的关系,逐波段进行线性拟合,完成光谱仪的辐射定标。

表3 水常规化验指标(水质参数)一览

Table 3 List of water routine test indexes

序号	项目	单位
1	透明度(现场测定)	cm
2	酸碱度(pH)	-
3	浑浊度	NTU
4	溶解氧(DO)	mg/L
5	温度(T)	°C
6	五日生化需氧量(BOD <sub>5</sub> )	mg/L
7	化学需氧量(COD <sub>Mn</sub> )	mg/L
8	悬浮固体(SS)	mg/L
9	氨氮含量(NH <sub>3</sub> -N)	mg/L
10	总磷含量(TP)	mg/L
11	总氮含量(TN)	mg/L
12	叶绿素 a(Chl-a)	mg/L

在辐射定标前需要对积分球辐亮度数据进行线性插值,得到光谱仪的各波段所对应的辐亮度值。影像DN值与辐亮度值之间存在着线性关系,通过求解高光谱影像的各波段增益系数以及偏移量,完成影像数据的辐射定标(Moamen et al., 2021)。图8和图9为可见光影像和短波红外影像辐射定标后的光谱变化。

#### 5.1.2 反射率转换

在经过辐射定标后,求得辐亮值数据,进一步使用经验线性法进行反射率转换,参与反射率转换的地面同步光谱数达到324条,平均每一条航带2条以上的同步地物波谱。

基于经验模型的反射率反演算法,主要是应用图像像元自身的灰度值,不考虑大气、地物属性以

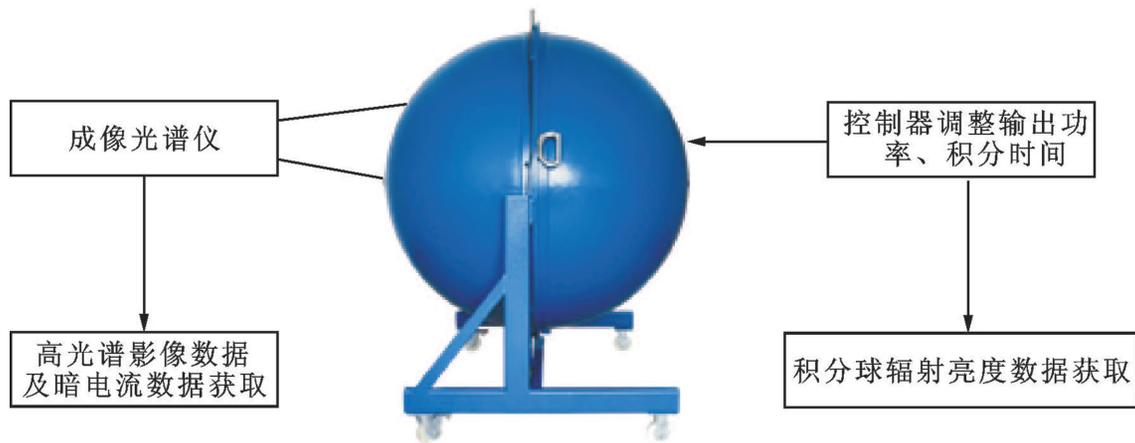


图7 积分球示意图

Fig.7 The integrating sphere diagram

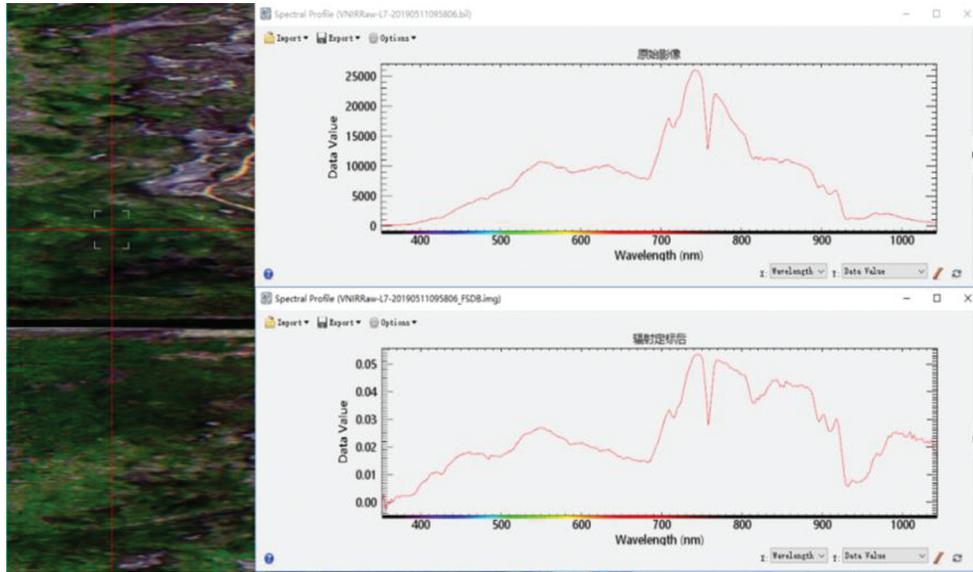


图8 可见光数据辐射定标结果  
Fig.8 Visible data radiometric calibration results

及遥感平台特征,通过对象元灰度值进行求均值或回归运算,在统计意义上获得图像的反射率值(孙雨等,2015)。

经验线性法(Empirical Line, EL)已经在遥感定标和反射率反演中被广泛使用,主要依靠图像象元值和图像背景信息之间的拟合关系(Ben-Dor et al., 2004)完成地表反射率的反演计算。经验线性法基于如下简化的公式:

$$DN_b = \rho(\lambda)A_b + B_b \tag{1}$$

其中: $DN_b$ 为给定象元在波段b的数字量化值; $\rho(\lambda)$ 为实测地物象元在波段b所在的波长的地表反射率值; $A_b$ 为由于传输和仪器本身所导致的倍数增益系数; $B_b$ 为由于大气程辐射和仪器导致的偏移。

该方法在应用中,一般会实测地面两个或多个定标点的地面反射光谱数值(reflectance spectra),然后计算遥感图像上对应象元点的平均辐射光谱

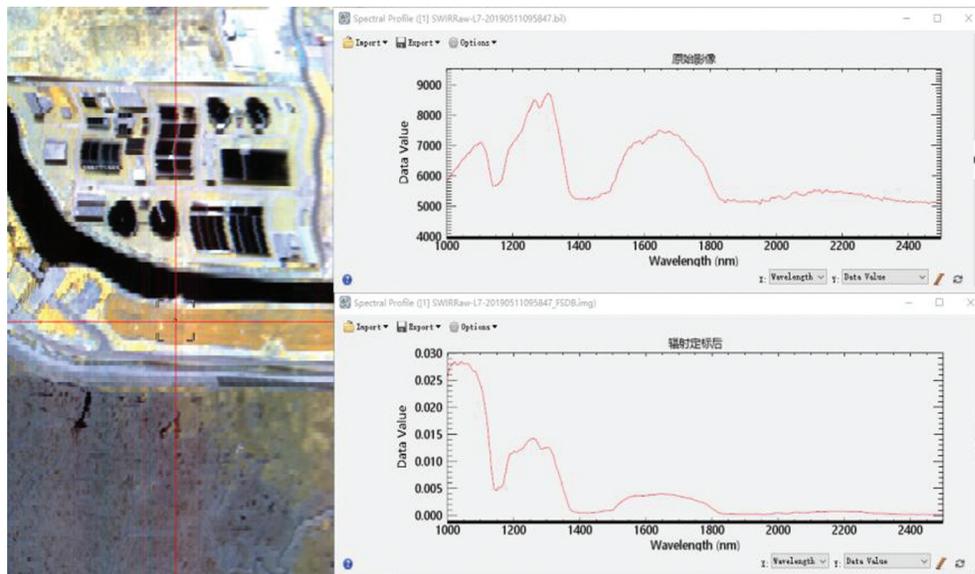


图9 短波红外数据辐射定标结果  
Fig.9 Radiometric calibration results of short-wave infrared data

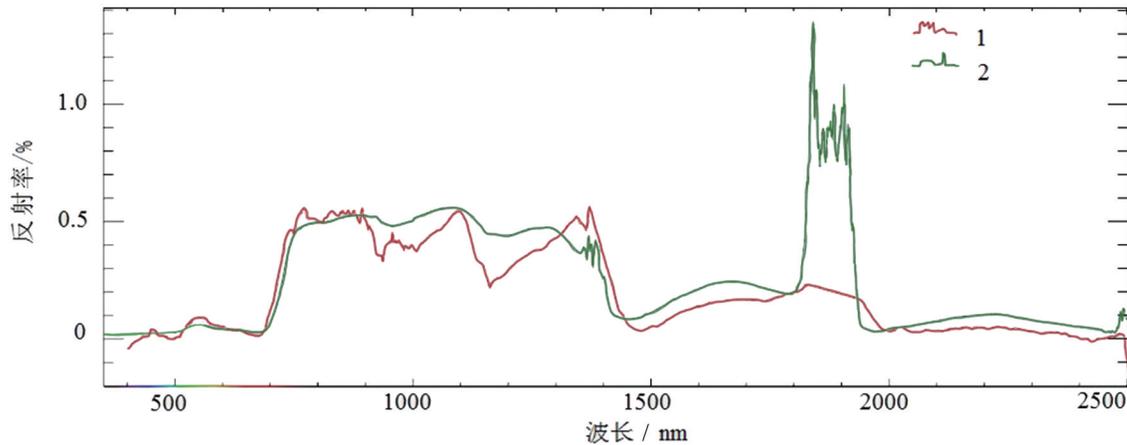


图10 槐树反射率和ASD数据对比  
1—影像光谱—槐树;2—ASD光谱—槐树

Fig.10 Comparison of locust tree reflectance and ASD data  
1—Image spectrum—locust tree; 2—ASD spectrum—locust tree

值,通过使用统计学中的回归运算,得到公式(1)中的增益值 $A_b$ 和偏移值 $B_b$ ,最后应用该公式,对整幅遥感图像进行反射率的计算。其中某一地物波谱反射率与地面波谱反射率对比如图10。

### 5.1.3 几何校正

首先进行IMU/GPS数据处理,Pos数据采用诺瓦泰公司的IE8.8软件进行处理(图11)。该软件一般可以采用精密单点定位PPP和基站两种方式解算POS数据,本次采用基站后差分处理方式解算POS数据,精密计算每行数据于曝光时刻的机载GPS天线相位中心的WGS84框架坐标和姿态参数。

在完成POS数据的解算后进行插值处理,得到了高光谱影像各个扫描行所对应的外方位信息,可以通过建立旋转矩阵进行坐标转换,将导航坐标转换为投影坐标。具体坐标的转换过程如下:成图坐标系(m)→导航坐标系(g)→IMU坐标系(b)→传感器坐标系(c)→像空间坐标系(i),由成图坐标系转换至像空间坐标系的旋转矩阵表达形式如下:

$$C_i^m(\omega, \phi, \kappa) = C_g^m C_b^g(\psi, \Theta, \Phi) C_c^b C_i^c \quad (2)$$

