

序

遥感技术是人类认识地球系统、获取资源环境信息和支撑科学决策的重要手段。面对全球气候变化、生态退化、资源约束趋紧等复杂挑战，人们对地球表层变化过程的精细观测与定量认知提出了更高要求。传统宽波段遥感在宏观监测中发挥了重要作用，但在地物组成复杂、光谱差异细微的场景下仍存在一定局限。高光谱遥感兼具空间成像与连续光谱探测能力，能够更细致地刻画地物的组成、结构和状态差异，为地物精细识别、理化参数反演和资源环境监测提供了新的技术途径。

近年来，联合国《2030 年可持续发展议程》、IPCC 第六次评估报告以及我国生态文明建设、数字中国建设、自然资源调查监测等工作，都对客观、连续、精细的地球观测数据提出了迫切需求。随着高分五号、资源一号 02D/02E 等国产高光谱卫星投入应用，我国高光谱遥感数据获取能力不断提升，为自然资源调查、生态环境监管、农林业监测和海岸带管理等提供了新的数据条件。

然而，数据获取能力的提高，并不意味着应用效能会自然形成。高光谱图像波段多、维度高、数据量大，相邻波段冗余度高，同时还受到噪声、混合像元、光谱变异和标记样本不足等因素制约。高光谱遥感的应用价值，最终取决于能否把复杂的原始观测数据转化为可靠的专题信息和可服务决策的知识产品。这一过程涉及数据质量控制、特征表达、模型构建、精度评价和应用验证等多个环节，是当前高光谱遥感教学、科研和工程应用中需要重点关注的问题。

孙伟伟等同志编著的《高光谱遥感图像处理方法与应用》，围绕上述问题进行了较为系统的梳理。该书从高光谱遥感的发展历程、主要数据源和基本处理流程入手，介绍了图像预处理、影像融合、影像数据降维、图像分类、异常检测、图像解混和变化分析等关键内容，并结合红树林精细制图、城市水质精细调查、海岸带资源精细调查和农作物精细分类制图等案例，展示了高光谱遥感图像处理从基础方法到实际应用的基本链条。该书中既有对算法原理的阐释，也有基于国产卫星数据和典型应用场景的案例分析，有助于读者理解高光谱遥感图像处理的技术体系和应用路径。

教材和专著是学科积累、知识传承和人才培养的重要载体。高光谱遥感涉及遥感物理、光谱成像、图像处理、模式识别、人工智能和资源环境应用等多个方向，是一门交叉性很强的学科。对于青年学生而言，学习高光谱遥感不仅要掌握方法和工具，更要理解数据特点、物理基础和应用约束；对于科研人员和工程技

术人员而言，需要在真实场景中检验方法的有效性和适用性。该书在理论、方法和案例之间建立了较好的联系，有助于读者形成对高光谱遥感图像处理方法与应用体系的整体认识。

相信该书可为遥感科学与技术、测绘科学与技术、地理信息科学等相关专业教学提供有益参考，也可为自然资源、生态环境、海岸带监测等领域的科研与技术人员提供借鉴。希望更多青年学子通过该书了解高光谱遥感，进入这一前沿方向，并在服务国家重大需求的实践中推动我国遥感科学与技术不断发展。



中国科学院院士

2026年6月

前 言

高光谱遥感技术既能测谱又能成像，是对地观测的重大技术突破之一，也是全球经济产生重大影响的颠覆性技术。独特的“图谱合一”特性和光谱分辨率高的优势，使其具有广阔的应用前景和重要的战略意义。然而，受影像噪声大、光谱波段多、空间分辨率低、光谱变异明显、标记样本有限等因素制约，海量高维高光谱数据处理难度较大且实际应用效果欠佳。本书主要分为三个板块，依次阐述了高光谱遥感图像数据质量提升、高光谱遥感图像处理算法、高光谱遥感图像典型应用。

本书第1章介绍了高光谱遥感的起源、主要数据源、主要处理流程和主要应用场景，由宁波大学孙伟伟编写；第2章介绍了高光谱遥感图像预处理方法，由宁波大学孙伟伟和杨刚编写；第3章介绍了多源遥感影像融合方法及其在国产卫星数据上的典型应用，由宁波大学孙伟伟和孟祥超编写；第4章介绍了影像数据降维，由宁波大学孙伟伟和湖北大学彭江涛编写；第5章介绍了高光谱遥感图像分类，由湖北大学彭江涛编写；第6章介绍了高光谱遥感图像异常检测，由深圳大学贾森编写；第7章介绍了高光谱遥感图像解混，由湖北大学彭江涛编写；第8章介绍了高光谱遥感图像变化分析，由武汉大学钟燕飞编写；第9章介绍了高光谱遥感图像在红树林精细制图中的应用，由宁波大学孙伟伟和杨刚编写；第10章介绍了高光谱遥感图像在城市水质精细调查中的应用，由深圳大学贾森、何汝艳编写；第11章介绍了高光谱遥感图像在海岸带资源精细调查中的应用，由宁波大学孙伟伟编写；第12章介绍了高光谱遥感图像在农作物精细分类制图中的应用，由武汉大学钟燕飞编写。全书由宁波大学孙伟伟和湖北大学彭江涛联合统稿。湖北大学彭江涛和宁波大学李慧洋、翁佳雯、冯雨欣、张佳文负责图表、格式审查。多位硕士研究生直接参与了书中部分研究工作，包括宁波大学常明会、黄可、何珂、刘凯、周骏、袁艺，湖北大学刘泉涌、黄怡、宁羽杰，深圳大学刘宽、王一帆等。

