

遥感科学与技术交叉学科知识和教学体系研究

张兵^{1,2}, 陈方^{1,2}, 高连如^{1,2}, 张文娟^{1,2}, 闻建光^{1,2}, 牛铮^{1,2},
柳钦火^{1,2}, 何国金^{1,2}, 孟庆岩^{1,2}

1. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094;

2. 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 遥感科学与技术是一门多学科交叉的战略性新兴产业, 形成了“遥感科学—遥感探测—遥感处理—遥感应用”四位一体的学科架构。本文系统研究和阐释了遥感科学技术的学科知识体系、教学内涵与体系架构, 遥感科学作为理论根基, 以地物时空谱特性、遥感辐射传输机理、遥感定量反演理论、定标与真实性检验为四大核心知识板块, 构筑遥感科学与技术学科的机理性基础; 遥感探测聚焦电磁波探测器件、遥感成像体制与天空地观测平台的核心理论与技术体系, 依托多谱段、多模态载荷及组网观测技术, 实现海量遥感数据的源头获取; 遥感处理由图像定量化预处理、智能解译、高性能计算、在轨实时处理等关键理论与方法组成, 结合遥感大模型推动观测数据向有效地学信息的高效转化; 遥感应用覆盖国土资源、农业农村、生态环境、灾害应急、气象服务、海洋水利、城市管理、地质矿产、行星探测、数字地球等诸多领域的图像分析技术与方法, 全面服务于粮食安全、生态文明建设、气候变化应对、全球可持续发展等重大战略。当前, 中国遥感科学与技术学科在理论研究、技术研发与行业应用层面已积累丰硕成果, 但仍面临从本科到研究生教学体系存在知识碎片化、体系不完整、前沿知识融入不足、理论与实践衔接不紧密等问题, 对交叉学科建设、复合型创新人才培养带来多重挑战。面向大数据、人工智能引领的数字化转型趋势, 既要依托四位一体的学科知识体系与教学内容不断完善课程设置与教学实践, 也要推进遥感科学与技术学科全链条的数智化升级, 发展物理与数据模型双驱动、多平台协同探测、多模态遥感大模型、跨领域智能决策等前沿方向。通过理论、技术、应用与教学协同优化, 持续提升遥感科学与技术学科的原始创新能力、行业服务能力与人才培育能力, 推进遥感学科教育科技人才一体化发展。

关键词: 遥感科学与技术, 遥感科学, 遥感探测, 遥感处理, 遥感应用, 学科内涵与体系架构

中图分类号: TP701X/P2

引用格式: 张兵, 陈方, 高连如, 张文娟, 闻建光, 牛铮, 柳钦火, 何国金, 孟庆岩. 2026. 遥感科学与技术交叉学科知识和教学体系研究. 遥感学报, 30(7): 1894-1927

Zhang B, Chen F, Gao L R, Zhang W J, Wen J G, Niu Z, Liu Q H, He G J and Meng Q Y. 2026. Research on disciplinary knowledge and teaching system of remote sensing science and technology. National Remote Sensing Bulletin, 30(7):1894-1927[DOI:10.11834/jrs.20266292]

1 引言

随着空间技术、信息技术与地球科学的深度融合, 遥感科学与技术已发展成支撑资源环境管理、全球变化及可持续发展研究、国防安全等的战略性交叉学科, 其核心任务在于通过非接触式观测, 实现对地球与其它行星等天体地表要素的精准感知与规律挖掘。从早期航空探测到如今

天—空—地一体化观测, 从定性解译到定量反演, 遥感科学技术的快速发展不仅重塑了人类认知地球的方式, 更推动了多学科交叉融合, 形成了兼具理论深度与应用价值的学科体系。梳理遥感科学与技术的发展脉络, 明确学科核心内涵与交叉特征, 建立系统的学科体系架构, 构建全链条知识和教学体系, 对推动学科高质量发展、拓展应用边界具有重要的理论与实践意义。

收稿日期: 2026-06-20; 预印本: 2026-07-10

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 42425103, 42325104, 42471371)

第一作者简介: 张兵, 研究方向为高光谱遥感与遥感大数据。E-mail: zhangbing@aircas.ac.cn

1.1 遥感科技发展历程

广义的遥感，即“遥远的感知”，是指以非接触的成像或非成像方式通过各种物理场（如电磁波、地震波、声波、重力场、磁力场等）探测地物各类属性与变化规律的交叉科学与技术。狭义的遥感是指在较远距离以特定的电磁波谱成像方式来感知地物特性的科学与技术，其核心是“远距离感知”与“信息转化”。作为一门新兴学科，遥感的发展历程可划分为4个关键阶段。

第1阶段为探索起步期（20世纪50年代末），以航空遥感为核心，主要依托飞机平台搭载光学相机，实现局部区域的资源调查，核心技术以胶片成像与目视解译为主。1962年在美国密西根大学举办的第一届环境遥感研讨会作为一项重要历史性事件，标志着“遥感”这一科技新概念和新领域正式被科技界与工业界普遍接受。

第2阶段为实验发展期（20世纪60—80年代），随着航天技术的突破，美国 Landsat 系列卫星、法国 SPOT 卫星相继发射，推动遥感从航空向航天跨越，形成了多谱段观测能力。这一阶段，中国遥感开始起步，接连组织了腾冲航空遥感试验、天津—渤海湾环境遥感试验和二滩水能开发遥感试验三项大型综合遥感试验。这三次试验不仅取得了丰硕的科技成果和显著的社会经济效益，而且成功地将遥感综合应用系统性地引入中国，标志着中国多领域遥感应用的起步，是中国遥感发展史上的“三大战役”。

第3阶段为实用普及期（20世纪90年代—21世纪初），众多高分辨率光学与微波遥感卫星相继投入运行，有效突破复杂气象条件下的观测限制与多平台协同难题。1992年联合国世界环境与发展大会有力推动了遥感在全球环境变化研究中的应用，2005年地球观测组织（GEO）成立，促进了全球遥感数据共享与协同观测。与此同时，中国也逐步实现遥感卫星自主化，“风云”“资源”“海洋”“环境”等系列卫星投入使用，应用领域拓展至国土、农业、林业、环境等多个行业（吴立新和龚健雅，2025）。

第4阶段为智能加速期（21世纪以来），以高光谱遥感、合成孔径雷达（SAR）、无人机遥感为代表的遥感技术持续突破，结合人工智能、大数据、云计算，推动遥感进入“高分辨率、高时效、

高精度、智能化”时代。中国“高分”专项、国家民用空间基础设施、欧盟“哥白尼”计划的实施，进一步完善了天一空一地一体化观测网络，遥感数据从“海量”向“智能”转化，应用场景实现跨领域覆盖。遥感正朝着多源数据协同化、智能解译精准化、应用服务市场化、科学探测常态化的趋势发展，实现从地表到内部、从局部到全球的全方位感知与理解。

1.2 遥感学科内涵与体系架构

遥感科学与技术是一门以物理学为本源，融合地球科学、电子科学、测绘科学、计算机科学、环境科学等多学科理论与技术的交叉学科，其研究以电磁波谱成像探测为核心，有机融入地震波、声波、重力、磁力等其它物理场，涵盖“机理—探测—处理—应用”全链条，为人类认知地球、保护自然、保障安全提供精准、高效的空间信息支撑，已被正式列入研究生教育交叉学科门类一级学科，彰显其在国家科技体系中的重要地位。

从学科体系构成来看，遥感科学与技术分为“科学”与“技术”两个维度：遥感科学是学科的理论根基，以物理学为核心，聚焦遥感现象与内在规律的研究，核心是地物波谱特性与辐射传输理论，揭示电磁波与地物、大气的相互作用机制，为遥感技术发展提供理论支撑；遥感技术是学科的实践载体，指用于获取、处理、分析、应用遥感数据的各类方法与手段，涵盖遥感探测、遥感处理、遥感应用3大核心内容，是将科学理论转化为实际应用的关键路径。