式中旋转矩阵可由已知条件观测获取,通过矩阵变换求得三个外方位元素姿态参数 $(\omega, \phi, \kappa)$ ,三个外方位元素位置参数 $(X_s, Y_s, Z_s)$ 需要考虑IMU坐标系中的坐标位置偏移 $(X_i, Y_i, Z_i)$ 进行修正。

$$\begin{bmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \end{bmatrix} = C_g^m \left\{ \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix} + C_b^g(\psi, \Theta, \Phi) \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix} \right\} \quad (3)$$

在求得所有外方位元素 $(\omega, \phi, \kappa, X_s, Y_s, Z_s)$ 后,根据共线条件方程,采用直接法几何校正计算像点坐标 $(x, y)$ 对应的地面点坐标 $(X, Y, Z)$ ,并赋予其像点对应的灰度值。坐标变换公式为:

$$\left. \begin{aligned} X &= X_s + (Z - Z_s) \frac{a_1 x + a_2 y - a_3 f}{c_1 x + c_2 y - c_3 f} \\ Y &= Y_s + (Z - Z_s) \frac{b_1 x + b_2 y - b_3 f}{c_1 x + c_2 y - c_3 f} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

粗校正后的影像,精度还存在一定的误差,本实验利用采集的像片控制点对所有有效的像片均进行微分纠正。按照航带分区域纠正,最后通过镶嵌过程,得到最终高光谱影像。

## 5.2 地物分类与信息处理

工作中采用可见光数据287个波段进行地物的精细分类。光谱分辨率和空间分辨率分别为2.42 nm和1.0 m。地面光谱采样主要包含各类农作物和树木、草地、道路材质等68个地物类别,根据工区内地物存在的实际情况,仅选取了农作物、树木、草、水生植物、道路材质、建筑、裸露地表等七大类别,共计46种地物种类进行精细分类,具体如表4。工区内的其他地物由于数量较少或者光谱干扰严重无法区分,如构树、枣叶、茶树、银杏、豇豆、葡萄、芒草、花岗岩地砖等,其中建筑类地物结合POI信息进行了人工解译划分,大致划分为11类用地信息,具体为:一般工厂、加油站、化工企业、医院诊所、商业购物、学校、居民住宅、广场公园、建筑零时用地、码头、行政机关等(李志忠等,2021)。

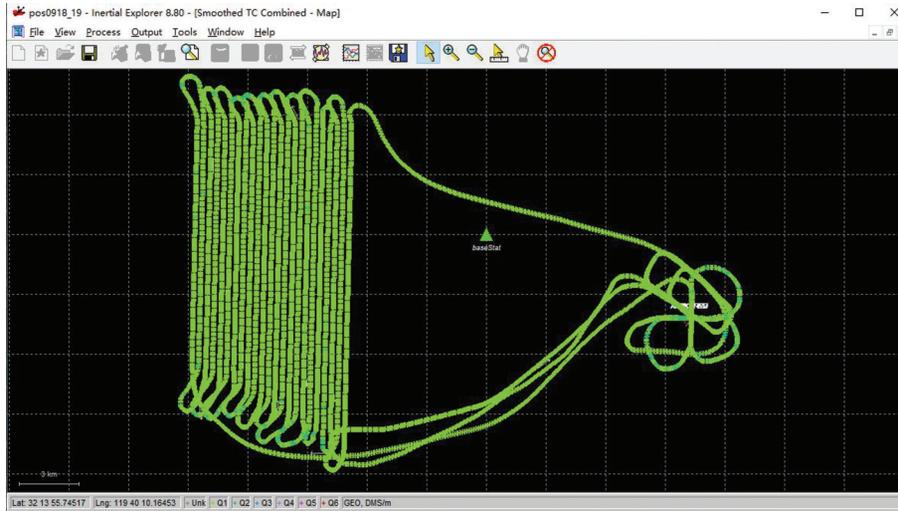


图 11 IMU/GPS 飞行轨迹示意图  
Fig.11 Diagram of IMU/GPS flight path

由于高光谱图像波段数目多,各波段间具有较强的相关性,主成分分析(PCA)方法对高光谱数据进行降维和去除噪声波段。支持向量机方法对高光谱遥感图像进行分类,可实现图像的分类识别,分类步骤及流程见图 12。

主成分分析(PCA, Principal Components Analysis)是一种简化数据集的技术。它是一个线性变换。这个变换把数据变换到一个新的坐标系统中,使得任何数据投影的第一大方差在第一个坐标(称为第一主成分)上,第二大方差在第二个坐标(第二主成分)上,依次类推。主成分分析经常用减少数据集的维数,同时保持数据集对方差贡献最大的特征。

持向量机的基本思想是寻找一个分类超平面,使得训练样本中的两类样本能被分开,支持向量机(Support Vector Machine, SVM)作为一种最新的也是最有效的统计学习方法,近年来成为模式识别与机器学习领域一个新的研究热点。SVM具有小样本学习、抗噪声性能、学习效率高与推广性好的优点,能够用于解决空间信息处理分析领域的遥感影像处理。遥感图象分析与处理是 SVM 应用一个热门的研究方向。一些主要应用如土地利用分类,目前针对高光谱数据进行分类还是仅仅局限于传统的分类方法,不但运算速度慢,分类精度低,而且出现了严重的 huges 现象。而在高光谱遥感分类中 SVM 具有明显的优越性,因此 SVM 应用被归纳为高光谱遥感分类最重要的进展之一。通过飞行数

据,研究了支持向量机在高光谱遥感图像分类中的应用,建立了基于支持向量机的高光谱遥感图像分类模型。

## 6 机载高光谱遥感应用示范

### 6.1 沿江地物、水体和岸线稳定性探测

采用机载高光谱遥感技术,对长江下游干流镇江—扬州段沿江两岸岸线外 5 km 范围内进行生态地质环境遥感调查,总面积约 670 km<sup>2</sup>,飞行测线长度 2500 km。快速识别、提取工作区中的各项环境指标和影响因子,进行生态地质环境评价。飞行区域规划如图 13 所示。

表 4 地物精细分类明细

Table 4 Detailed classification of ground features

类别	具体种类	种类数量
农作物	苕菇、水稻、青菜、菱角、荷叶、大豆、上海青、花生、玉米、荞麦、草莓、萝卜、油菜	13
	桑树、杨树、女贞、冬青、栎树、松柏、香樟树、	
树木	夹竹桃、杉树、榉树、桤柳、海桐、松树、李子树、天竺葵、桦树、竹子、罗汉松、玉兰	19
	绿化草地、杂生草丛、芦苇	
草		3
水体	长江、沟渠、塘	1
水生植物	藻、浮萍、水葫芦	3
建筑	一般建筑、厂房、种植大棚	3
裸露地表	滩涂、裸土	2
道路材质	沥青、水泥	2
总计		46

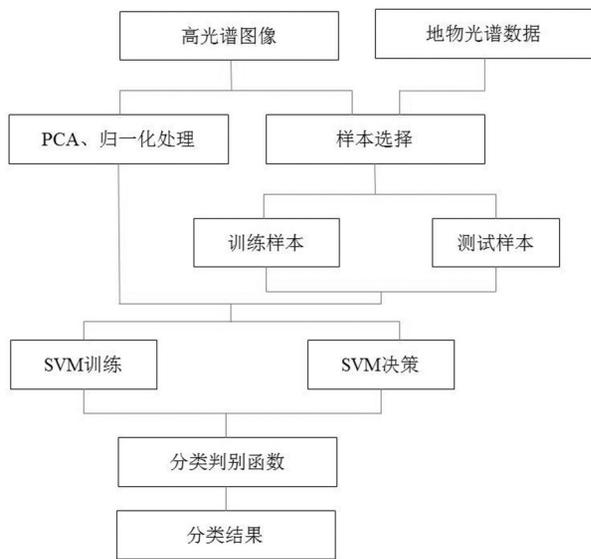


图12 基于PCA和SVM的高光谱遥感影像分类流程图  
 Fig.12 Flow chart of hyperspectral remote sensing image classification based on PCA and SVM

6.1.1 研究目标

在采集的高光谱数据基础上,识别和提取土地、植被、湿地、岸段、滩涂等自然资源要素,进行综合研究,实施生态地质环境评价,给出工作区内各项功能区的开发利用建议;结合水体采样化验分析和数学建模方式,对工作区内的水体进行半定量的评价,识别和查找污染源头,给出水产养殖用水、灌溉用水建议;利用光谱特征,圈定容易产生冲蚀崩塌的岸段;调查了解江滩湿地的植物种群分布及生长特点(苏龙飞等,2021)。

6.1.2 研究成果

(1)地物精细分类

地物精细分类面积为670 km<sup>2</sup>,分类地物共计46类,具体如表5。分类结果(局部)见图14~图16。其中分类精度最大90.2%,最小68.69%,平均分类精度达到80.57%,分类精度和指标符合要求。

(2)地表水水质评价

本次高光谱遥感探测利用高光谱数据与地面实际水样测试分析数据,建立相关性模型,根据《地表水环境质量标准》(GB3838-2002),对工作区内除长江以外的地表水体进行水质反演评价,评价指标包括总磷、总氮、氨氮、化学需氧量、五日生化需氧量、溶解氧、叶绿素7个指标。评价结果表明:Ⅲ类水占比最少,仅占0.03%;Ⅳ类水占比13.12%;Ⅴ类水体占比最多,为58.13%;劣Ⅴ类水体占比28.72%,主要集中在A、B、C、D、E五块区域(图17~图20)。其中,A区位于工作区西北侧,区东侧为工厂聚集区,北部为居民生活区,南部为大棚种植、养殖集中区,此处水质较差可能是因为工厂活动和施肥因素的影响;B区位于工作区西侧,区域内有塑料包装、建筑工程、机械配件等工厂,有较为密集的居民生活区,此处水质较差可能是受到工厂施工、居民生活用水排放的影响;C区位于工作区中部,区域内有钢铁厂、鞋厂等工厂,初步判断水体受到了工厂施工环境的影响;D区位于工作区北侧偏西,区内有河流,水质较差区域主要分布在居民生活区的周围,可能受到居民生活的影响;E区位于工作区东侧长江南岸,区内为大片水体种植、养殖区,养殖施肥导致此处水质较差。