高光谱遥感技术发展迅速，在生态环境、水质监测、国土调查、农林业、城市信息提取等领域的前沿技术方法有待进一步深入和拓展。作者期望本书的问世，使广大读者对高光谱遥感图像处理方法与实际应用有新的了解。同时，也希望本

书的出版能起到抛砖引玉的作用，引发广大学者对这一领域新的关注和兴趣，推动高光谱遥感技术进一步发展。鉴于作者学术水平有限，内容难免存在疏漏之处，恳请读者批评指正。

孙伟伟 彭江涛 钟燕飞 贾 森

2026 年 3 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 高光谱遥感的起源	1
1.1.1 高光谱遥感的发展历程	1
1.1.2 高光谱遥感的概念	1
1.1.3 高光谱遥感的特点	1
1.2 高光谱遥感主要数据源	2
1.2.1 国际主流高光谱卫星	2
1.2.2 中国高光谱卫星发展历程	4
1.3 高光谱遥感图像的主要处理流程	4
1.3.1 正射校正、辐射定标与大气校正	5
1.3.2 影像去噪	5
1.3.3 数据降维	5
1.3.4 光谱解混	6
1.4 高光谱遥感的主要应用场景	7
1.4.1 在植被中的应用	7
1.4.2 在水体中的应用	7
1.4.3 在农业中的应用	8
1.4.4 在矿业中的应用	8
参考文献	8
第 2 章 高光谱遥感图像预处理	11
2.1 影像辐射校正	11
2.1.1 辐射校正概述	11
2.1.2 成像光谱仪定标	11
2.1.3 基于 ENVI 软件的辐射定标	13
2.2 影像大气校正	14
2.2.1 大气辐射传输理论	15
2.2.2 基于统计模型的相对大气校正	17
2.2.3 基于大气辐射传输模型的绝对大气校正	18
2.2.4 基于 ENVI 软件的大气校正	18
2.3 影像几何校正	23

2.3.1	几何畸变的原因	23
2.3.2	几何粗校正	24
2.3.3	几何精校正	24
2.3.4	基于 ENVI 软件的几何校正	24
2.4	影像去噪	26
2.4.1	噪声产生的原因	27
2.4.2	去噪方法	28
2.4.3	基于 ENVI 软件的影像去噪	28
2.5	资源卫星实验数据	30
2.6	影像预处理案例结果与分析	32
2.6.1	辐射定标结果与分析	32
2.6.2	大气校正结果与分析	33
2.6.3	正射校正结果与分析	34
2.6.4	影像去噪结果与分析	34
	参考文献	36
第 3 章	影像融合	38
3.1	影像融合理论	38
3.1.1	影像融合概念	38
3.1.2	影像融合的发展	38
3.2	主流融合方法	39
3.2.1	成分替换类融合方法	39
3.2.2	多分辨率分析类融合方法	45
3.3	太湖研究区及高分影像数据	50
3.3.1	太湖研究区	50
3.3.2	案例数据介绍	51
3.4	太湖高分影像案例结果分析	52
3.4.1	融合结果分析	52
3.4.2	应用结果分析	54
3.5	本章小结	57
	参考文献	58
第 4 章	影像数据降维	60
4.1	影像数据降维理论	60
4.1.1	高光谱遥感图像的数据特点	60
4.1.2	高光谱影像数据降维的必要性	60
4.2	高光谱遥感图像波段选择	61

4.2.1 基于排序的波段选择方法	62
4.2.2 基于搜索的波段选择方法	63
4.2.3 基于聚类的波段选择方法	64
4.2.4 基于稀疏的波段选择方法	65
4.3 高光谱遥感图像特征提取	67
4.3.1 光谱特征提取方法	68
4.3.2 空谱联合特征提取方法	74
4.4 高光谱影像数据降维实验结果	78
4.4.1 实验数据集	78
4.4.2 案例评价指标	79
4.4.3 波段选择结果	80
4.4.4 特征提取结果	82
4.5 本章小结	85
参考文献	85
第5章 高光谱遥感图像分类	89
5.1 光谱分类方法	90
5.1.1 支持向量机	90
5.1.2 随机森林	92
5.1.3 稀疏表示	94
5.2 空谱联合分类方法	95
5.2.1 组合核支持向量机	95
5.2.2 联合稀疏表示	96
5.2.3 联合协同表示	97
5.3 深度学习分类方法	98
5.3.1 卷积神经网络	98
5.3.2 残差网络	100
5.4 高光谱遥感图像分类实验	101
5.4.1 评价指标	101
5.4.2 分类算法测试结果	102
5.5 本章小结	103
参考文献	103
第6章 高光谱遥感图像异常检测	106
6.1 异常检测理论	106
6.1.1 异常检测背景介绍	106
6.1.2 异常检测理论基础	106