具体而言，遥感科学聚焦地物辐射、光谱、时相三大特性及尺度、大气、角度、邻近、传递5大效应（张兵等，2025），构建地物波谱库与辐射传输模型，阐明遥感信息的形成机制，研究遥感定量反演与信息同化、遥感定标与真实性检验的新理论和新方法，是整个遥感学科体系的“理论根基”；遥感探测以遥感科学为基础，研究遥感成像原理、传感器设计与平台技术，涵盖星载、机载、地基等多平台，可见光、红外、微波等多谱段，是获取空间信息的“数据载体”；遥感处理聚焦遥感图像预处理、智能解译、高性能计算与信息工程等技术，消除观测误差，定量提取有效信息，实现数据质量提升，是连接数据与应用的“转换枢纽”；遥感应用则将处理后的遥感信息与

各行业需求结合，实现从自然科学研究到社会经济应用的价值挖掘，是学科的“实践出口”。

基于此，本文以“遥感科学—遥感探测—遥感处理—遥感应用”四位一体学科体系为架构，系统描述四者核心内涵及其紧密耦合、协同发展的整体结构：遥感科学为遥感探测、处理、应用提供理论指导，使探测平台的遥感器设计具有明确的科学依据，决定了技术发展的基础与方向；

遥感探测为处理与应用提供高质量数据支撑，决定了信息提取的上限，是学科发展的数据驱动力；遥感处理提升数据可用性和可靠性，把数据转化为信息，为多领域业务应用提供精准数据产品保障；遥感应用在解决实际问题的过程中发现问题、提炼需求，反向推动遥感科学理论的深化、探测技术的革新与处理方法的优化，形成“机理—探测—处理—应用”的动态闭环发展模式（图1）。

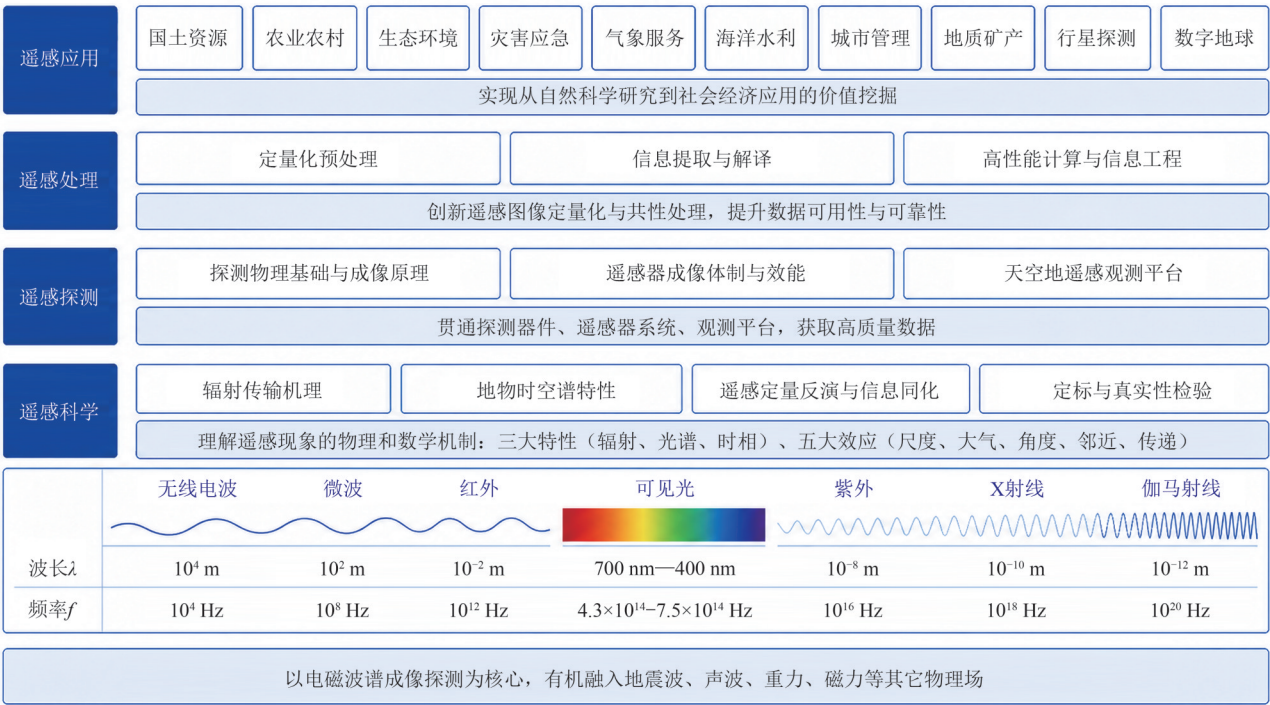


图1 遥感学科内涵与体系架构
Fig.1

1.3 遥感学科的交叉特点

遥感科学与技术的交叉性是其核心特征之一，这一特性源于其研究对象的复杂性、研究方法的综合性以及应用场景的广泛性。遥感的核心任务是实现“远距离感知”，而感知过程需依托多学科理论与技术的协同支撑，以电磁波成像探测为核心，同时融入其他物理场（地震波、声波、重力场、磁力场等），形成多维度交叉研究格局。遥感学科的形成与发展始终依赖多学科的融合赋能：物理学是学科的本源，电磁波理论、辐射传输理论、光学原理等为遥感成像、波谱分析提供核心理论支撑，决定了遥感知觉的物理基础；电子科学与技术等支撑遥感载荷的研发，从遥感器设计、信号采集到传输链路，均需电子技术的支撑，推

动载荷向高分辨率、高灵敏度升级；计算机科学与技术等为遥感数据处理提供技术手段，人工智能、大数据、云计算等技术的融入，推进了遥感数据的快速处理与智能解译，破解了海量数据处理的难题；测绘科学支撑遥感数据的几何校正、定位与制图，保障遥感信息的空间精度；地球科学（地理学、地质学、大气学、海洋学等）为遥感应用提供研究背景与需求导向，明确遥感信息的解读目标与应用场景。

本文所描述的遥感体系是以电磁波成像为核心，在特定应用场景中，可融入其它物理场，如声波、地震波、重力场、磁力场等，实现对地表地物和地球三维物质结构更为精细和透彻的观测和理解，也进一步推动遥感学科与更多学科的交

又融合与发展,从而更好地实现对地球系统内部结构的观测,支撑固体地球探测与矿产资源勘查。电磁波融入声波的遥感技术,可以应用于海洋探测、水下目标识别等场景,拓展了遥感的应用边界。

这种多学科交叉融合的特性,使得遥感学科形成了开放的知识体系——既不断吸收物理学、数学、电子学、计算机科学等学科的最新成果,又为地球科学、测绘科学、环境科学等学科提供新的研究手段,同时随着“数字地球”等前沿方向的发展,进一步推动遥感与更多学科的深度交叉,彰显了交叉学科的生命力与发展潜力,也决定了遥感学科在国家战略需求中的重要地位。

2 遥感科学:理论本源与物理基础

遥感科学的本质,是通过测量电磁波与地物相互作用后的信息来反演或推算地物属性和状态(李小文,2005)。不同于普通相机仅记录红、绿、蓝三波段亮度值、呈现人眼可见的色彩和纹理,遥感器接收的是多个乃至上百个波段的辐射亮度值,科学家可从中推断出地表和大气的关键参量。因此,遥感科学的核心任务是理解遥感现象背后的物理和数学机制,建立观测信号到地物目标参量的定量映射关系(徐冠华等,2016)。