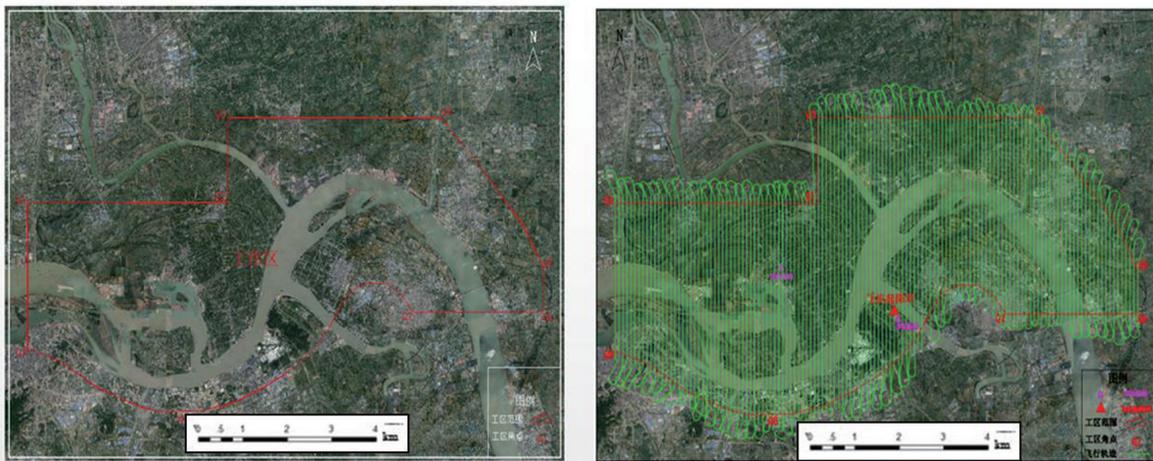


图13 飞行区域及其测线规划  
 Fig.13 Planning of the flight areas and survey lines

表5 地物精细分类统计

**Table 6 Statistics of fine classification of ground features**

序号	种类	像元数	相对百分比/%	分类精度/%
1	茨菇	4350121	0.65	87.20
2	水稻	43363452	6.47	88.12
3	青菜	5610321	0.84	80.10
4	菱角	5600632	0.84	79.10
5	荷叶	4800102	0.72	82.30
6	大豆	5101032	0.76	78.56
7	上海青	3500301	0.52	79.29
8	花生	3300306	0.49	78.74
9	油菜	4601002	0.69	82.60
10	玉米	4103120	0.61	80.34
11	萝卜	4800369	0.72	83.21
12	草莓	1523112	0.23	83.69
13	荞麦	2277956	0.34	73.50
14	桑树	3102315	0.46	70.33
15	杨树	8501463	1.27	81.26
16	女贞	5210215	0.78	82.09
17	冬青	5500078	0.82	86.35
18	栎树	8801032	1.31	79.31
19	松柏	6502014	0.97	80.46
20	香樟树	9906587	1.48	83.74
21	夹竹桃	5610358	0.84	81.11
22	杉树	6906358	1.03	82.59
23	桦树	4703219	0.70	80.39
24	竹子	4402359	0.66	81.87
25	罗汉松	5111235	0.76	78.56
26	玉兰	4803684	0.72	82.86
27	桤柳	3611243	0.54	68.69
28	海桐	4521368	0.67	70.03
29	松树	5100239	0.76	83.31
30	李子树	4707529	0.70	69.63
31	天竺葵	6306358	0.94	68.95
32	桦树	8804652	1.31	70.33
33	绿化草地	5100329	0.76	85.61
34	杂生草丛	10203251	1.52	83.20
35	芦苇	8541342	1.27	84.21
36	水体	163571652	24.41	90.20
37	藻	1350235	0.20	88.60
38	浮萍	781009	0.12	65.21
39	水葫芦	340135	0.05	69.13
40	一般建筑	35760986	5.34	79.31
41	工矿企业建筑	4690865	0.70	84.30
42	种植大棚	3203264	0.48	86.10
43	滩涂	3211128	0.48	87.12
44	裸土	5640362	0.84	85.32
45	沥青	136533428	20.38	82.90
46	水泥	85306457	12.73	81.60
47	未分类地物	721425	0.11	/

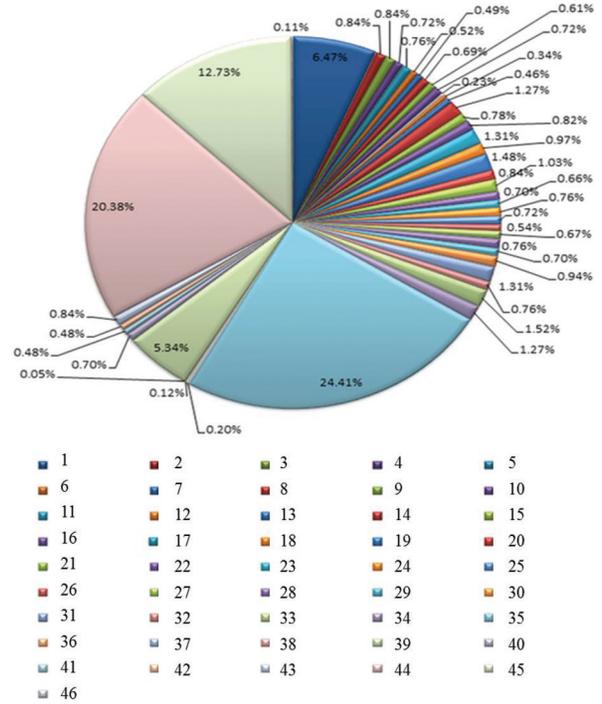


图14 地物分类结果相对百分比图

1—水稻;2—青菜;3—菱角;4—荷叶;5—大豆;6—上海青;7—花生;8—油菜;9—芝麻;10—萝卜;11—草莓;12—荞麦;13—桑树;14—杨树;15—女贞;16—冬青;17—栎树;18—松柏;19—香樟树;20—夹竹桃;21—杉树;22—桦树;23—竹子;24—罗汉松;25—玉兰;26—桤柳;27—海桐;28—松树;29—李子树;30—天竺葵;31—桦树;32—绿化草地;33—杂生草丛;34—芦苇;35—水体;36—藻;37—浮萍;38—水葫芦;39—一般建筑;40—工矿企业建筑;41—种植大棚;42—滩涂;43—裸土;44—沥青;45—水泥;46—未分类地物

Fig.14 The relative percentage of ground feature classification results

1—Rice; 2— Green vegetables; 3— Water chestnut; 4— Lotus leaf; 5— Soybean; 6— Shanghai green; 7— Peanut; 8— Rape; 9— Sesame; 10— Radish; 11— Strawberry; 12— Buckwheat; 13— Mulberry; 14— Poplar; 15— Privet; 16— Holly; 17— Luan tree; 18— Pine and cypress; 19— Camphor tree; 20—Oleander; 21—Fir tree; 22—Birch tree; 23—Bamboo; 24— Podocarpus; 25— Magnolia; 26— Tamarix; 27— Pitus; 28— Pine; 29— Plum; 30— Geranium;31— Zelvka; 32— Green grassland; 33— Weedy grass; 34— Reed; 35— Water body; 36— Algae; 37— Duckweed; 38— Water hyacinth; 39— General construction; 40— Industrial and mining enterprise construction; 41— Planting greenhouse; 42— Tidal flat; 43—Bare soil; 44—Asphalt; 45—Cement; 46—Unclassified ground features

(3)江滩湿地评价

对研究区内主要三处江滩湿地植被进行了分类,湿地区1位于镇江市焦山风景区以北,面积约16.84 km<sup>2</sup>。湿地区2位于共青团农场以南,面积约10.03 km<sup>2</sup>。湿地区3位于扬中市寿字圩以北,面积约6.13 km<sup>2</sup>。

分类结果表明(图21~图23),湿地均存在不同程度的开发利用,开发利用的主要内容为水产养殖、苗圃、水稻。其中湿地1的水产养殖水域面积占比达22.32%,湿地2的水稻种植面积占比达18.89%,湿地3的水稻种植和苗圃积植面积加起来达到了42.17%,由此可见,这些人工开发肯定会对

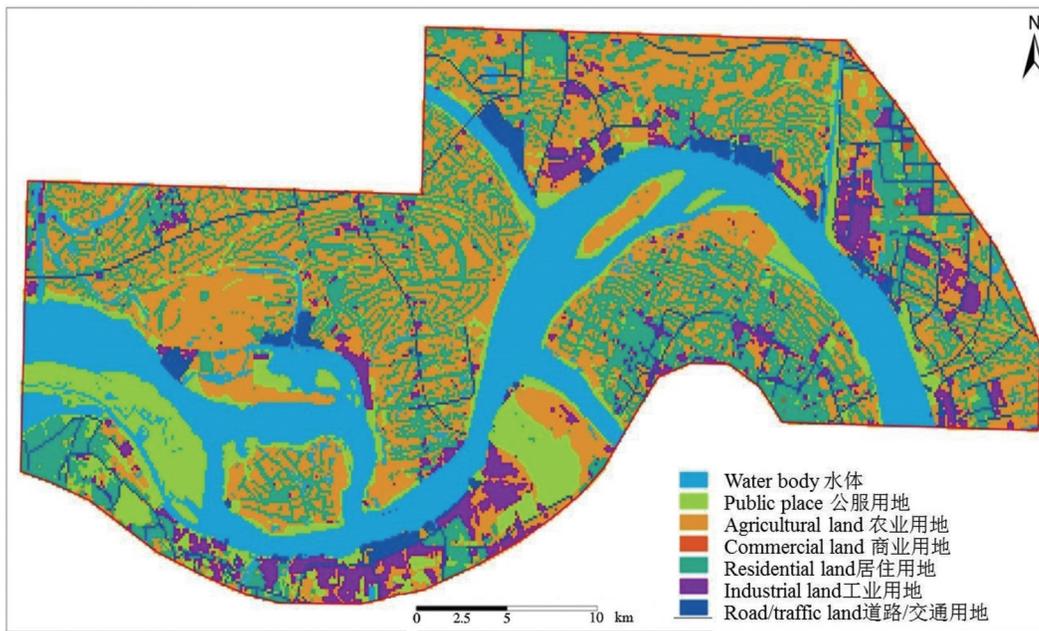


图 15 高光谱遥感功能区分布图  
Fig.15 Distribution of hyperspectral remote sensing functional areas