6.2	主流异常检测方法	109
6.2.1	基于统计的异常检测方法	109
6.2.2	基于表示的异常检测方法	110
6.2.3	基于聚类的异常检测方法	111
6.2.4	基于深度学习的异常检测方法	112
6.3	影像异常检测案例数据	114
6.3.1	ABU 数据集	114
6.3.2	San Diego 数据集	117
6.3.3	HYDICE urban 数据集	118
6.4	影像异常检测案例结果与分析	118
6.4.1	对比方法及评价指标	118
6.4.2	结果及分析	119
6.5	本章小结	128
	参考文献	129
第 7 章	高光谱遥感图像解混	133
7.1	高光谱遥感图像解混理论	133
7.2	端元提取方法	134
7.2.1	纯像元指数方法	134
7.2.2	内部最大体积法	134
7.2.3	顶点成分分析	134
7.3	丰度估计方法	135
7.3.1	全约束最小二乘法	135
7.3.2	变量分离和增广拉格朗日的稀疏解混法	137
7.3.3	协同稀疏回归	138
7.4	端元和丰度同时估计方法	140
7.4.1	非负矩阵分解	140
7.4.2	$\mathcal{L}_{1/2}$ 非负矩阵分解	140
7.4.3	$\mathcal{L}_{2,1}$ 非负矩阵分解	141
7.4.4	图正则 $\mathcal{L}_{1/2}$ 非负矩阵分解	141
7.4.5	鲁棒协同非负矩阵分解	142
7.5	影像解混案例结果与分析	142
7.5.1	性能评价指标	142
7.5.2	对比算法	143
7.5.3	人工数据实验及分析	143

7.5.4 真实数据案例及分析	145
7.6 本章小结	149
参考文献	149
第8章 高光谱遥感图像变化分析	151
8.1 影像变化分析理论	151
8.1.1 遥感影像变化检测	152
8.1.2 遥感影像变化检测精度评价方法	155
8.2 主流变化分析方法	157
8.2.1 变化向量分析法	157
8.2.2 图像回归法	158
8.2.3 光谱角相似法	158
8.2.4 差分主成分分析法	159
8.2.5 多元变化检测法	159
8.2.6 深度慢特征分析法	160
8.3 影像变化分析案例数据与设置	160
8.3.1 珠海一号与 Sentinel 2A 的变化检测数据集构建	160
8.3.2 案例设置	162
8.4 影像变化分析案例结果与分析	163
8.4.1 Sentinel 2A 卫星变化检测数据集实验结果	163
8.4.2 珠海一号变化检测数据集实验结果	164
8.4.3 两种数据集结果对比与分析	165
8.5 本章小结	167
参考文献	168
第9章 红树林精细制图应用	170
9.1 红树林精细制图的必要性	170
9.1.1 红树林的重要性	170
9.1.2 红树林退化、消失的现状	171
9.1.3 红树林精细制图的意义	171
9.2 红树林精细制图流程	171
9.2.1 红树林与其他植被的光谱曲线对比	172
9.2.2 增强型红树林植被指数的计算	174
9.2.3 基于增强型红树林植被指数的红树林提取流程	174
9.2.4 基于 ENVI 软件的红树林提取	175
9.3 红树林精细制图案例数据	188
9.3.1 研究区概况	188

9.3.2	ZY1-02D 高光谱遥感图像	189
9.3.3	样本数据集	189
9.3.4	辅助数据集	189
9.3.5	红树林参考地图	190
9.4	红树林精细制图案例结果与分析	191
9.4.1	基于 EMVI 的红树林提取结果	191
9.4.2	与红树林参考地图及 SVM 分类结果的对比	191
	参考文献	193
第 10 章	城市水质精细调查	195
10.1	水质精细调查的必要性	195
10.1.1	水质精细调查研究背景与意义	195
10.1.2	水质精细调查国内外研究现状	196
10.2	城市水质精细调查案例数据	197
10.2.1	案例研究区概况	197
10.2.2	数据采集设备	198
10.2.3	高光谱数据	199
10.3	城市水质精细调查流程	200
10.3.1	数据预处理	200
10.3.2	河流水体提取	201
10.3.3	水质参数反演	203
10.4	城市水质精细调查案例结果与分析	205
10.4.1	叶绿素 a 反演结果	207
10.4.2	总悬浮固体反演结果	209
10.4.3	总氮反演结果	211
10.4.4	总磷反演结果	213
10.4.5	氨氮反演结果	215
10.4.6	化学需氧量反演结果	217
10.5	本章小结	219
	参考文献	219
第 11 章	海岸带资源精细调查	221
11.1	海岸带资源精细调查研究进展	221
11.1.1	海岸带资源精细调查的重要性	221
11.1.2	海岸带资源精细调查的研究现状	223
11.2	海岸带高光谱遥感资源精细调查研究进展	226
11.2.1	传统野外调查方法	226