遥感科学的基础理论问题可归结为地物的三大特性(辐射、光谱、时相)与五大效应(尺度、大气、角度、邻近、传递)(张兵等,2025)。三大特性是地物自身理化特点在电磁波谱上的固有表现,五大效应则是不同成像观测条件下这些特性的表达与变异规律。遥感科学正是以电磁波与地物的相互作用为数理基础,系统研究上述特性和效应的内在规律,从而为遥感探测、遥感处理与遥感应用提供理论基础。这一内涵决定了遥感科学在遥感科学与技术学科体系中处于“根基”的地位。

2.1 遥感科学知识体系及内在关系

基于遥感科学的三大特性和五大效应,可将遥感科学知识体系分解为4个相互关联、逻辑递进的方向:遥感辐射传输机理、地物时空谱特性、遥感定量反演与信息同化、遥感定标与真实性检验(图2)。这4个方向的划分源于遥感科学的核心内涵:任何遥感信息都经历了大气和地表的相

互作用,需要反向推演这一过程,从而构成从物理信号产生、地物目标特性表达、定量反演与信息同化到遥感定标与真实性检验的科学链条(柳钦火等,2019)。该体系完整响应了遥感科学中的三大特性与五大效应。辐射传输机理直接响应辐射特性及大气、角度、邻近效应;地物时空谱特性响应光谱特性和尺度效应、角度效应和邻近效应对波谱的影响;遥感定量反演与信息同化响应时相特性和传递效应、尺度效应对时序变化的影响;遥感定标与真实性检验综合响应三大特性以及尺度效应和传递效应对参考真值的影响。值得指出的是,遥感定量反演与信息同化强调遥感科学与地球科学、信息科学的前沿交叉,其核心基础是信息论,旨在实现遥感观测及其与地球系统模型的有效融合(李新,2013)。遥感定标与真实性检验则强调遥感科学的计量基准,其核心基础是误差理论,目标是实现全链路定标和检验误差最小化。4个方向相互支撑,共同奠定遥感科学的理论基础(闻建光等,2023)。

基于此,在遥感科学教学与人才培养上,需具备“追根溯源”的物理学和数学基础,并培养3种核心能力:物理洞察力,即能够从遥感图像联想到背后的辐射传输过程及大气、角度、尺度、邻近和传递等外界干扰效应;建模和反演能力,即将物理过程转换为数学模型,并运用数值方法或人工智能求解反问题;科学评价能力,即通过遥感试验构建像元尺度参考真值,客观检验遥感数据产品,追溯误差来源。

2.2 遥感辐射传输机理

用物理和数学手段刻画复杂地表的辐散与散射特性,是认知地表规律的基础,也是遥感数据转化为信息的重要理论支撑。遥感辐射传输研究电磁波从太阳出发,经大气传输、与地表相互作用,再经大气返回遥感器接收的全链路物理过程,涵盖地物辐射强弱规律(辐射特性)、大气分子和气溶胶的吸收散射(大气效应)、观测几何导致的各向异性(角度效应)以及非目标像元的交叉辐射(邻近效应)。当前,复杂场景下的辐射传输机理建模、物理模型与人工智能的深度融合,以及高精度定量反演的理论构成了遥感科学的学科前沿。中国已构建了全波段遥感辐射传输模型体系(闻建光等,2025a),包括适合大场景的三维辐射

传输模型（Qi 等，2019）和适合山地/混合地类的复杂地表解析模型等（李爱农 等，2025），尤其在复杂地表几何光学建模（Wu 等，2019a）、热红外辐射方向性建模（Liu 等，2026）、高光谱辐射传

输机理（童庆禧 等，2006）、微波散射辐射传输机理（金亚秋，2016）等方面形成了鲜明的理论特色和自主创新优势。

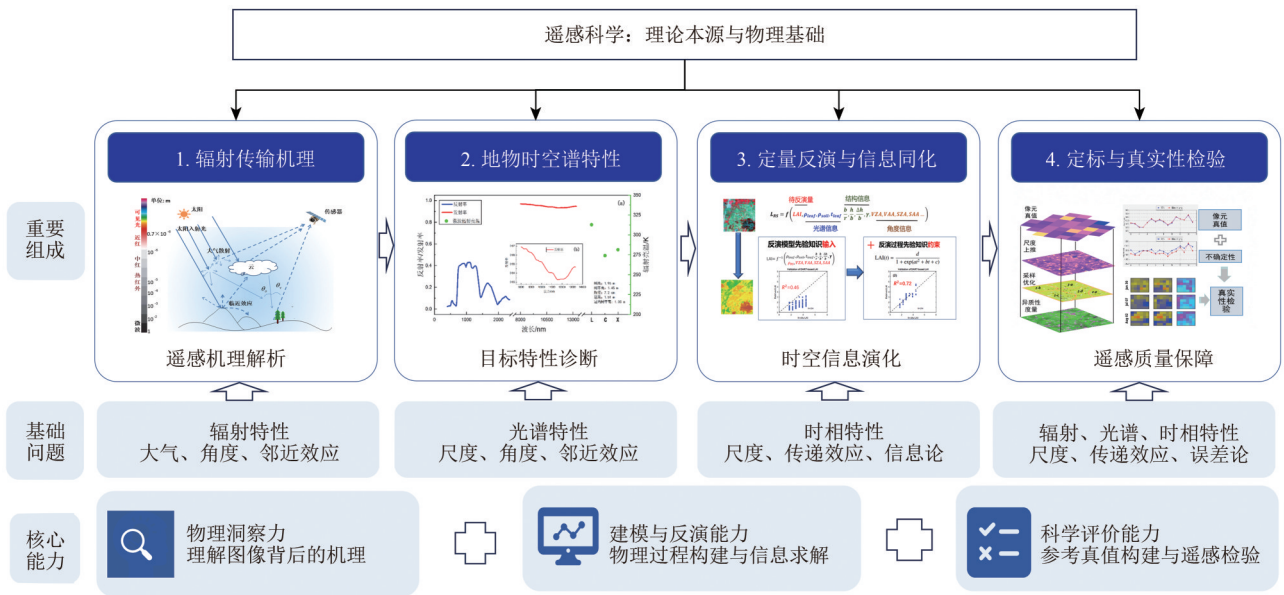


图2 遥感科学的知识体系

Fig.2

辐射传输主要包括大气和地表两个有机联系的过程。大气辐射传输涵盖电磁波与大气分子、气溶胶和云等介质的相互作用（Letu 等，2020）；地表辐射传输则涵盖电磁波与植被、土壤、城市、积雪、水体等介质的相互作用（Liang 等，2004）。从卫星观测的全链路视角来看，地表和大气之间的耦合效应同样具有重要的地位（Zhao 等，2025）。遥感辐射传输的核心知识体系包含辐射基本定律、辐射传输方程的建立与求解方法、典型大气和地表辐射传输模型的基本原理。知识体系覆盖了反射辐射、发射辐射与散射辐射基本相互作用形式，并贯穿全波段及典型介质：在可见光—短波红外（反射）波段，研究太阳辐射经大气吸收与散射后，与地表植被、土壤、水体等目标的反射过程，以及激光雷达与地表地物的主动探测过程；在热红外波段，重点分析地表发射率与地表温度耦合下的太阳—大气—地表之间的复杂发射辐射过程；在微波波段，则需同时涵盖地物的后向散射（主动）和发射辐射（被动）机理。

遥感辐射传输受大气效应、角度效应和邻近效应的深刻影响，其知识体系还需涵盖上述三大效应的处理方法。大气效应决定了电磁波通过大

气和云路径时的衰减与散射特征；角度效应描述了信号随太阳—目标—遥感器几何关系的变化展现显著的各向异性特征；邻近效应则源于大气的多次散射导致图像模糊和光谱畸变。其中，角度效应引起的多角度特征具备地物的角度维信息，与传统的空间、时间和光谱互补，显著提升了遥感对地球关键参量的获取能力（阎广建 等，2021）。这些效应的耦合处理，正是辐射传输建模的核心价值所在。