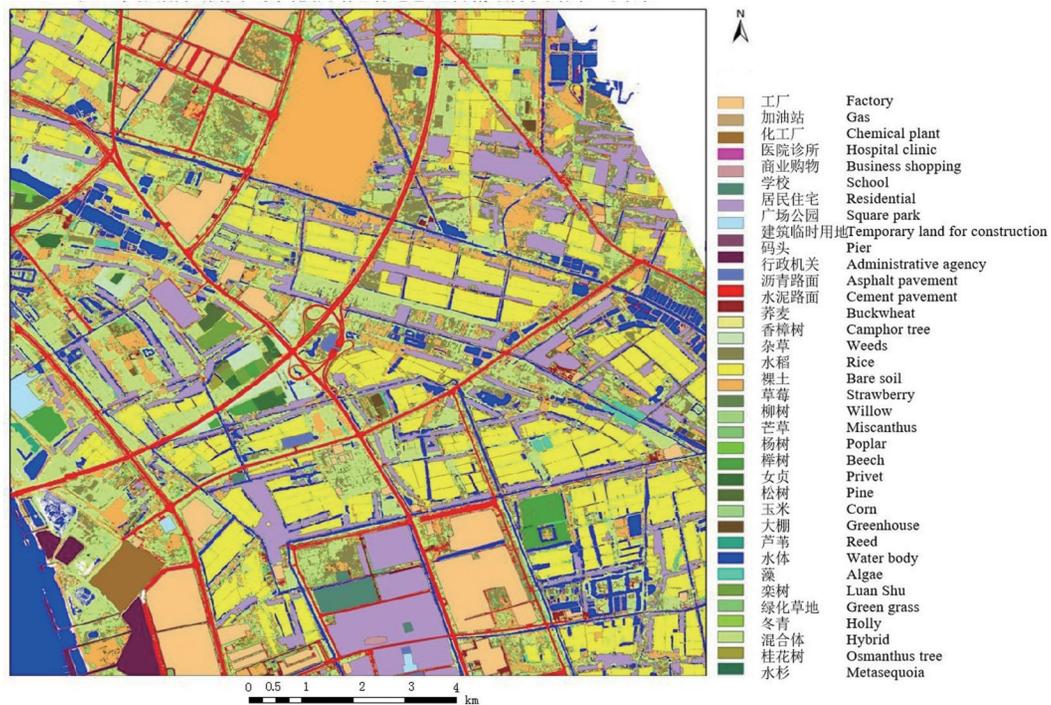


图 16 高光谱遥感地物精细分类图  
Fig.16 Fine classification of hyperspectral remote sensing features

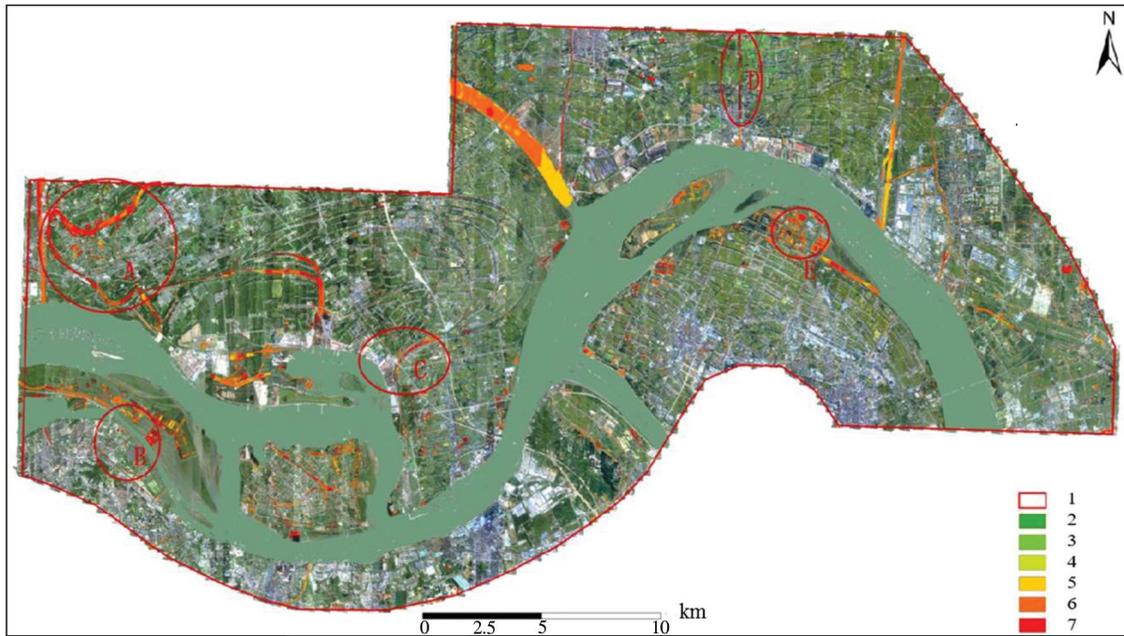


图 17 高光谱遥感地表水综合等级划分图

1—工作区范围;2—I类水;3—II类水;4—III类水;5—IV类水;6—V类水;7—劣V类水

Fig.17 The comprehensive grade classification of surface water by hyperspectral remote sensing

1—Working area scope; 2—Class I water; 3—Class II water; 4—Class III water; 5—Class IV water; 6—Class V water; 7—Inferior class V water

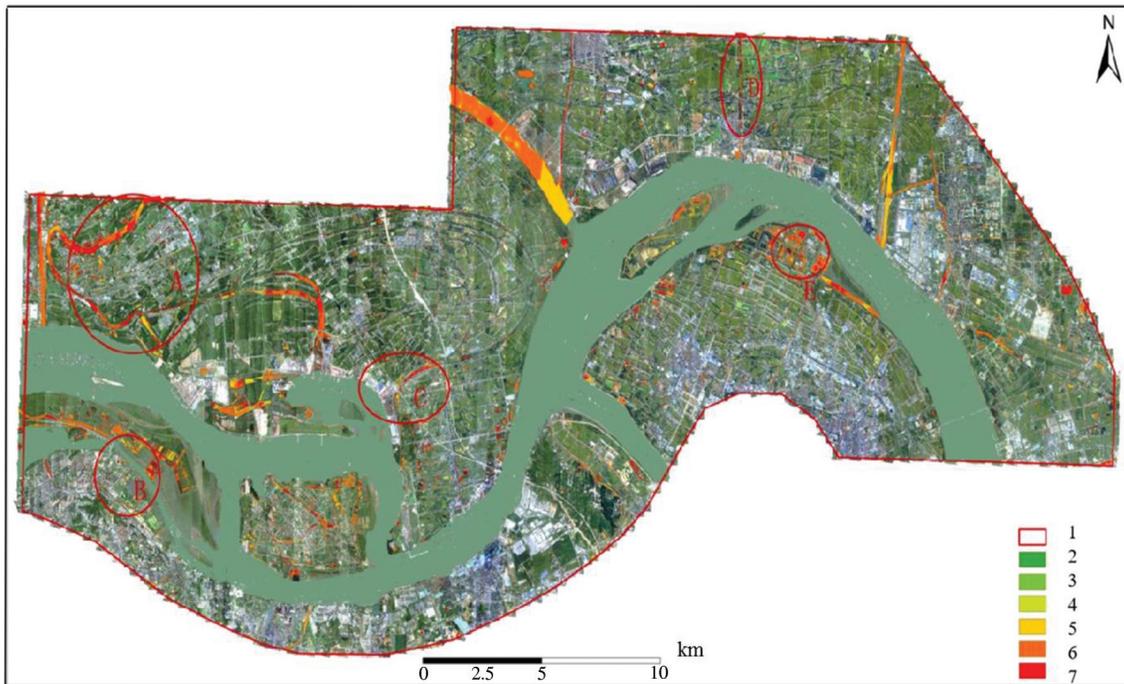


图 18 高光谱遥感地表水总氮(N)元素浓度反演分级图

1—工作区范围;2—I类水;3—II类水;4—III类水;5—IV类水;6—V类水;7—劣V类水

Fig.18 Inversion and classification of total nitrogen (N) element concentration in surface water by hyperspectral remote sensing

1—Working area scope; 2—Class I water; 3—Class II water; 4—Class III water; 5—Class IV water; 6—Class V water; 7—Inferior class V water

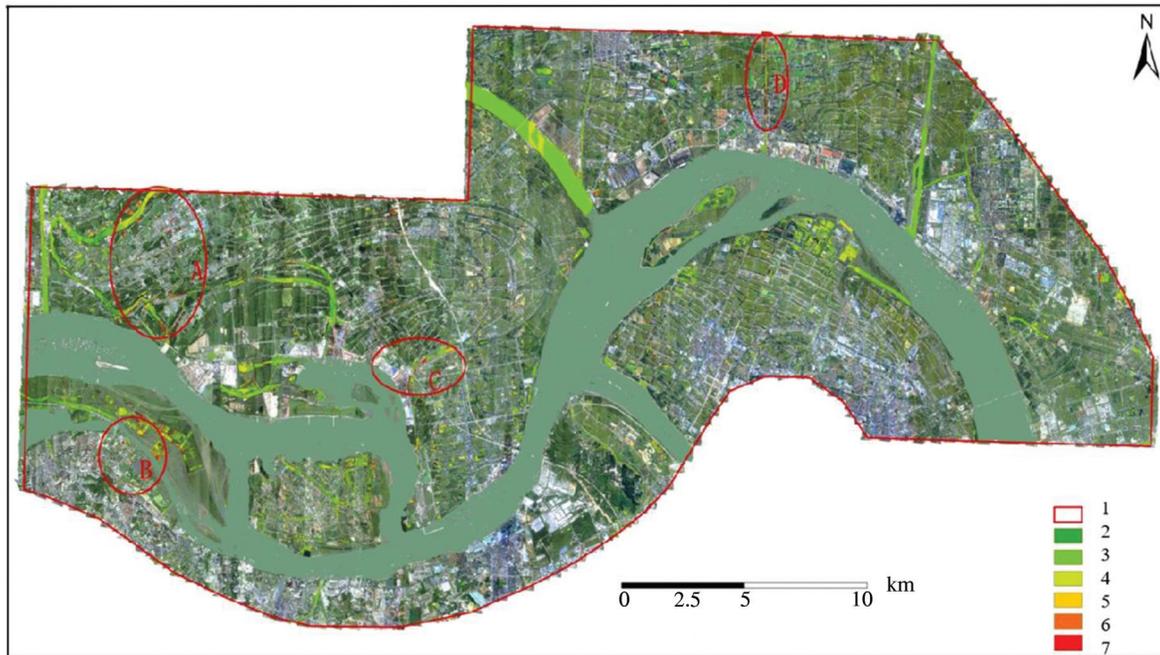


图19 高光谱遥感地表水总磷(P)元素浓度反演分级图

1—工作区范围;2—I类水;3—II类水;4—III类水;5—IV类水;6—V类水;7—劣V类水

Fig.19 Inversion and classification of total phosphorus (P) element concentration in surface water by hyperspectral remote sensing  
1—Working area scope; 2—Class I water; 3— Class II water; 4— Class III water; 5— Class IV water; 6— Class V water; 7—Inferior class V water