11.2.2	基于像素分类的海岸带资源精细调查方法	226
11.2.3	面向对象的海岸带资源精细调查方法	227
11.3	空谱融合的海岸带高光谱遥感资源精细制图	230
11.3.1	海岸带湿地制图数据与区域概况	230
11.3.2	海岸带湿地制图方法	232
11.3.3	湿地制图结果与分析	236
11.4	本章小结	240
	参考文献	241
第 12 章	农作物精细分类制图	246
12.1	农作物制图的必要性	246
12.1.1	农作物制图的需求	246
12.1.2	高光谱遥感农作物精细分类制图优势	247
12.2	高光谱遥感农作物精细分类制图技术流程	247
12.2.1	数据获取与预处理	247
12.2.2	基于光谱特征的作物分类	254
12.2.3	基于空谱融合特征的作物分类	254
12.3	农作物精细分类制图案例数据	257
12.3.1	航空机载高光谱农作物精细分类制图数据集	257
12.3.2	低空无人机载高光谱农作物精细分类制图数据集	259
12.4	农作物精细分类制图案例结果与分析	261
12.4.1	农作物精细分类制图可视化分析	262
12.4.2	农作物精细分类制图定量结果分析	263
	参考文献	264

第 1 章 绪 论

1.1 高光谱遥感的起源

1.1.1 高光谱遥感的发展历程

20 世纪 80 年代, 高光谱遥感技术首次出现, 其产生于美国加州理工学院提出的“成像光谱仪研究计划”。1983 年, 世界上首台高光谱成像仪 AIS-1 在美国研制成功, 并在矿物填图和植被生化特征等研究方面取得了重大成功, 这使得高光谱遥感技术在世界范围内被重视起来^[1]。之后, 在美国航空航天局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 的支持下, 美国相继推出了一系列高光谱传感器产品, 如机载可见光/红外成像光谱仪 (airborne visible/infrared imaging spectrometer, AVIRIS)、EO-1 Hyperion 高光谱传感器等, 并在此后掀起了世界范围内的高光谱传感器研究浪潮, 如德国的机载反射光学系统成像光谱仪 (reflective optics system imaging spectrometer, ROSIS)、澳大利亚的高光谱制图仪 (hyperspectral mapper, HyMap)、日本的先进陆地观测卫星 3 号 (ALOS-3, 又称大地 3 号)、中国的高分五号 (GaoFen-5, GF-5) 和资源一号 02D 卫星 (ZY1-02D) 等。

1.1.2 高光谱遥感的概念

随着科技进步, 卫星传感器性能不断提升, 从最开始仅可获取一个波段的全色影像, 到捕获多个波段的多光谱影像, 再到可同时捕获同一地物上百个波段的高光谱影像, 其光谱分辨率在不断提升^[2]。通常将光谱范围可覆盖 400~2500 nm, 光谱分辨率为 5~20 nm, 波段数量在 100 个以上的影像称为高光谱影像。高光谱影像的应用领域大大广于全色和多光谱影像, 这具有非常重要的应用价值与意义^[3]。

1.1.3 高光谱遥感的特点

相较于其他遥感影像, 高光谱遥感图像具有数十至数百个连续的灰度图像, 且每一个像元都对应一条光谱曲线。高光谱成像技术把传统的二维图像技术和光谱技术紧密地结合在一起, 在获取地物空间信息的同时, 按波长排列被测物的辐

射能量, 获取一个光谱区间内几百个连续的窄波段信息。高光谱数据具有以下 4 个特点。

(1) 光谱分辨率高、波段多, 在某一光谱段范围内连续成像。高光谱成像光谱仪响应的电磁波长一般覆盖 400~2500 nm, 从可见光延伸到近红外甚至到中红外。一般而言, 高光谱成像光谱采样间隔达到纳米级 (如 10 nm), 这使得在光谱域内分析研究地物的物理化学特性成为可能。由于高光谱遥感数据是在连续的光谱波长上采集的, 其观测的光谱值是连续的, 且光谱分辨率越高, 光谱值越连续。

(2) “图谱合一”。高光谱遥感数据是具有两个空间维和一个光谱维的三维数据体, 包含了地物丰富的空间和光谱信息, 这些信息既表现了地物的空间分布, 同时也能以其中某一像元或像元组为目标获得它们的辐射强度以及光谱特征。采集的高光谱遥感数据不仅可以用来与地面实测的同类地物光谱曲线相类比, 研究地物特性, 同时还可以利用其空间信息研究地物分布及含量。

(3) 空间分辨率较低。高光谱遥感成像光谱仪具有较高的光谱分辨率, 为了保证进入电荷耦合器件 (CCD) 的光强够强和平台运动匀速, 其单个像素对应的空间尺寸就不能过小, 这也导致了高光谱遥感图像的空间分辨率较低。

(4) 数据量巨大, 波段冗余性较高。高光谱遥感数据在可见光到近红外电磁波谱内, 以约 10 nm 的间隔连续成像, 其波段众多, 数据量巨大。另外, 相邻波段之间的相关性极高, 数据的冗余性也极大。高光谱极高的光谱分辨率为诊断地物的物理化学特性提供了可能, 同时数据的冗余也给数据的存储、压缩、传输和应用带来巨大的挑战。