基于上述内涵，该方向的核心教学任务是使学生掌握辐射传输的基本定律与方程，理解电磁波与大气、地表相互作用的物理机制，培养开展全链路辐射传输模拟和参数反演的基础能力。教学实施应致力于两大知识体系的培养：一是理论筑基，聚焦辐射基本定律、辐射传输方程以及电磁波与大气、地表相互作用；二是模型构建和求解，聚焦大气辐射传输模型、地表植被、土壤、水体、积雪、城市等地表模型，具备遥感建模核心能力。

2.3 地物时空谱特性

地物波谱学研究地物因内在理化属性（分子

振动、电子跃迁等)在不同电磁波段表现出的特征反射、吸收或发射规律(张兵等, 2025)。这种电磁波谱上的固有特征构成了不同地物的波谱指纹,是遥感科学三大特性中的“谱”维度的核心体现。地物波谱特性的物理内涵涵盖了物质对电磁波的全波段响应过程:在可见光—短波红外波段,电磁波以太阳反射为主导,主要反映地物表面反射特性;在热红外波段,电磁波来自地物自身热发射,体现物质的热辐射能力和分子振动特征;在微波波段,电磁波受地物介电常数和表面粗糙度影响,以主动散射和被动辐射两种方式记录。这一多波段特征使地物波谱成为链接电磁波理论与地表物质属性的重要物理桥梁。从国内外发展来看,中国在全波段典型地物波谱数据库(张莹彤等, 2017; 钟守熠等, 2020)、多角度—多尺度光谱测量方面(Wen等, 2023)形成了鲜明特色,为地物时空谱的发展提供了重要基础。

该方向的核心知识包括地物波谱物理成因、地物目标特性、波谱测量与波谱库3个层面,关键是阐述各类型地物在可见—短波红外、热红外和微波等波段的波谱特征规律(童庆禧等, 2016)。在可见光—短波红外波段,化学色基产生诊断性吸收峰,物理色基决定光谱整体形态。如植被的“红边”是叶绿素含量和叶片结构的综合反映,矿物的特征吸收谷(如高岭石在 $2.2\ \mu\text{m}$ 处的Al-OH吸收)是矿物识别的直接依据,水体的极低反射率及其随波长下降的趋势是水质反演的基础。在热红外波段,地物的发射率谱形与分子振动模式相关,石英在 $9\text{—}10\ \mu\text{m}$ 处的发射低谷、碳酸盐矿物在 $11\text{—}13\ \mu\text{m}$ 的发射峰均为矿物识别的关键依据。微波波段则以不同频率下地物的后向散射和发射率变化为特征,土壤水分、植被含水量、冰雪状态均会在微波谱上留下特征印记。波谱测量与波谱库建设是目标特性研究的基础,涵盖实验室、野外地基、航空和卫星等多层级测量场景,是链接遥感基础研究和应用研究的重要桥梁。

地物波谱特征并非恒定不变,而是深刻关联着尺度效应、角度效应和邻近效应,且在不同场景下各效应的主导作用存在显著差异。其一,尺度效应体现在地物波谱随空间分辨率的变化。地物波谱从实验室到野外观测、航空到航天跨多个尺度。当空间尺度降低时,原本纯净的端元波谱(植被、土壤和水体)形成了混合波谱,其形态并

非端元波谱的简单加权(李小文和王伟婷, 2013)。其二,角度效应源于几乎所有自然地表的非朗伯体特性,植被冠层、粗糙土壤、城市建筑等在不同观测角度下的波谱存在差异显著,这种方向性不仅影响辐射强弱,还会改变波谱曲线的形状。其三,邻近效应通过大气散射产生的交叉辐射对目标像元的光谱产生污染,进一步增加了波谱特性研究的复杂性。角度效应和邻近效应同时作用于辐射传输机理与波谱特性两个方向,前者表现为辐射量的改变,后者表现为光谱谱形的畸变。由于地表物质和结构的变化,以上3种效应对地物波谱特性产生显著的影响,呈现显著的时相特性。

遥感地物时空谱特性的教学需要同时纳入这3种效应,才能真实反映遥感观测的地物波谱在复杂自然条件下的变化规律。为此,在教学中应注重构建三大知识体系。一是全波段波谱测量原理与方法,涵盖实验室、野外地面、航空和卫星等多层级测量尺度,使学生掌握从可见光—短波红外、热红外到微波的全波段波谱数据的获取原理与质量控制方法。二是地物波谱与遥感模型的耦合关系,使学生理解地物波谱数据作为遥感模型输入参数和验证基准的核心作用。三是效应校正方法,使学生掌握波谱特性中尺度效应、角度效应和邻近效应的基本理论与处理方法。通过该方向的学习,学生需具备全谱段波谱洞察力,不仅能看到遥感图像上的像素亮度值,更能读懂隐藏在波谱曲线背后的地物理化信息,并能预判在不同空间分辨率和观测条件下波谱特征的变化规律,建立从地物波谱测量、地物目标特性诊断到定量反演与验证的完整知识链路。在此基础上,前沿教学及研究可进一步拓展至复杂地形与破碎地表下多角度光谱建模(李增元等, 2019; 李爱农等, 2025)、人工智能与辐射传输模型耦合的光谱重构算法(Xu等, 2025),以及多角度观测数据的协同反演(Wen等, 2017)等方向。该方向的教学应使学生掌握典型地物的诊断性光谱特征及其物理成因,理解光谱特征随观测条件的变化规律,强调贯通地物波谱与遥感模型的耦合应用。

2.4 遥感定量反演与信息同化

遥感定量反演理论基础基于电磁波与地物相互作用的物理机制,从传感器观测的辐射信息反

向推演地表和大气的关键参量。该过程的核心在于构建从观测信息到地表参数的定量映射关系,其数学本质是求解逆问题。遥感反演通常面临病态反演的挑战,因此需要引入先验知识进行正则化约束,将先验信息与观测数据相结合(李小文等, 1998)或采用多源数据协同实现信息量增加(Wen等, 2017),以提高遥感反演质量。基于以上内容,信息同化研究地物信号随时间的变化规律,并利用变分或者贝叶斯滤波等数据同化方法将多时相遥感观测与动态模型(如地球系统数值模型、作物生长模型)进行融合,实现对地表状态的时空连续估计与预测(李新等, 2023),视为定量反演在时间维度上的自然延伸和扩展。从地球系统科学的视角看,其基础问题在于如何用多时相、多尺度的遥感观测去认知地球表层系统的动态演化规律,并驱动数值模型对未来状态进行预测。因此,定量反演与信息同化是连接遥感观测与地球系统过程模型的关键桥梁。随着遥感从服务于“静态制图”逐步走向“动态监测”和“预测预警”,信息同化已成为刻画地表信息在时间维度上演化过程的核心手段。该方向既能从时间序列遥感数据中提取地表演化信号,又能运用同化方法融合多源观测与模型,科学解析地表过程的驱动机制。当前,中国自主建立了长时间序列的大气、陆地和海洋等卫星观测系统,以全球陆表特征参量产品(GLASS)、国产多源协同定量遥感产品(MuSyQ)和高分系列共性产品等为代表发展了系列长时间序列定量遥感产品(梁顺林等, 2023; 柳钦火等, 2023),建成了多种陆面数据同化系统(李新等, 2020),在遥感反演与信息同化领域取得了一系列令人瞩目的成果。

遥感反演与信息同化直接响应了遥感科学基础问题中的时相特性,这是三大特性中唯一以“时间”为维度的特性。时相特性是地物波谱反射或发射特性随时间呈现的规律性变化,蕴含着日变化、月变化、季节变化、年际变化及更长期的地表演化趋势。定量反演是从观测信号到地表参数的静态推理过程,为同化提供初始状态和边界条件;同化则是将多时相反演结果与动态模型融合,实现状态从静态到动态升级。研究场景几乎覆盖了具有时间动态的地表过程,强调对时相变化本身的观测、表征和理解。在可见光—短波红外谱段,植被光谱反射率随生长季节的变化尤为