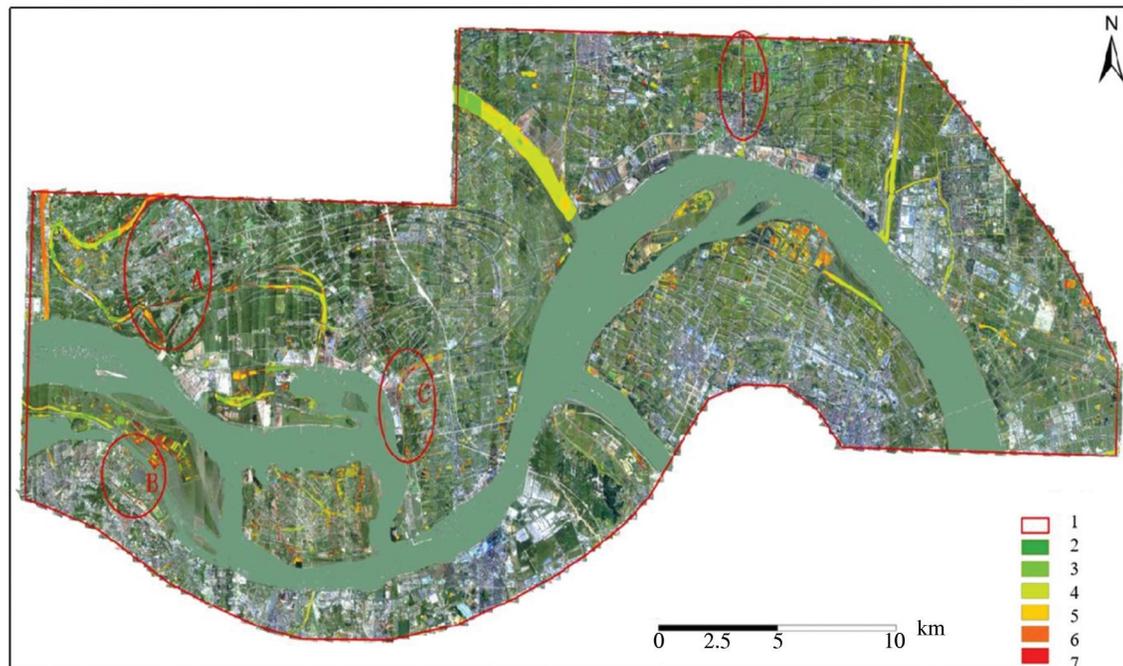


图20 高光谱遥感地表水五日生化需氧量(BOD<sub>5</sub>)反演分级图

1—工作区范围;2—I类水;3—II类水;4—III类水;5—IV类水;6—V类水;7—劣V类水

Fig.20 Five-day biochemical oxygen demand (BOD<sub>5</sub>) inversion classification of surface water by hyperspectral remote sensing  
1—Working area scope; 2—Class I water; 3— Class II water; 4— Class III water; 5— Class IV water; 6— Class V water; 7—Inferior class V water

湿地生态环境产生不利影响。

(4)长江岸段稳定性评价

利用高光谱数据的精细分类结果,在GIS(地理信息系统)软件支持下,对研究区内的江岸稳定性进行评价,评价因子包括岸线材质、岸前滩涂、岸前

滩涂植被、岸后植被等。评价结果(图24)表明,相对稳定岸段多分布于堤坝、沿江公路、港口、公园;相对稳定性较差岸段主要是自然岸段,主要分布于镇江市江心洲南北两岸、扬州江都区自茅家圩往北直至王家桥一带、扬中市寿字圩以北环江路附近。

6.2 土壤污染探测

研究区位于江苏省镇江市丹阳东北部地区,地貌以平原为主,地势较平坦,局部有较小范围的剥蚀残丘,最高峰为123 m,其余的地区为平原,海拔高度一般在7 m。飞行面积310 km<sup>2</sup>,飞行测线总长度为740 km(图25)。

6.2.1 研究目标

通过机载高光谱技术采集耕地土壤高光谱影像,并进行同步野外地物波普测量,进行耕地土壤地面检测和高光谱传感器数据融合(杨思睿等,2018)。采集耕地土壤具有代表性的实验样品,实验室测定其全氮含量、有机质含量、水分含量、土壤肥力以及重金属污染情况等,与光谱特性分析结果对比,确定耕地土壤生态参数及其变化与光谱特性基本关系,建立耕地土壤影响因子快速监测的高光谱反演模型。

6.2.2 研究成果

通过反演结果可以看出,丹阳地区元素As的污染区域较多,主要集中在研究区域的西北、西南和东部地区;元素Cr主要集中在中北部地区,而元素Cu则集中在中南部地区(图26~图28)。根据其分布可

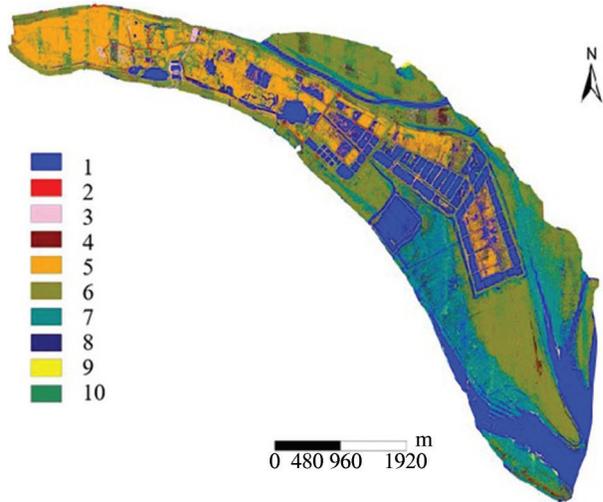


图21 湿地地区1地物精细分类结果图  
1—水;2—水泥路面;3—水杉;4—柳树;5—蒿草;6—芦苇;  
7—水草;8—绿藻;9—泥路;10—毛草  
Fig.21 Results of fine classification of ground features in wet area 1#  
1—Water; 2—Cement road; 3—Metasequoia; 4—Willow; 5—Wormwood;  
6—Reed; 7—Aquatic; 8—Green algae; 9—Dirt road; 10—Grass

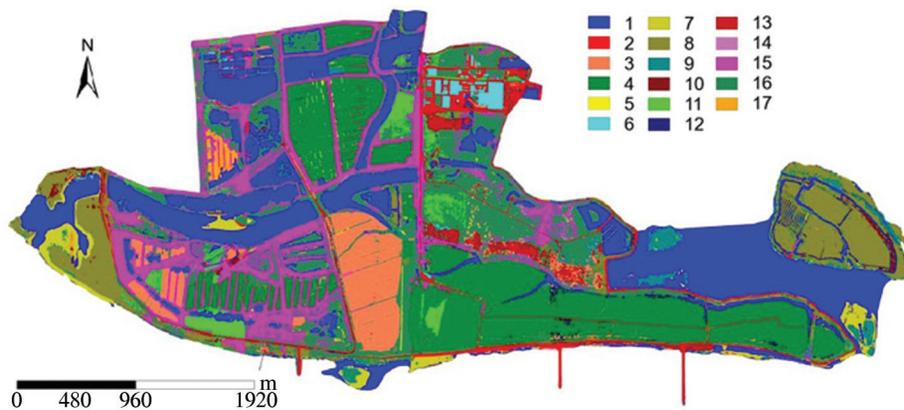


图22 湿地地区2地物精细分类结果图  
1—水;2—水泥路面;3—裸土;4—水稻;5—泥路;6—房屋;7—冲积物;8—芦苇;9—水草;10—柳树;11—香樟;12—绿藻;13—  
其他硬化地表;14—桦树;15—杨树;16—毛草;17—蒿草  
Fig.22 Results of fine classification of ground features in wet area 2#  
1— Water; 2— Cement road; 3— Bare soil; 4— Rice; 5— Dirt road; 6—House; 7— Alluvium; 8— reed; 9— Aquatic; 10— Willow; 11—  
Camphor; 12 — Green algae; 13— Other hardened ground; 14— Birch; 15— Poplar; 16— Grass; 17— Wormwood

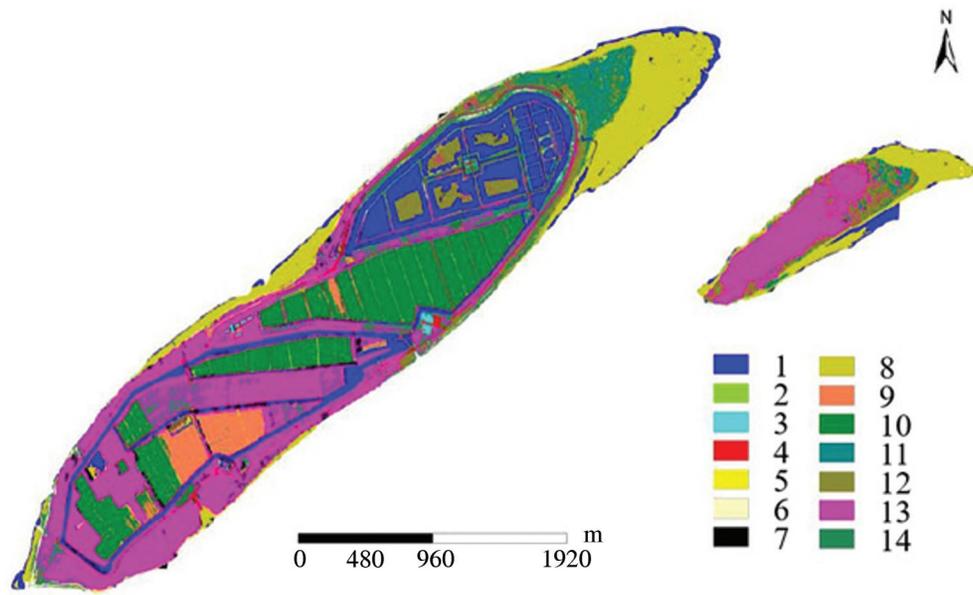


图23 湿地区3地物精细分类结果图

1—水;2—绿藻;3—房屋;4—水泥路面;5—泥路;6—砂石;7—未分类;8—冲积物;9—裸土;10—水稻;11—水草;12—芦苇;13—杨树;14—毛草

Fig.23 Results of fine classification of ground features in wet area 3#

1- Water; 2-Green algae; 3- House; 4- Cement road; 5- Dirt road; 6-Sand gravel; 7-Unclassified; 8 alluvium; 9- Bare soil; 10- Rice; 11- Aquatic; 12-Reed; 13-Poplar; 14-Grass