1.2 高光谱遥感主要数据源

1.2.1 国际主流高光谱卫星

1) EOS AM-1

EOS AM-1 卫星, 即赫赫有名的 Terra 卫星, 于 1999 年 12 月 18 日发射, 是美国对地观测系统 (earth observation system, EOS) 计划中的第一颗卫星, 亦是全球第一颗装载有著名中分辨率成像光谱仪 (MODIS) 传感器的卫星。

2) MightySat-2.1

MightySat-2.1 卫星是美国空军 Phillips 实验室的第一颗 MightySat II 卫星 [现 Phillips 实验室已与 Armstrong 等其他美国空军实验室合并为美国空军研究实验室 (Air Force Research Laboratory, AFRL)], 于 2000 年 7 月 19 日在美国范登堡空军基地发射升空。

3) EO-1

地球观测卫星-1 (earth observing-1, EO-1) 是美国航空航天局新千年计划 (new millennium program, NMP) 地球探测部分中的第一颗对地观测卫星, 其目的是在 21 世纪接替 Landsat-7 卫星, 于 2000 年 11 月发射升空。

4) PROBA-1

PROBA 系列卫星计划又称“星上自主项目”, 是欧洲航天局 (European Space Agency, ESA) “通用支持技术计划” (general support technology plan, GSTP) 的技术演示卫星; 其多为小型、低成本卫星, 用来验证其平台是否适合小型科研和应用任务, 包括 PROBA-1~PROBA-3 与 PROBA-V 四颗卫星。其中, PROBA-1 由比利时设计、建造, 并于 2001 年 10 月 22 日发射。

5) ADEOS-2

先进地球观测卫星 (advanced earth observing satellite, ADEOS, 又称环境观测技术卫星) 2 号 (ADEOS-2) 是日本于 21 世纪初期, 对其地球观测平台技术卫星的进一步发展。这一卫星于 2002 年 12 月 14 日成功发射升空。

6) ISS DESIS

由德国航空航天中心 (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, DLR) 与美国特利丹 (Teledyne) 公司运营的地球传感成像光谱仪 (DLR earth sensing imaging spectrometer, DESIS) 于 2018 年 7 月通过 SpaceX 猎鹰 9 号火箭发射升空后, 抵达国际空间站 (International Space Station, ISS), 并在 ISS Teledyne 的地球传感多用户系统 (multi-user system of earth sensing, MUSES) 平台内运行。

7) HysIS

高光谱成像光谱仪 (hyper spectral imaging spectrometer, HysIS) 卫星是印度空间研究组织 (Indian Space Research Organisation, ISRO) 于 2018 年 11 月 29 日发射的地球高光谱观测卫星。

8) PRISMA

高光谱先驱应用任务 (precursore iperspettrale della missione applicativa, PRISMA) 卫星于 2019 年 3 月 21 日, 由意大利航天局 (Agenzia Spaziale Italiana, ASI) 在法属圭亚那库鲁航天中心发射升空。

9) EnMAP

环境测绘与分析计划 (environmental mapping and analysis program, EnMAP) 卫星是德国航空航天中心 (DLR) 设计的高光谱对地观测卫星, 于 2022 年 4 月 1 日晚间搭乘 SpaceX 猎鹰 9 号火箭从佛罗里达州卡纳维拉尔角发射进入太空。

1.2.2 中国高光谱卫星发展历程

1) 高分五号

高分五号 (GaoFen-5, GF-5) 是我国首颗高光谱综合观测卫星, 于 2018 年 5 月 9 日发射升空, 搭载包括可见短波红外高光谱相机和全谱段光谱成像仪在内的 6 台载荷。

2) 高分五号 02 星

高分五号 02 星 (GF5-02) 由上海航天技术研究院 (Shanghai Academy of Spaceflight Technology, SAST) 研发, 于 2021 年 9 月 7 日搭载长征四号丙运载火箭在太原发射升空。

3) 资源一号 02D 卫星

资源系列卫星是我国的地球资源探测卫星, 从 20 世纪 80 年代开始研制。资源一号 02D 卫星 (ZY1-02D) 于 2019 年 9 月 12 日发射升空, 是我国首颗民用高光谱业务卫星。

4) 资源一号 02E 卫星

资源一号 02E 卫星 (ZY1-02E) 由中国航天科技集团公司五院研制, 于 2021 年 12 月 26 日在太原卫星发射中心由长征四号丙运载火箭成功发射升空。

5) 环境一号 A/B

环境一号 A/B (HJ-1A/B) 卫星于 2008 年 9 月 6 日发射升空。HJ-1A 卫星搭载了 2 台宽覆盖多光谱可见光相机和 1 台高光谱成像仪。

6) 珠海一号

珠海一号卫星是由珠海航宇微科技股份有限公司发射并运营的商业遥感微纳卫星星座。02 组卫星于 2018 年 4 月 26 日发射升空, 包含 4 颗高光谱卫星 (OHS-01/02/03/04) 和 1 颗高分辨率视频卫星 (OVS-2); 03 组卫星于 2019 年 9 月 19 日发射升空, 联合 02 组卫星实现国内首次高光谱卫星组网运行。