典型:春季展叶期红边逐渐增强,夏季旺盛期近红外反射率达到峰值,秋季叶片衰老时红边消失、反射率下降;在热红外谱段,地表温度随季节的周期性变化以及由于热惯量差异形成的日变化特征,构成了热红外遥感动态监测的物理基础。然而,仅依靠稀疏的卫星观测难以实现地表参量的时空连续估计与未来预测,这要求将遥感观测与动态模型进行有机融合,通过信息同化和模型约束,充分发挥遥感观测在时间维度上的价值。任何随时间变化的地表要素,均可通过遥感信息同化方法进行监测、量化和预测。

在时相特性基础上,信息同化还与传递效应和尺度效应密切关联。遥感器的重访周期决定了时间序列的采样密度,调制传递函数(MTF)和信噪比(SNR)直接影响时间序列数据中时序变化信号的可探测性和微弱信号的可靠性。多源遥感的时空分辨率差异是信息同化需要解决的核心问题之一,尺度转换方法和观测算子的设计是解决这一效应影响的关键技术手段(Liu和Li, 2017)。

定量反演与信息同化的核心在于将静态的遥感观测升级为动态的地表过程认知。因此,其教学应着力于构建以遥感观变化、以同化探机理的知识体系。其一,通过定量反演方法的研究,实现从卫星数据到产品信息的全链路转换;其二,通过时相特性的研究,建立对地球表层动态变化规律的深入认识;其三,通过数据同化理论研究,掌握将遥感观测与动态模型耦合的科学方法。该方向的核心知识体系包括:定量反演的基本原理与逆问题求解方法、时相特性的物理驱动机制及其多尺度表达、时序遥感数据的获取与重建理论、数据同化的基本概念与算法、以及同化系统中的不确定性处理与模型约束策略。该方向的教学应使学生掌握时相特性的物理机理、定量遥感反演的基本理论方法、数据同化的基本概念与框架,培养定量遥感反演和信息同化的能力。

2.5 遥感定标与真实性检验

遥感定标是建立传感器记录的目标信息与真实目标信息之间定量对应关系的关键环节,主要包括辐射定标、几何定标和光谱定标(马灵玲等, 2023)。辐射定标建立传感器输出信号与入瞳辐亮度之间的定量函数关系,涵盖发射前实验室定标和在轨场地定标;几何定标校正传感器成像系统

的内部畸变与外部定位偏差; 光谱定标确保遥感器各波段中心波长和带宽的精确标定。真实性检验要求用第三方独立的像元尺度参考真值来刻画遥感产品与其之间的偏离程度, 并量化和追溯这种偏离的来源 (Wu等, 2019b)。其核心是获取不确定性最小化的像元尺度参考真值, 涉及优化采样、观测试验、尺度转换和不确定性评估的全链路过程 (闻建光等, 2025b)。定标与检验是一个系统性、规范化的过程, 需要遵循严格的标准规范和科学程序, 共同构成了遥感数据产品的闭环质量保障体系 (肖青等, 2025): 定标确保遥感观测数据的物理量值准确和可溯 (卢乃锰等, 2020); 检验则对遥感产品进行独立评价, 判断是否满足应用需求。此外, 利用高精度的卫星载荷和高质量产品做参考, 对目标遥感器和产品进行间接定标和检验, 可有效弥补定标和检验场地不足、观测频次低的问题 (胡秀清等, 2023)。

遥感定标和检验响应了遥感科学五大效应中的尺度效应和传递效应。尺度效应揭示了地表的非线性空间响应及其对像元参考真值的影响机制, 提出了点一面差异的本质科学问题 (吴小丹等, 2015)。传递效应揭示了不确定性在遥感信息链路中的传递规律, 为全链路定标和检验提供了不确定性演化框架。无论是定标还是真实性检验, 都需要追溯和量化过程中的不确定性, 从根本上控制尺度效应和传递效应引入的系统性误差 (李子薇等, 2025)。因此, 该方向的核心知识体系包含定标和检验的基本概念与理论框架、定标和检验遥感观测试验, 像元尺度参考真值的定义与获取理论、定标和检验场选址与优化采样、空间异质性的多尺度表征方法、尺度转换的数理模型、不确定性量化方法、误差传递与溯源原理、定标和检验国家标准以及质量标识体系。

遥感定标与数据质量检验的教学应以“质量意识”与“科学评价”为核心, 构建“理论基础—关键技术—标准规范—系统实践”层层递进的体系。定标建立物理基准, 检验评价产品质量, 两者相辅相成, 共同构筑遥感数据质量保障的闭环。该方向的教学应使学生掌握遥感定标和真实性检验的全链路理论方法, 能够独立设计并执行定标与检验试验, 建立数据必定标、产品必检验的质量意识, 形成定标—检验—溯源—评价的完整质量保障能力。中国已形成体系化的遥感定标与检

验全链路技术流程, 构建了全国层面的遥感定标与真实性检验网络 (高海亮等, 2023), 在标准化和系统建设方面处于国际领先态势 (闻建光等, 2023)。然而, 要实现国产卫星遥感质量提升的跨越, 还需要一大批遥感定标和检验人才, 可独立设计定标和检验试验、量化不确定性、追溯误差来源、并与算法研发者、产品生产者、行业用户有效沟通, 不断提升中国自主遥感产品质量水平, 为国产卫星数据的全球化推广和应用提供坚实保障支撑。

3 遥感探测: 成像原理与数据获取

遥感探测通过捕获感知物质反射、发射和散射的电磁波信号, 实现客观世界观测对象向数字图像的转换 (金亚秋, 2016)。物质与电磁波的相互作用机制是遥感探测的理论基础, 探测技术与系统则直接决定数据的获取能力与质量, 进而制约后续的处理分析与多领域应用。作为连接遥感科学理论与遥感处理应用的关键环节, 遥感探测是推动遥感科学理论向工程实践的基础, 也是开展遥感处理和应用的核心理前提。

遥感探测以遥感科学机理为指导, 以典型领域应用需求为导向, 围绕空间、光谱、辐射、时间等数据核心分辨能力开展技术攻关与系统方案设计。从微观尺度的光子跃迁与电磁感应探测机理, 到遥感器成像系统设计, 再到天一空一地多平台搭载探测, 各部分均与高质量遥感数据获取密切相关。遥感探测知识体系重点聚焦于光学微波全波段的探测物理基础与成像原理、遥感器成像体制与成像效能以及天一空一地遥感观测平台, 深入剖析从紫外到微波谱段辐射信息转换为数字信号的物理过程、遥感器的成像模式以及搭载的平台类型, 通过明晰信号探测、空间成像与平台获取的技术原理、关键因素和实践手段等为培养推动遥感探测向多维、智能、协同方向发展的高素质拔尖创新人才提供理论依据与教学参考。

3.1 遥感探测物理基础与成像原理

遥感探测的物理基础是将地物连续的电磁辐射场转换为可记录的数字图像信号 (薛永祺, 1992; 张兵等, 2025)。该物理过程主要依赖遥感器系统中的探测器件实现, 其机理随电磁波的波粒二象性特征存在谱段差异。在光学谱段, 探测

器基于光电效应将辐亮度的时空分布转化为模拟电信号；在微波谱段，则通过天线与射频前端将电磁辐射或散射回波转化为高频电流。这些模拟电信号记录了目标的辐射信息，随后经采样与模数转换（A/D）量化为离散的像元灰度值，最终生成数字遥感图像，实现从连续辐射到数字化图像信息的转化（孙家柄，2009）。

相应地，遥感探测的知识体系主要包含了电磁波的物理探测原理、探测器件研制及效能分析等方面。其中，对电磁波的物理探测原理应着重解析数据获取基础与电磁波波粒二象性演变特征：在 200 nm 左右的紫外至米级微波的宽广谱段内，电磁波频率和光子能量呈现递减规律，遥感探测器的物理原理在光学谱段以光量子属性为主，而在微波谱段则更依赖于波动属性。电磁波波粒二象性的演变特性，不仅决定了各谱段遥感探测器探测原理和材料属性的差异，也制约着各类遥感载荷的探测效能，进而影响遥感数据的获取质量。