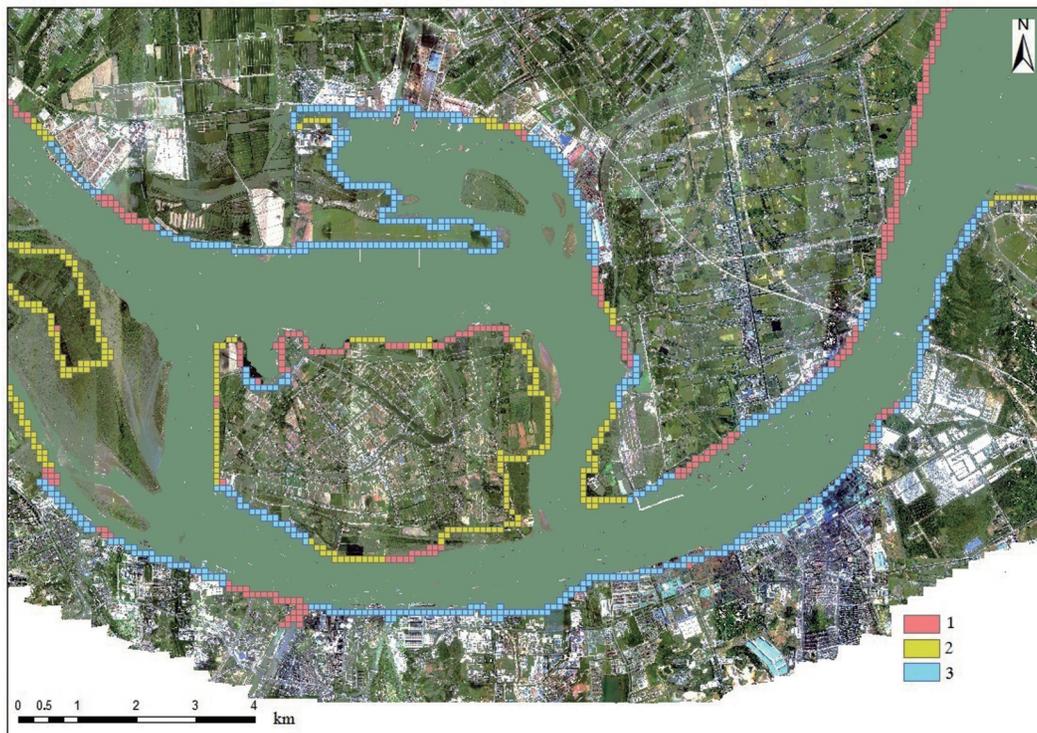


图24 岸基稳定评价

1—相对稳定性较差;2—稳定性一般;3—相对稳定

Fig.24 Shore-based stability evaluation

1-Relatively poor stability; 2-Generally stable; 3-Relatively stable

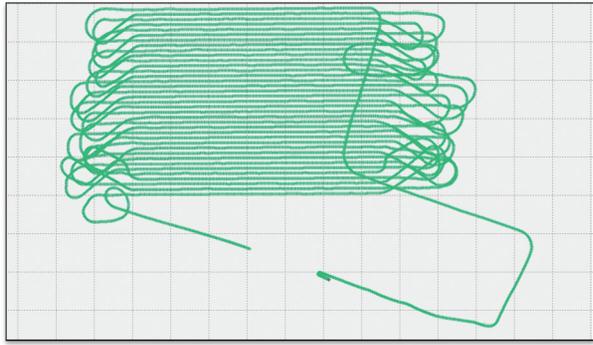


图25 飞行轨迹示意图  
Fig.25 Diagram of flight path

以发现,除了相关性较高的Hg和Ni外,其他污染元素分布并没有一定的相关性,分布区域各不相同。

通过机载高光谱反演影像与实际采集样品分析结果插值对比分析,两者在数值趋势上基本一致(图29),说明通过高光谱影像进行污染元素含量反演具有较强的说服力。丹阳地区土壤重金属污染元素主要为As、Cr、Cu。

实地调研后发现,图中污染元素含量较高的区域基本都位于工业区,其中,与汽车行业的相关工业园对污染元素Cu的影响较大,而一些家具、橡胶加工行业对污染元素Cr和As的影响较大。

## 6.3 生态环境调查

### 6.3.1 研究目标

通过机载高光谱成像技术对安徽省池州市贵池区进行生态环境调查。通过采集的高光谱影像、同步水体样采集测试与实际土壤样品分析,反演得出藻类分布、土壤重金属污染分布及矿山开采区的粉尘污染分布信息。

### 6.3.2 研究成果

利用航空高光谱数据对安徽贵池秋浦河沿岸地区生态环境调查发现,水体藻类有着特征波段,通过反演能够有效提取到藻类信息(图30),精度可达74.33%以上。

由机载高光谱反演的影像与实际采集土壤样品分析结果插值对比分析,两者结果基本一致(图31,图32),进一步说明了机载高光谱探测土壤污染的有效性。

在贵池某矿山开采区通过机载高光谱反演影像可以清晰识别出矿山粉尘污染分布(图33)。

## 7 结 论

高光谱成像技术将成像技术与光谱技术相结合,探测目标的二维几何空间及一维光谱信息,获取高光谱分辨率的连续、窄波段的图像数据。随着

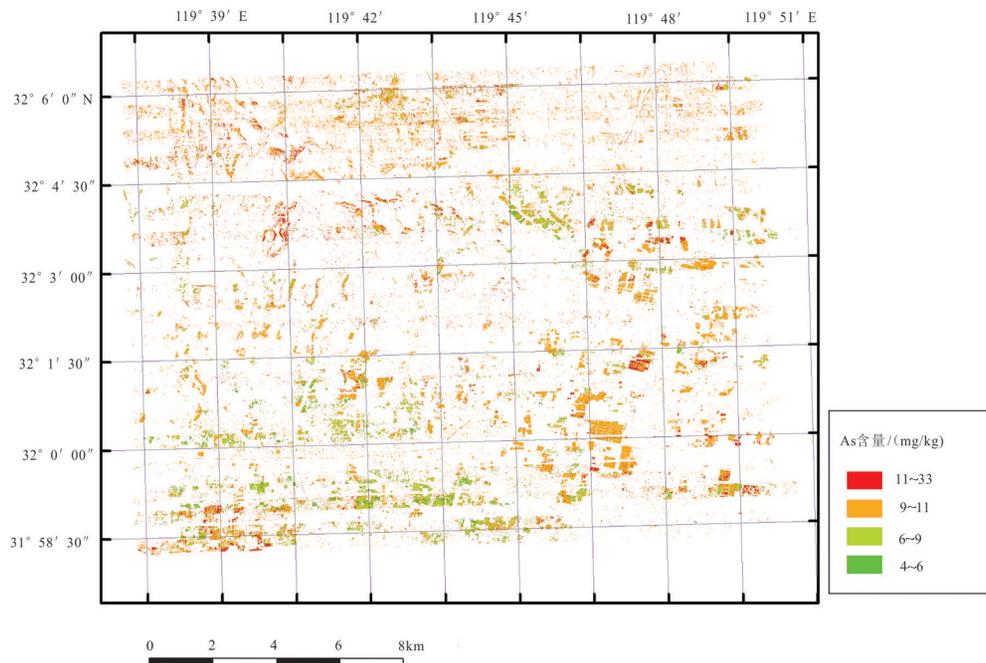


图26 丹阳地区元素As高光谱反演结果图  
Fig.26 Hyperspectral inversion results of element As in the Danyang area

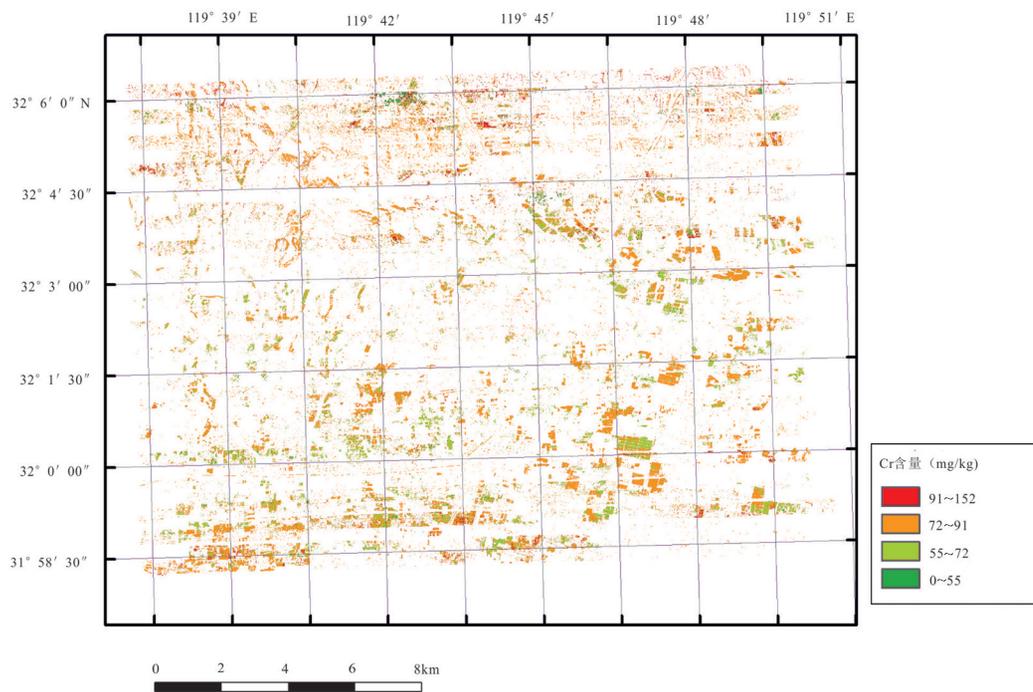


图27 丹阳地区元素Cr高光谱反演结果图  
Fig.27 Hyperspectral inversion results of element Cr in the Danyang area

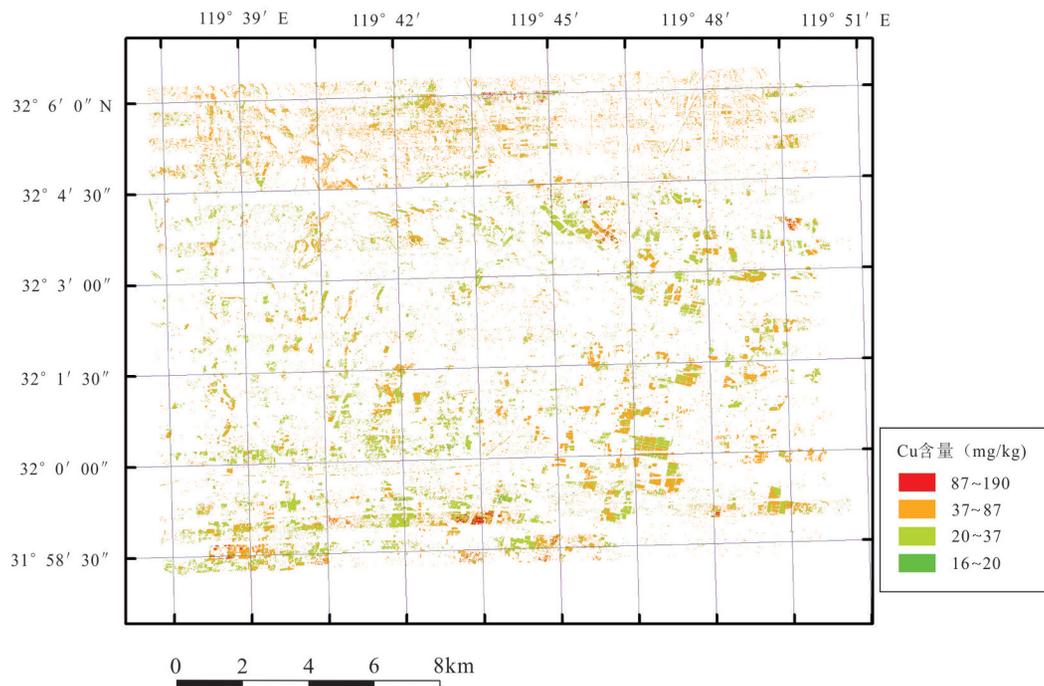


图28 丹阳地区元素Cu高光谱反演结果图  
Fig.28 Hyperspectral inversion results of element Cu in the Danyang area