7) 高光谱综合观测卫星

高光谱综合观测卫星 (GF5-01A) 是高分辨率对地观测系统重大专项天基系统的重要组成部分和收官卫星, 于 2022 年 12 月 9 日成功发射, 卫星上搭载有可见短波红外高光谱相机、大气痕量气体差分吸收光谱仪和宽幅热红外成像仪 3 台有效载荷。2023 年 11 月完成在轨测试总结评审, 2024 年 1 月 23 日正式投入使用。

1.3 高光谱遥感图像的主要处理流程

由于高光谱遥感数据大多为原始影像数据, 所以需要进行正射校正、辐射定标、大气校正等数据预处理。此外, 高光谱遥感数据包含较多的波段, 细碎的波

段包含了很多噪声,对影像进行去噪是十分必要的;而且高光谱遥感数据量较大,波段运算需要较长的时间,通过波段选择和特征降维等手段,一方面可有效地利用影像中最有价值的信息,另一方面可提升计算效率^[4]。本节主要介绍了高光谱遥感数据的预处理流程及关键环节,主要包括正射校正、辐射定标、大气校正、影像去噪、数据降维、光谱解混。

1.3.1 正射校正、辐射定标与大气校正

由于卫星传感器在成像过程中地理坐标会发生畸变,在实际应用中会产生严重的影响,因此对影像进行正射校正是非常必要的。同时,卫星传感器所获取的数据为数字影像,用灰度值来呈现,并不能反映地物的真实反射率,对影像进行辐射定标可将数字图像转换为用来表示地物真实反射率的遥感影像。此外,受成像条件影响,如光照、天气等,遥感影像质量受到一定影响,通过大气校正可进一步提升影像质量,进一步规范影像的反射率。这些步骤可通过 ENVI 软件工具实现。

1.3.2 影像去噪

高光谱遥感图像包含较多波段,其中存在很多受水汽吸收严重影响的波段,这些波段受云和天气的影响,噪声较大,并给后续的数据应用带来困难,因此影像去噪是十分必要的^[5-9]。传统方法通过对影像滤波进行去噪,如均值滤波^[5]、Savitzky-Golay 滤波^[6]等,而比较先进的方法包括基于学习字典的稀疏冗余表达方法(sparse and redundant representations over learned dictionaries, SRROLD)^[7]、张量字典学习模型(tensor dictionary learning model, TensorDL)^[8]、低秩张量近似(low-rank tensor approximation, LRTA)^[9]等,以及一些深度学习去噪方法^[10,11]。

1.3.3 数据降维

随着成像光谱仪技术的发展,高光谱传感器可同时收集数百个窄带的地物光谱信息^[10]。由于光谱分辨率高,高光谱遥感图像可以利用细微的光谱差异更好地区分地物,使得它在生物物理参数检索、复杂环境精细分类、小目标检测等许多实际应用中发挥巨大潜力^[12,13]。然而,高光谱遥感数据量较大,由此产生的高计算成本使得使用它变得困难,同时也使得为多光谱遥感影像设计的常用图像处理算法失效。特别是高光谱遥感数据的高维性带来的维数灾难问题,即在固定的、少量的训练样本下,高光谱遥感数据的分类精度随着数据维数的增加而降低^[14]。因此,对高光谱遥感数据进行降维是非常必要的。

当前对影像数据进行降维的方法主要有两大类:基于特征变换的方法,如主

成分分析 (principal component analysis, PCA) 方法等; 基于波段选择的方法, 该方法又可分为六类, 包括基于排序的方法、基于搜索的方法、基于聚类的方法、基于稀疏的方法、基于嵌入学习的方法和基于混合方案的方法^[15]。特征变换和波段选择的源码可从网上找到, 大多通过 MATLAB 软件运行。

1.3.4 光谱解混

传感器设计无法同时兼顾高空间分辨率和高光谱分辨率, 高光谱遥感图像通常具有较低空间分辨率^[16], 这导致影像单个像元中存在两种及以上地物, 从而形成混合像元。高光谱遥感图像中普遍存在混合像元 (图 1.1), 导致影像中像元级的地物分类识别变得困难和不准确, 影响了影像分类精度和目标探测效果。光谱解混技术可以很好地解决这一问题。它将高光谱遥感图像的混合像元分解为纯净的物质光谱 (端元, endmember) 和每种物质光谱所对应的混合比例 (丰度, abundance), 为获取和分析更精细的光谱提供了条件。因此, 光谱解混技术是实现高光谱遥感技术定量化研究的重要条件, 在高光谱遥感图像的理论和应用上具有重要的实际意义。