在光学谱段（从紫外、可见光、红外至太赫兹波段）遥感探测与成像技术中，教学聚焦于以光电效应为核心的物理探测基础（晏磊等，2020），系统解构半导体材料受辐射后的电荷激发过程，建立光子到电信号的能量转换模型。在知识体系建立上紧扣普朗克公式，借此引出不同探测谱段下光子能量与半导体禁带宽度相匹配的工程物理寻优逻辑，阐明单一材料难以实现全波段高效转换的物理机制，进而系统分析各谱段遥感探测器的材料选择与成像系统设计。具体包括：UV-VIS-NIR 波段以硅（Si）基材料及 CMOS/CCD 工艺为主导的机理，短波红外（SWIR，1.0—3.0 μm ）向铟镓砷（InGaAs）等窄带隙材料过渡的物理基础；中长波红外区域对碲镉汞（HgCdTe）或二类超晶格（T2SL）的依赖机制（周自刚等，2023）；以及延伸至太赫兹（THz）前沿交叉领域时，极低光子能量下本征光电机制的失效原理，以及基于带内跃迁、超导测辐射热计或肖特基二极管等特殊物理机制的技术拓展（罗加尔斯基，2023）。

遥感探测学科知识体系的构建还需深入探讨光电探测器在遥感系统实际应用中的核心效能参数。其中，量子效率涉及表面抗反射涂层、微纳结构陷光以及材料外延生长优化等多学科交叉技术，是决定微弱辐射信号高信噪比探测的关键，进而建立起微观材料与宏观成像质量的理论关联；

放大系数反映了增益与噪声间的制约关系，为微光或高速探测等增益设置提供依据；暗电流与比探测率是表征探测器极限探测能力的两个核心指标，其与遥感系统的热力学环境控制紧密相关，在红外及太赫兹波段的载荷设计时尤为关键（王建宇和李春来，2021），由此引出理解长波及太赫兹探测器制冷系统技术的教学内容。

针对微波遥感（波长约 1 mm 至 1 m，频率约 300 MHz 至 300 GHz）谱段，由于光子能量极度衰减至微电子伏特量级，传统基于半导体带隙跃迁的光电效应探测机制不再适用，其基础理论从光电效应转向电磁场理论与微波工程。因此，针对基于电磁波波动性的探测物理机制的教学应系统解析如何通过天线获取地物微波辐射或雷达主动发射的散射回波，在天线结构内部感应出高频交变电流或电压信号，并依托微波射频链路进行放大、下变频与检波处理的原理流程（舒宁，2000）。

在此基础上，微波探测硬件的研制原理教学需结合天线理论与微电子学原理，分析天线与接收机前端的核心作用。教学中可横向对比 P、L、S、C 至 X、Ku、Ka、W 等不同频段抛物面、喇叭以及微带阵列天线的结构选择依据，构建对空间波束赋形与能量捕获方式的系统认知。在接收机前端方面，引入高频半导体物理知识，探讨砷化镓（GaAs）或氮化镓（GaN）等高电子迁移率晶体管在低噪声放大器中的作用，并阐释利用肖特基势垒二极管等非线性微波半导体器件实现射频信号平方律检波或混频的物理逻辑。

微波遥感成像原理教学可通过对比被动与主动探测模式切入，涵盖从微波辐射计如何将微弱电磁辐射转换为空间亮温场的能量传递方程推演，以及主动雷达成像的数理过程推导，明晰从主动发射、目标散射、回波接收、幅度/相位提取至距离反演和回波强度图生成的雷达探测成像过程。

从紫外到微波谱段的遥感探测物理基础涉及材料、电子等多学科交叉，强调系统效率、响应函数及噪声抑制等多维参数的物理寻优与工程折中理论。教学中应不断面向学科前沿，及时掌握片上集成光谱探测芯片的微纳光学原理、光谱一极化一体化感知器件的超表面调控，以及量子单光子极限探测等最新趋势。同时，推进交叉学科的教学融合，探究基于微波光子学的光电微波共

口径复合探测, 以及将柔性计算神经元嵌入读出电路的“感算一体”智能集成化架构等。

3.2 全波段遥感成像体制与成像效能

遥感器载荷及其成像体制承担着电磁波信息获取与成像表达的关键任务, 重点研究穿过大气到达遥感器入瞳处的物质反射、发射及散射信息的捕捉方法, 并将其转化为具有特定空间几何与光谱频率排列的数字图像, 是遥感探测知识体系中的重要组成部分。作为遥感探测能力形成的基础, 遥感载荷的成像体制决定了遥感系统获取地表信息的方式与能力, 在硬件层面上决定了数据的空间分辨率、光谱分辨率、时间分辨率和辐射分辨率等成像效能(童庆禧等, 2006), 并围绕高空间、高光谱、红外、微波及激光雷达等形成了遥感探测的关键技术体系。

在紫外至长波红外的光学谱段中, 成像体制知识体系应重点涵盖摆扫式、推扫式、面阵凝视及计算光学等主要成像方式, 着重剖析各类成像体制的物理机理及其与观测飞行平台运动特性的耦合关联机制(Zhang等, 2025a)。其中, 摆扫式成像一般基于机械旋转或摆动的反射镜, 使线阵探测器在垂直于飞行方向上逐像元横向扫掠, 具备宽视场和多波段图像高配准精度的优势, 但受机械微振动及短曝光时间的物理制约; 推扫式成像是目前光学遥感数据获取的主要模式, 其将面阵探测器件垂直于平台飞行的方向安装, 依靠平台运动实现二维成像, 由于去除了机械扫描, 像元积分时间得以延长, 使得推扫式成像在亚米级高空间分辨率下也能保持高信噪比(李德仁和王密, 2020); 面阵凝视与计算光学成像均采用大面阵焦平面探测器对目标区域进行瞬间全视场曝光, 常用于静止轨道气象卫星、无人机或敏捷卫星的视频凝视, 能捕提高时间分辨率的动态过程(李洋帆等, 2025)。教学内容应重点围绕不同成像体制遥感载荷, 解析其成像系统和探测原理, 建立对从抽象探测理论到具象系统架构的映射认知。

高光谱遥感载荷在空间二维成像基础上进一步对像元进行光谱细分, 核心是探讨多光谱与高光谱的分光物理机制, 涉及物理学、光学工程与电子信息工程等学科的深度交叉(童庆禧等, 2016)。其知识体系重点涵盖基于空间色散的光栅与棱镜分光原理、基于物理透射的调谐滤光波段

切分技术, 以及利用迈克尔逊干涉仪获取干涉曲线并结合傅里叶变换算法进行光谱复原的干涉分光技术。其中, 光栅分光利用衍射光栅(如闪耀光栅、全息光栅)的衍射效应使不同波长的光以不同的衍射角反射或透射, 从而将复合光在空间上展开成离散光谱; 棱镜分光则是利用光学玻璃或晶体材料对于不同波长光的折射率差异(色散特性), 让复合光穿过棱镜实现光谱分离; 调谐滤光主要依赖滤光片对不同波长光的透射特性, 实现对特定波长的选择; 干涉分光则不依赖空间上的色散, 而是基于干涉原理利用迈克尔逊干涉仪或时空联合干涉仪使两束相干光产生光程差, 在探测器上形成随光程差变化的干涉图样, 再通过傅里叶变换复原光谱。实质上, 光栅与棱镜是通过几何空间离散光谱, 将探测器的一维(狭缝)空间用于光谱数据获取; 滤光片则属于波段硬切分; 而干涉仪是利用时空相位调制将光谱信息调制成交涉曲线。不同分光技术虽实现方式各异, 但本质上均针对电磁波信号的光谱信息获取(刘银年等, 2002)。教学内容应以光谱信息获取为核心, 构建涵盖色散分光、滤波分光和干涉分光等的知识体系, 系统解析不同高光谱成像体制的机理及适用场景。