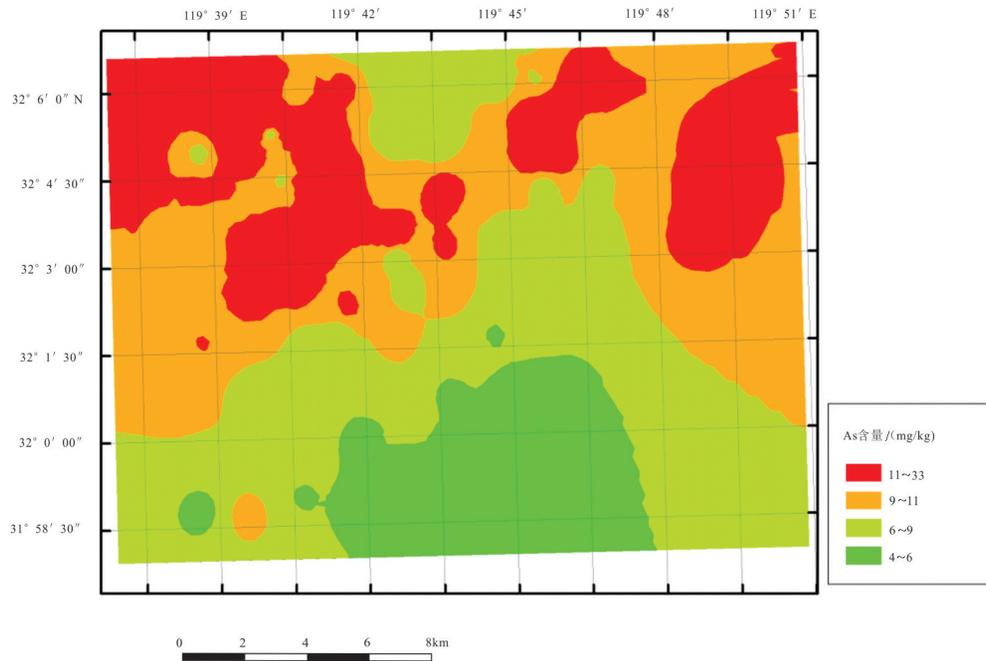


图29 丹阳地区土壤元素As实测插值分析图

Fig.29 Interpolation analysis diagram of measured soil element As in the Danyang area

机载高光谱遥感技术的发展,数据处理方法日益成熟,这项技术被广泛应用于地质调查、环境监测、海洋生态评价、土地质量评估、精准农业、林业生态和城市规划等领域。中国地质调查局南京地质调查中心在国家重大仪器开发专项和国家重点研发计划支持下,成功研制出以推扫式小型化成像光谱仪HMS400/1000为核心的轻型机载高光谱成像系统SSMap,建立了机载高光谱遥感综合调查技术方法

和作业流程,形成了一套可靠的地物分类方法和水土污染光谱定量反演模型。该系统具有快捷、高效和高空间分辨率的特点,已在江苏、安徽、浙江等地进行了生态地质环境调查应用示范,总飞行面积逾4500 km<sup>2</sup>,获得了一批重要成果。研究表明,在生态环境调查、水体监测、土地利用和土地质量评价等方面具有广阔的应用前景。具有自主知识产权的国产化机载高光谱成像仪降低了采购成本,推动了

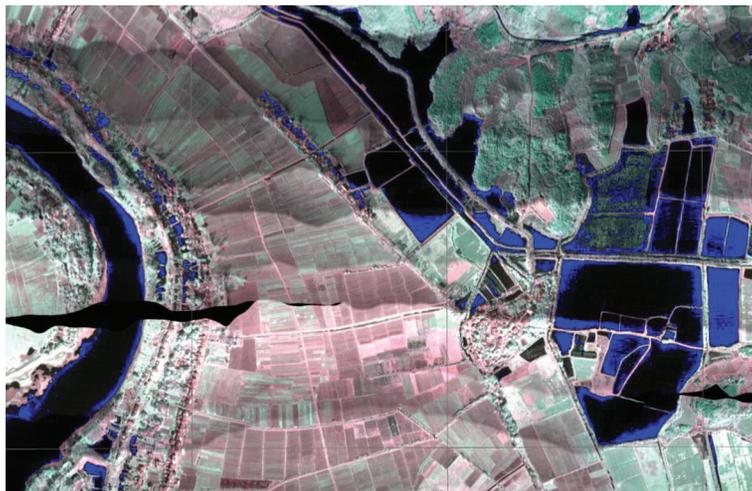


图30 藻类信息(蓝色)分布图

Fig.30 Distribution of algae information (blue)

<http://geochina.cgs.gov.cn> 中国地质, 2021, 48(5)

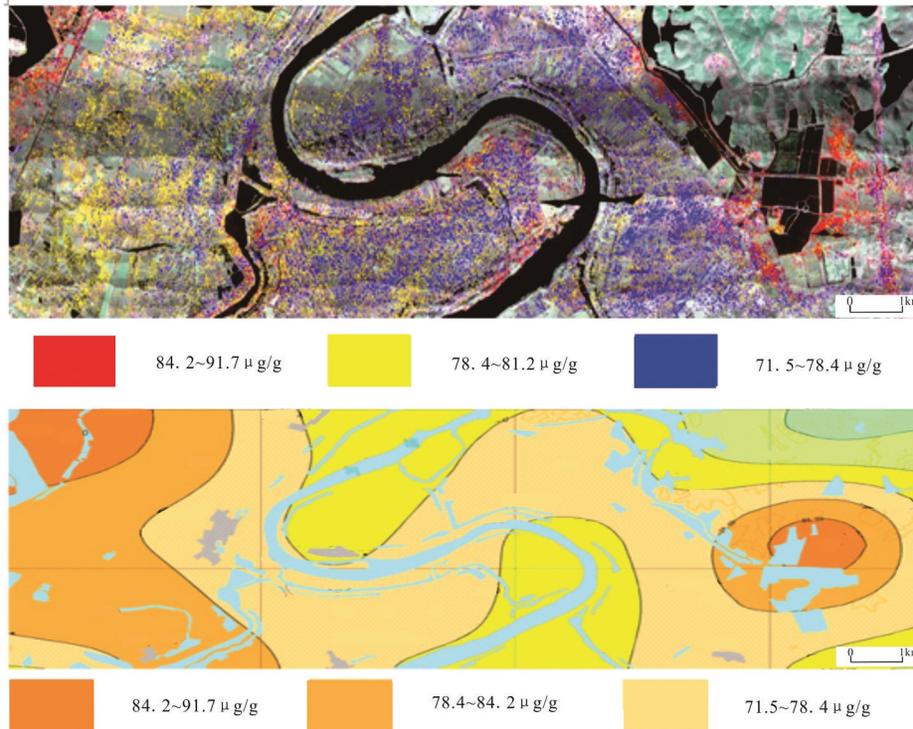


图31 机载高光谱Cr元素反演影像(上)与实际采集土壤样品分析结果(下)对比  
 Fig.31 Comparison of the airborne hyperspectral Cr element inversion image (above) and the actual collected soil samples (below)

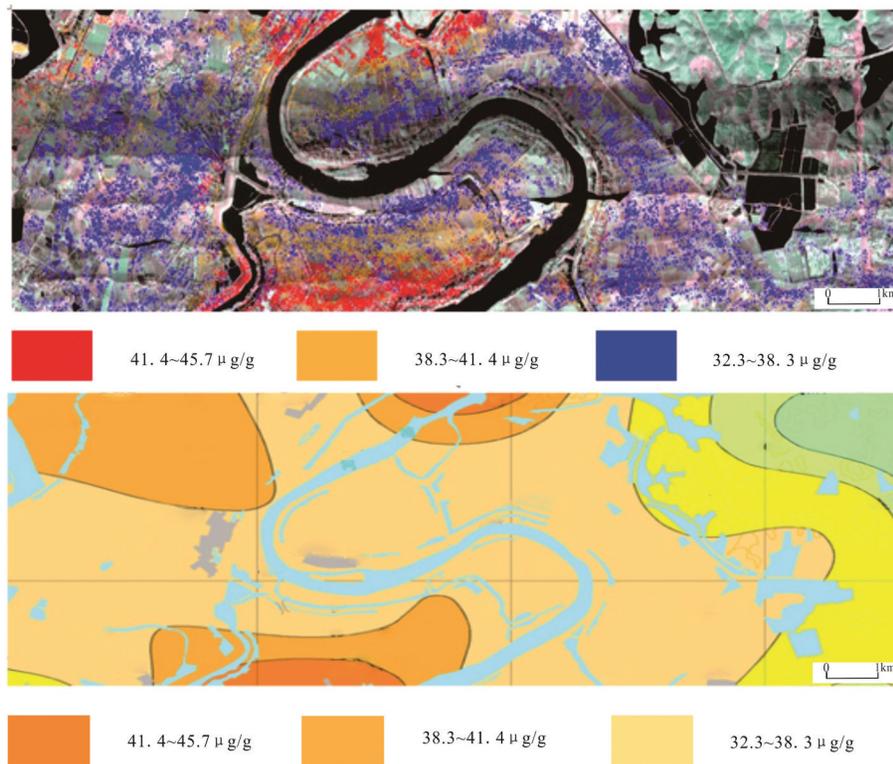


图32 机载高光谱Cu元素反演影像(上)与实际采集土壤样品分析结果(下)对比  
 Fig.32 Comparison of the airborne hyperspectral Cu element inversion image (above) and the actual collected soil samples (below)

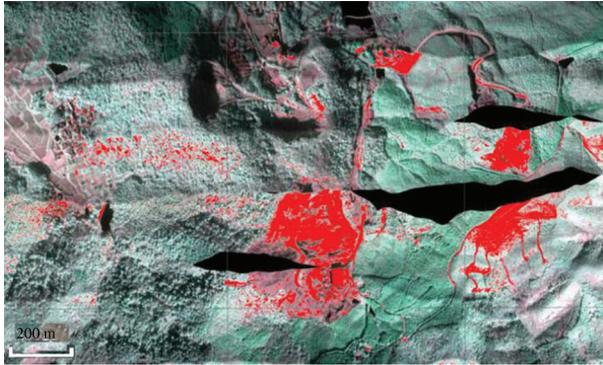


图33 高光谱遥感识别贵池某矿山粉尘(红色区域)污染分布  
Fig.33 Hyperspectral remote sensing to identify the distribution of dust pollution(red area) in some mine in Guichi