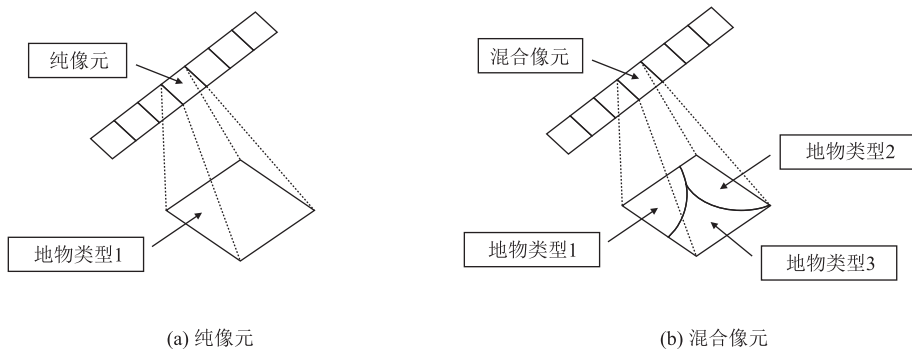


图 1.1 纯像元与混合像元示意图

传统的高光谱遥感图像解混方法包括基于几何的方法、基于统计的方法和基于稀疏的方法^[17]。基于几何的方法通过假设光谱数据的所有像元分布在高维单形体空间或是在一个正的凸锥区域对影像进行解混; 基于统计的方法通过利用参数估计技术来决定端元集和丰度矩阵^[18]; 基于稀疏的方法以光谱库作为字典, 并将混合像元在光谱库字典上进行线性表示, 求解稀疏回归系数^[19]。高光谱遥感图像解混源码可从网上找到, 大多通过 MATLAB 软件运行。

1.4 高光谱遥感的主要应用场景

更多的波段数量与更高的光谱分辨率使得高光谱遥感数据可以对地物进行更加精细的监测与绘图。因此,近年来高光谱遥感在越来越多的领域得到了广泛的应用。例如,植被的各种物理生化参数的反演、水质参数定量反演及水华灾害监测、农作物生长监测及产量预估、岩矿识别与地质解译等。

1.4.1 在植被中的应用

高光谱遥感数据在全波段具备更为丰富的光谱信息,可反映植被不同生物物理特性的细微变化。同时,在表征植被典型特征的相关波段范围(如红边、绿峰、蓝边等),高光谱遥感数据具有多光谱遥感数据无法感知的细节光谱信息,因此,利用高光谱遥感数据可以构建更精细有效的植被指数,以加强植被特征提取效果。同时,高光谱遥感数据能够记录植物体内各种生化组分对不同波长电磁波的选择性吸收特征。因此,可利用高光谱遥感数据进行植被的各种物理生化参数的反演。高光谱遥感数据应用于植被特征参数反演的研究主要包括生化组分参数反演,如叶绿素(chlorophyll, Chl)、类胡萝卜素(carotenoid, Car)、氮素(nitrogen, N)等;生物物理参数反演,如叶面积指数(leaf area index, LAI)等;植被与环境相互作用因素反演,如日光诱导叶绿素荧光(solar-induced chlorophyll fluorescence, SIF)、光合有效辐射吸收比例(fraction of absorbed photo synthetically active radiation, FPAR)等^[20]。

1.4.2 在水体中的应用

近年来高光谱遥感在水生态以及水环境方面的应用逐渐增多,在水华、水生植物监测以及水质参数定量反演等方面精度越来越高,在光谱差异较小的不同水生植物精准识别中也取得了一定突破。在水灾害与水资源等研究中,现阶段高光谱遥感的应用较少,但也在缩短洪水响应时间、识别洪水淹没区域以及提高水文数据的反演精度中发挥了一定的作用,具有一定的发展潜力^[21]。

高光谱遥感可获取水体中不同物质的光谱特征,因而对具有显著光谱特征的水体要素反演效果较好,其原理为:对叶绿素a和悬浮物等光谱特征较为明显的要素含量进行直接反演,并通过其结果间接反演出其他水体要素,如总氮、总磷、化学需氧量及藻类等水生植物含量等。通过高光谱遥感可对水华灾害进行实时大范围的动态监测,有助于人们掌握水华的空间分布以及变化规律,从而为防治水华提供参考。

1.4.3 在农业中的应用

高光谱遥感技术在农业遥感中主要是监测地面农作物的生长状况，其可以准确地监测农业中的信息，把农业遥感中的各种信息资源结合起来，为农业建设提供基础信息，同时还能预估农作物的生长以及可能出现的灾害，提高农业管理的水平。

高光谱遥感技术可以研究农作物叶片的光谱特征。农作物生长过程中，其生长状态和叶片光谱特征存在着密切关系，叶片光谱特征中的信息含量非常高，如光谱反射率、土质内水分含量等，这些因素都会影响农作物的生长状态^[22]。高光谱遥感技术可在农业遥感中预测农作物的长势，主要从叶面积指数和生物量两个方面进行分析。农作物的生理生化性状包括光合作用和氮含量。农作物通过光合作用会在体内囤积有机物，促进其生长，高光谱遥感技术通过监测农作物的光合作用，可快速、准确地得出农作物光合作用的特征。高光谱遥感技术测得的反射光谱指数的差异可反映农作物光合作用的状态，以完成农作物光合作用的监测工作。农作物产量预估是农业遥感中的重要工作，高光谱遥感技术具有预估农作物产量的作用，基于高光谱遥感技术的光谱遥感器能够获取农作物的生长特征。光谱遥感器搭载在卫星上，利用遥感技术收集农作物的生长信息以及光谱特征，这些信息就可以反映农作物的产量，预估出农作物的产量值。