在微波遥感的成像知识体系中, 成像体制依据能量来源分为主动与被动两大方向。在主动微波遥感的成像体制中, 合成孔径雷达(SAR)是雷达成像的核心模式(郭华东和张露, 2019; Moreira等, 2013)。SAR系统在侧视运动过程中, 利用相对较小尺寸物理天线持续发射相干微波脉冲并接收回波, 获取同一观测对象在不同观测位置的多普勒频移, 系统记录回波振幅与相位并在信号处理阶段实现等效大孔径合成, 从而突破物理天线尺寸衍射限制, 实现亚米级高分辨率的雷达成像(邓云凯等, 2012)。在此基础上, 干涉SAR(InSAR)是通过相位差解算高程或毫米级的微小形变, 极化SAR(PolSAR)则通过交替发射和接收不同极化的微波以反演地表目标的几何结构和介电常数等信息(吴一戎等, 2007)。被动微波遥感器通常也被称为微波辐射计, 则类似于光学相机接收观测对象因自身温度产生的自然微波辐射能量, 其成像依赖真实物理孔径, 利用旋转的抛物面天线(摆扫)或天线阵列(顺轨推扫), 在垂直于运动方向上进行连续扫掠, 逐像素捕获目标

微波辐射信息。由于上述主动和被动微波成像体制在能量获取与信号处理方面存在差异,教学内容应系统覆盖主动SAR成像与被动微波辐射计成像两类典型体制,解析微波辐射接收与成像的区别,阐明不同微波成像体制的特征。

成像效能评估是遥感器硬件设计与后端处理应用的关键。光学遥感成像效能的知识体系重点关注空间分辨率、光谱分辨率与时间分辨率之间的协同制约关系,阐明不同分光模式与空间成像体制对观测能力的影响及其引起的遥感成像效能差异。例如,高分五号AHSI载荷采用光栅推扫式体制,利用卫星平台运动完成连续条带采样,可获取丰富的地表窄波段高光谱数据;高分四号多谱段凝视相机则采用滤光面阵凝视成像体制,能在固定视场内快速获取地表辐射信息,在空间覆盖效率与时域观测连续性上具有明显优势。微波遥感成像效能则取决于工作波段与天线、接收机系统的组合。长波段微波载荷的穿透能力强,可实现植被及浅地表结构探测,但空间分辨率相对较低,而短波段微波载荷的空间分辨率相对更高、纹理细节更丰富,但其穿透能力相对较弱。此外,合成孔径雷达可依托平台运动实现大范围条带式成像,较好兼顾观测幅宽与空间精度;而被动微波辐射计可实现对特定区域的持续定点观测,在长序列监测方面具有良好的适用性。因此,在遥感成像效能的教学内容中,需强调建立系统级工程思维,认识到遥感效能不仅受限于探测材料量子效率等底层物理极限,更受系统级参数的博弈制约,需要综合开展指标论证设计,结合基于遥感科学理论的图像模拟开展新型遥感器指标设计和优化(刘瑶等,2017)。

综上,遥感器成像体制与成像效能是光学、电子学、热力学、天线射频与姿控动力学等多学科的深度融合,当前正向物理载荷与计算成像技术深度解耦、多模态探测方向融合发展。在光学成像方面,计算光学成像将微纳超表面、波前编码等物理调制器与人工智能图像复原算法相结合,实现无狭缝的高谱段高空间推扫成像、单帧超光谱以及无透镜微型化成像,已是突破空间—时间—光谱综合限制的关键;同时,关联成像等模式正在推动光学遥感突破视线障碍与极端微光环境的探测限制。在微波成像方面,分布式多基合成孔径雷达及前沿柔性数字阵列体制成为核心前沿方

向,通过多星/多平台间的空间高精度时频同步与相位控制,从传统单视角观测走向三维干涉与散射层析成像(仇晓兰等,2024);此外,雷达辐射计一体化共口径综合成像技术同时实现有源高空间分辨率结构反演与无源高辐射分辨率亮温探测。这些前沿成像技术将跨越单一成像体制的物理边界,实现对观测对象时、空、谱、偏振、辐射等多维度信息的联合获取,持续驱动遥感探测向全谱段、多模态、高灵敏保真度的方向发展(吴一戎,2013)。

3.3 天一空一地遥感观测平台

遥感观测平台是各类型遥感器的运行载体,为遥感探测提供了时空基准与多尺度数据获取能力。平台的空位置、运动状态以及与大气、目标的耦合关系,共同构成了影响遥感数据几何、辐射与光谱质量的基础物理条件,直接制约着成像效能与遥感数据质量。遥感观测平台的知识体系重点在于依托天一空一地观测平台,构建多尺度、多模式的观测系统,服务于不同时空分辨率、应用场景和任务目标下的遥感科学研究与技术应用。

航天遥感平台作为宏观尺度遥感探测的重要载体,其教学重点涉及平台运行状态与获取数据的光谱、时间、空间分辨率以及观测范围等成像效能间的物理博弈(邓云凯等,2012)。例如,在高轨静止轨道(GEO)条件下,遥感平台与观测对象距离远,受信号严重衰减与光学衍射极限限制,空间与光谱信息获取能力受限,但由于其相对地表静止,可实现秒级高重访频率的连续凝视观测,是突发性气象灾害(如台风、暴雨)监测的主要手段(Giri等,2025);近地低轨(LEO)卫星平台沿轨道高速运动,时间分辨率受重访周期限制而相对较低,但其具备更优的观测几何条件和更短的信号传播路径,对地表辐射信息的空间表达能力与光谱获取精度高,广泛应用于自然资源调查、生态环境监测等领域(柯知非等,2023)。因此,航天遥感平台的教学内容应重点结合遥感平台空位置、运动特性、天地耦合关系与成像效能的权衡机制,使学生掌握不同轨道平台的观测机理、性能差异及任务应用场景适配性。

航空与近地平台是介于宏观卫星与微观地面观测的中间观测层(李德仁和李明,2014),此类

遥感平台具有很强的载荷适配能力, 其知识体系聚焦在多模态载荷与多类型平台的适配性与集成理论。航空遥感平台可根据应用场景选择多光谱、高光谱、热红外或激光雷达等载荷针对性进行数据获取, 满足不同任务在空间分辨率、光谱分辨率及辐射精度等方面的需求(贾平等, 2022; 潘洁等, 2025)。结合航线规划与飞行高度设计, 航空遥感平台既能实现大范围条带覆盖, 也能针对重点区域开展精细重复观测, 在精细地物制图、目标识别及灾害应急响应等方面发挥重要作用。航空遥感平台的教学内容应该重点阐述载荷集成及其在各类遥感任务中的应用匹配。此外, 面向18—25 km平流层驻留的浮空器平台正成为近空间区域高驻留时效局部加密观测的学科新增增长点(蔡榕等, 2025)。

塔基观测平台具备固定的空间几何位置与稳定的观测状态, 可实现长时间、连续性的稳态观测, 能为星载与机载遥感数据反演提供可靠的物理基准, 是遥感辐射定标与数据真实性检验的核心支撑手段(吴小丹等, 2019; 闻建光等, 2023)。塔基观测平台的知识体系主要结合航天和航空遥感数据的校正方法与理论, 聚焦定标与真实性检验的观测原理与技术方法。