机载高光谱技术普及,服务了国家重大区域发展战略,具有显著的经济和社会效益。

## References

- Berger B R, V V King T, Morath L C. 2003. Utility of high-altitude infrared spectral data in mineral exploration: Application to northern Patagonia Mountains, Arizona[J]. *Economic Geology*, 98(5): 1003–1018.
- Ben-dor E, Goldshleger N, Braun O, Kindel B, Goetz A F H., Bonfil D, Margalit N, Binaymini Y, Karnieli A, Agassi M. 2004. Monitoring infiltration rates in semiarid soils using airborne hyperspectral technology[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 25(13): 2607–2624.
- 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.
- Cai Xiang, Li Qi, Luo Yan, Qi Jiandong. 2021. Surface features extraction of mining area image based on object-oriented and deep-learning method[J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 33(1): 63–71(in Chinese with English abstract).
- Cui Qi, Wang Jie, Wang Min. 2018. Water extraction from high-resolution remote sensing imagery based on vector data constraint and object-based image analysis[J]. *Remote Sensing Information*, 33(4): 115–121(in Chinese with English abstract).
- Gan Lu, Wang Suming, Liu Fei, Huo Zhibin. 2010. Development of real-time monitoring and management system for analytical data quality control in groundwater pollution survey[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 29(5): 571–574(in Chinese with English abstract).
- Gan Puping. 2004. Research on the Foundation and Technical Methods of Remote Sensing Rock and Mineral Information Extraction[M]. Beijing: Geological Publishing House, (3): 2–10(in Chinese).
- Jiang Yuehua, Lin Liangjun, Chen Lide, Ni Huayong, Ge Weiya, Cheng Hangxin, Zhai Gangyi, Wang Guiling, Ban Yizhong, Li Yuan, Lei Mingtang, Tan Chengxuan, Su Jingwen, Zhou Quanning, Zhang Taili, Yun Li, Liu Hongying, Ke Peng, Wang Hanmei. 2018. An overview of the resources and environment conditions and major geological problems in the Yangtze River economic zone, China[J]. *China Geology*, 1(2): 435–449.
- Jing Pingping, Li Bin, Jia Zongren. 2017. Research on information extraction based on UAV remote Sensing[J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 40(12): 77–80(in Chinese with English abstract).
- Li Xinxing, Guo Wei, Bai Xuebing, Yang Mingsong. 2021. Review on the application of spectroscopy technology in aquatic product quality detection[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 41(5): 1343–1349(in Chinese with English abstract).
- Li Zhizhong, Yang Rehong, Dang Fuxing. 2009. The hyperspectral remote sensing technology and its application[J]. *Geological Bulletin of China*, 28(2/3): 270–277(in Chinese with English abstract).
- Luo Daihong, Wu Shuqi, Wu Xiaojun, Gan Lu. 2004. The general information system for geological reference materials and standard methods[J]. *Rock and Mineral Analysis*, (3): 216–220 (in Chinese with English abstract).
- Moamen S Refat, Amnah M, Alsuhaibani, Mohamed Nagaty. 2021. Infrared Spectroscopy and Morphological Assessments on the Nutritional Value of Prickly Pear Fruit[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 41(2): 648–653.
- Sun Jiabo, Zhang Xiaoyan, Niu Luyan. 2018. Farmland information extraction method based on high-resolution remotely-sensed images[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 50(3): 132–136, 141 (in Chinese with English abstract).
- Su Longfei, Li Zhenxuan, Gao Fei, Yu Min. 2021. A review of remote sensing image water extraction[J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 33(1): 9–11(in Chinese with English abstract).
- Sun Yu, Zhao Yingjun, Li Hanbo. 2015. HySpex hyperspectral mineral mapping of Asihua gold ore district in Dulan County, Qinghai Province and its prospecting implications[J]. *Acta Geologica Sinica*, 89(1): 195–203(in Chinese with English abstract).
- 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(4): 415–424.
- Wang Ruijun, Zhang Chunlei, Sun Yongbin, Wang Shen, Dong Shuangfa, Wang Yongjun, Yan Bokun. 2020. Application of hyperspectral spectroscopy to constructing polymetallic prospecting model in Hongshan, Gansu Province[J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 32(3): 222–231(in Chinese with English abstract).
- Wang Runsheng, Gan Fuping, Yan Bokun, Yang Suming, Wang Qinghua. 2010. Hyperspectral mineral mapping and its application[J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 22(1): 1–13 (in Chinese with English abstract).
- Wang Runsheng, Xiong Shengqing, Nie Hongfeng, Liang Shuneng, Yang Jinzhong, Yan Bokun, Zhao Fuyue, Fan Jinghui, Tong Liqiang, Lin Jian, Gan Fuping, Chen Wei, Yang Suming, Zhang Ruijiang, Ge Daqing, Zhang Xiaokun, Zhang Zhenhua, Wang Pinqing, Guo Xiaofang, Li Li. 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. Automatic focusing of push-broom hyperspectral camera[J]. *Optics and Precision Engineering*, 27(2): 185–192(in Chinese with English abstract).
- Wu Nengyou, Chang Lingliu, Hao Xiluo. 2018. Experimental simulations and methods for natural gas hydrate analysis in China[J]. *China Geology*, 1(1): 61–71.
- 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(2): 314–338.
- Xiu Liancun, Zheng Zhizhong, Yu Zhengkui. 2009. Study on method of measuring altered minerals in rocks with near-infrared spectrometer[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 28(6): 519–523(in Chinese with English abstract).
- Xiu Liancun, Zheng Zhizhong, Yu Zhengkui, Huang Junjie, Yin Liang, Wang Mijian, Zhang Qiuning, Huang Bin, Chen Chunxia, Xiu Tiejun, Lu Shuai. 2007. Mineral analysis technology application with near infrared spectroscopy in identifying alteration mineral[J]. *Acta Geologica Sinica*, 81(11): 1584–1590(in Chinese with English abstract).
- Yang Sirui, Xue Zhaohui, Zhang Ling. 2018. Fusion of hyperspectral and LiDAR data: A case study for refined crop classification in agricultural region of Zhangye Oasis in the middle reaches of Heihe River[J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 30(4): 33–40(in Chinese with English abstract).
- Zhang Z G, Wang R S. 2000. Development and application of imaging spectral remote sensing technology based on spectroscopy[J]. *Remote Sensing of Land & Resources*, 12(3): 16–37(in Chinese with English abstract).
- Zheng Zhizhong, Yang Zhong, Xiu Liancun, Dong Jinxin, Chen Chunxia, Gao Yang, Yu Zhengkui. 2017. Design of a SWIR offner imaging spectrometer[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 37(7): 2267–2272(in Chinese with English abstract).
- Zheng Zhizhong, Yang Zhong, Xiu Liancun. 2020. Development and application of shortwave infrared convex blazed grating with high diffraction efficiency[J]. *Acta Optica Sinica*, 40(12): 53–61(in Chinese).
- Zheng Zhizhong, Yang Zhong, Qin Yuantian, Wang Ligu. 2020. Structure analysis and experiment of an offner-type short-wave infrared imaging spectrometer[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 57(5): 246–255(in Chinese).
- Zheng Zhizhong, Yang Zhong, Xiu Liancun. 2020. A lock-in amplifier applied to the measurement of weak spectral signals[J]. *Modern Scientific Instruments*, (2): 5–10(in Chinese with English abstract).
- 取[J]. *遥感信息*, 33(4): 115–121.
- 甘露, 王苏明, 刘菲, 霍志斌. 2010. 地下水污染调查样品测试质量远程实时监控管理系统开发[J]. *岩矿测试*, 29(5): 571–574.
- 甘甫平. 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, (3): 2–10.
- 荆平平, 李兵, 贾宗仁. 2017. 基于无人机遥感的信息提取研究[J]. *测绘与空间地理信息*, 40(12): 77–80.
- 李鑫星, 郭渭, 白雪冰, 杨铭松. 2021. 光谱技术在水产品品质检测中的应用研究进展[J]. *光谱学与光谱分析*, 41(5): 1343–1349.
- 李志忠, 杨日红, 党福星. 2009. 高光谱遥感卫星技术及其地质应用[J]. *地质通报*, 28(2/3): 270–277.
- 罗代洪, 吴淑琪, 吴晓军, 甘露. 2004. 地质调查通用标准物质及标准方法信息系統[J]. *岩矿测试*, 3: 216–220.
- 苏龙飞, 李振轩, 高飞, 余敏. 2021. 遥感影像水体提取研究综述[J]. *国土资源遥感*, 33(1): 9–11.
- 孙家波, 张晓艳, 牛鲁燕. 2018. 基于高分辨率遥感影像的耕地信息快速提取方法研究[J]. *山东农业科学*, 50(3): 132–136, 141.
- 孙雨, 赵英俊, 李瀚波. 2015. 青海省都兰县阿斯哈金矿区 HySpex 高光谱矿物填图及其找矿意义[J]. *地质学报*, 89(1): 195–203.
- 王瑞军, 张春雷, 孙永彬, 王洗, 董双发, 王永军, 闫柏琨. 2020. 高光谱在甘肃红山多金属找矿模型构建中的应用[J]. *国土资源遥感*, 32(3): 222–231.
- 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*, 22(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(02): 185–192.
- 修连存, 郑志忠, 俞正奎. 2009. 近红外光谱仪测定岩石中蚀变矿物方法研究[J]. *岩矿测试*, 28(6): 519–523.
- 修连存, 郑志忠, 俞正奎, 黄俊杰, 殷靓, 王弥建, 张秋宁, 黄宾, 陈春霞, 修铁军, 陆帅. 2007. 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*, 81(11): 1584–1590.
- 杨思睿, 薛朝辉, 张玲. 2018. 高光谱与 LiDAR 数据融合研究——以黑河中游张掖绿洲农业区精细作物分类为例[J]. *国土资源遥感*, 30(4): 33–40.
- 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, 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.
- 郑志忠, 杨忠, 修连存. 2020a. 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): 53–61.
- 郑志忠, 杨忠, 秦远田, 王立国. 2020b. 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. 2020c. 一种应用于弱光谱信号测量的锁相放大器件[J]. *现代科学仪器*, (2): 5–10.

## 附中文参考文献

- 蔡祥, 李琦, 罗言, 齐建东. 2021. 面向对象结合深度学习方法的矿区地物提取[J]. *国土资源遥感*, 33(1): 63–71.
- 崔齐, 王杰, 汪闽. 2018. 矢量约束的面向对象高分遥感影像水体提