1.4.4 在矿业中的应用

高光谱岩矿识别主要是依赖矿物成分的光谱吸收特征，由于不同种类矿物的晶体结构是各不相同的，因此由晶格振动而产生的各种矿物光谱特性也是不一样的^[23]。一般矿物物质的光谱吸收峰宽度在 30 nm 左右，只能利用光谱分辨率小于 30 nm 的传感器才能识别出来。因此，高光谱遥感数据（光谱分辨率小于 30 nm）能够很精确地捕捉到这些诊断性的光谱特征，进而对不同的矿物及其成分进行识别。

大量的理论和实验也表明，不同种类岩矿的光谱通常都包含一系列不相同的特征吸收谱带，且这些特征吸收谱带在矿物中具有较稳定的波长位置和波形，比如方解石、白云母等，在 400~2500 nm 光谱范围都有自己的特征吸收峰，这就给我们利用高光谱遥感数据识别它们提供了可能性。高光谱遥感除了应用于常规的岩性识别、精确矿物提取、地质解译等，还可以应用到矿物定量反演、地表参数反演、植物生态评价、土壤分类等。

参 考 文 献

- [1] Zhao C. Research on multiband packet fusion algorithm for hyperspectral remote sensing images.

- Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics, 2019, 23(1): 153-157.
- [2] He L, Li J, Liu C Y, et al. Recent advances on spectral-spatial hyperspectral image classification: An overview and new guidelines. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2018, 56(3): 1579-1597.
- [3] Peng J T, Li L Q, Tang Y Y. Maximum likelihood estimation-based joint sparse representation for the classification of hyperspectral remote sensing images. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2019, 30(6): 1790-1802.
- [4] 苏红军. 高光谱遥感图像降维: 进展、挑战与展望. *遥感学报*, 2022, 26(8): 1504-1529.
- [5] 郭红伟, 余江, 朱家兴, 等. 基于局部直方图的加权均值滤波器. *计算机应用*, 2010, 30(11): 3019-3021.
- [6] 赵安新, 汤晓君, 张钟华, 等. 优化 Savitzky-Golay 滤波器的参数及其在傅里叶变换红外气体光谱数据平滑预处理中的应用. *光谱学与光谱分析*, 2016, 36(5): 1340-1344.
- [7] Hao Y, Feng X C, Xu J L. Multiplicative noise removal via sparse and redundant representations over learned dictionaries and total variation. *Signal Processing*, 2012, 92(6): 1536-1549.
- [8] Gong X, Chen W, Chen J. A low-rank tensor dictionary learning method for hyperspectral image denoising. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2020, 68: 1168-1180.
- [9] Grasedyck L, Kressner D, Tobler C. A literature survey of low-rank tensor approximation techniques. *GAMM-Mitteilungen*, 2013, 36(1): 53-78.
- [10] Yuan Q Q, Zhang Q, Li J, et al. Hyperspectral image denoising employing a spatial-spectral deep residual convolutional neural network. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2018, 57(2): 1205-1218.
- [11] Shi Q, Tang X, Yang T, et al. Hyperspectral image denoising using a 3-D attention denoising network. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2021, 59(12): 10348-10363.
- [12] Sun W W, Peng J T, Yang G, et al. Correntropy-based sparse spectral clustering for hyperspectral band selection. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2020, 17(3): 484-488.
- [13] Sun W W, Zhang L P, Du B, et al. Band selection using improved sparse subspace clustering for hyperspectral imagery classification. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2015, 8(6): 2784-2797.
- [14] Sun W W, Zhang L P, Zhang L F, et al. A dissimilarity-weighted sparse self-representation method for band selection in hyperspectral imagery classification. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2016, 9(9): 4374-4388.
- [15] Sun W W, Du Q. Hyperspectral band selection: A review. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 2019, 7(2): 118-139.
- [16] Ren K, Sun W W, Meng X C, et al. Fusing China GF-5 hyperspectral data with GF-1, GF-2 and Sentinel-2A multispectral data: Which methods should be used? *Remote Sensing*, 2020, 12(5): 882.
- [17] Bioucas-Dias J M, Plaza A, Dobigeon N, et al. Hyperspectral unmixing overview: Geometrical,

- statistical, and sparse regression-based approaches. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2012, 5(2): 354-379.
- [18] Xu X, Li J, Wu C S, et al. Regional clustering-based spatial preprocessing for hyperspectral unmixing. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 204: 333-346.
- [19] Zhang X R, Li C, Zhang J Y, et al. Hyperspectral unmixing via low-rank representation with space consistency constraint and spectral library pruning. *Remote Sensing*, 2018, 10(2): 339.
- [20] 邢璐琪, 张桂莲, 张浪, 等. 高光谱技术在植被特征监测中的应用. *园林*, 2020, (11): 8-14.
- [21] 冯天时, 庞治国, 江威, 等. 高光谱遥感技术及其水利应用进展. *地球信息科学学报*, 2021, 23(9): 1646-1661.
- [22] 张伟. 高光谱技术在农业遥感中应用的研究进展. *农业技术与装备*, 2022, (5): 91-93.
- [23] 徐元进. 面向找矿的高光谱遥感岩矿信息提取方法研究. 武汉: 中国地质大学, 2009.