当前, 遥感探测正突破单一平台获取能力的限制, 形成以多维度、多层级协同感知为核心的对地观测理论体系(吴立新和龚健雅, 2025)。教学重点应阐明单平台观测特点并说明其在空间覆盖范围、时间连续性及时效性等方面的短板, 并系统引入遥感平台协同观测的前沿理论与技术机理。比如, 多星星座组网与无人机蜂群组网已成为突破单平台时空限制的核心方向, 聚焦于超大规模组网下的分布式协同成像理论, 以实现时空重叠与多角度/多时段同步探测(江碧涛等, 2024; 康利鸿等, 2024); 同时, 星上/机上边缘智能计算与异构微系统协同感知推动遥感平台向“感算一体化”演进(Zhang等, 2022a; 王家耀等, 2024), 平台通过在轨集成几何辐射预处理、边缘高性能计算与AI目标检测等算法(王密等, 2023), 在数据获取的同时完成典型要素信息提取, 实现要素信息的端到端快速推送, 可大幅提升灾害应急与国防安全的响应效能。依托星间链路与空地分布式无线网络, 天一空一地立体协同调度感知已成为目前遥感平台协同探测的核心教

学与学科发展前沿。在此基础上, 遥感平台方向的教学边界正由近地空间向深空领域进一步拓展。一方面, 针对月基遥感探测, 重点解析月球作为天然卫星平台在大尺度、长周期和高稳定性观测方面的物理优势(郭华东等, 2022), 建立月基对地观测技术知识体系; 另一方面, 面向火星、小行星等深空目标的行星探测, 课程体系需适时引入极远距离、大时延及极端环境下的自主导航、智能控制与多器协同感知技术(凌宗成等, 2025)。

4 遥感处理: 图像定量化与共性处理

遥感图像定量化与共性处理是遥感数据服务于社会经济应用场景的关键步骤, 既包括面向像元级量化的辐射与几何校正, 又包括面向多传感器数据融合、智能解译和标准化产品加工。遥感图像处理知识体系的重点涵盖定量化预处理、信息提取与解译、高性能计算与信息工程方向, 具体包括辐射与几何校正、大气校正、目标检测与识别、分割与分类、高性能计算、在轨实时处理等前沿内容, 各环节既相互衔接又层层递进, 形成了完整的共性数据产品加工链路, 为遥感信息高效挖掘与行业应用奠定了关键的数据基础。

4.1 遥感图像定量化预处理

遥感图像定量化预处理主要目的是通过辐射、几何等数据处理过程, 消除传感器、大气、光照、地形等因素引起的几何与辐射畸变, 提升数据精度和可用性(赵英时, 2003; 汤国安等, 2004; 孙家柄, 2009; 何国金等, 2021)。

利用卫星等平台所搭载的传感器观测目标物辐射或反射的电磁能量时, 从传感器得到的测量值与目标物的光谱反射率或光谱辐射亮度等物理量存在不一致, 传感器本身的光电系统结构、大气条件、地形以及太阳高度等都会引起光谱亮度的失真(赵英时, 2003; 汤国安等, 2004; 孙家柄, 2009)。遥感图像辐射校正将是传感器获取的原始数字量化值(DN值)转化为具有物理意义的辐射亮度或地表反射率的关键预处理步骤, 其核心在于消除传感器响应、大气辐射传输、观测几何及地形起伏等因素引起的辐射畸变, 确保多时相、多传感器数据的辐射可比性, 为定量遥感分析提供基础数据。校正过程包括传感器辐射定标、大气校正、太阳高度和地形校正、BRDF校正等,

通过科学建模与参数标定,消除大气散射吸收影响,修正地形光照差异,还原地物真实辐射特征。遥感辐射定标的主要目的在于消除遥感器自身光学系统、光电变换的系统偏差和响应漂移,建立DN值与遥感器接收的辐射能量之间的定量关系,其方法主要有绝对辐射定标和相对辐射定标;电磁波透过大气层时,大气不仅改变光线的方向,也会影响遥感图像的辐射特征。大气校正的主要目的就是减少或消除由大气吸收和散射引进的辐射误差(赵英时,2003;汤国安等,2004;孙家柄,2009),常用方法包括经验法和辐射传输模型法,其中模型法综合考虑大气与遥感器参数,精度高且应用广泛(Vermote等,2002,2016;Peng等,2016)。另外,为了获得每个像元的真实光谱反射,常常利用大气程透射率、太阳直射光辐照度和瞬时入射角等外部信息进行太阳高度和地形校正。上述辐射校正都是基于地球是一个朗伯反射面的假设,实际上这个假设并不完全成立(如,森林表面,其反射率并不是各向同性),在这种情况下,需要BRDF等更复杂的校正模型。

遥感图像与所表示的地表景观特征之间有特定的几何关系,并受到遥感器的设计、特定的观测条件、地形起伏等因素的影响,因此,原始遥感图像通常包含不同程度的系统性和非系统性几何变形(赵英时,2003;汤国安等,2004;孙家柄,2009)。几何校正的目的是减少或消除平台运动、遥感器结构、时间同步、地球自转与曲率等因素引起的像元位置偏差(Toutin,2004),包括系统几何校正、几何精校正和正射校正。系统几何校正依据星历、姿态、时间标记与遥感器成像模型,对遥感图像可预知系统误差进行物理改正,使图像获得初步的地理编码与投影关系(李德仁和王密,2020)。在卫星发射后,需持续监测并修正主距、主点偏移、视轴与星敏传感器安装矩阵、CCD拼接偏差及波段间配准参数等,以补偿空间热环境和机械结构漂移导致的参数退化(Storey等,2014;Wang等,2014;Choate等,2023)。系统几何校正的质量直接决定后续几何精校正、正射校正和多时相比较的基准精度,是遥感图像几何处理链路中不可或缺的上游步骤(龚健雅等,2017);几何精校正需利用地面控制点(GCP)建立数学变换模型对图像进行精确处理,但没有考虑地形起伏影响,在山区等地形起伏处仍存在位

置偏移(投影差);正射校正正在遥感图像几何校正过程中引入DEM和遥感器物理/RPC模型,消除由地形起伏引起的像点位移,使每个像元具备可直接量测和叠置的平面坐标(龙腾飞等,2023)。其典型流程包括:构建或获取遥感器成像几何模型(严格成像模型或RPC有理多项式模型),采集地面控制点并优化模型参数以消除轨道与姿态系统偏差,结合数字高程模型逐像元计算地面交会点坐标并完成投影变换与重采样(Fraser和Hanley,2005;Fraser等,2006)。正射校正的精度主要受DEM分辨率与高程精度、成像模型内部精度、控制点精度与分布以及地形复杂度等因素制约。此外,也常需要对遥感图像进行配准、融合、增强和镶嵌等预处理,以确保处理后的遥感图像在辐射质量、几何定位精度和场景范围等更好地满足应用需求(丁赤飏等,2017)。

在教学过程中对于遥感图像辐射校正应重点讲解遥感图像灰度值、辐射亮度、表观反射率和地表反射率之间的关系,帮助学生掌握传感器定标参数、太阳高度角、大气散射与吸收等因素对辐射信息影响的知识,并能够理解不同预处理级别数据产品之间的差异;遥感图像几何校正应重点讲解遥感图像成像几何、传感器姿态、轨道参数、地球曲率和地形起伏等对几何定位精度的影响,使学生掌握控制点、数字高程模型、投影坐标系统和重采样方法在遥感图像几何校正中的作用。另外,应通过典型案例和实践操作,使学生能够根据不同遥感数据源和应用目的,选择合适的预处理流程与参数完成遥感图像辐射校正和几何校正。通过本部分学习,学生应能理解遥感图像量化预处理的基础作用,认识到遥感图像预处理质量对后续信息提取、定量反演和遥感应用的影响。

4.2 遥感图像信息提取与解译

遥感图像信息提取与解译是指运用图像处理、模式识别、计算机视觉等信息科学的前沿理论,结合地球科学、地理信息科学及生态学等相关学科的先验知识,对遥感器获取的多模态图像进行处理、分析和推理,提取全球或区域尺度下地表覆盖与环境要素的几何形态、物理属性、空间分布以及动态变化信息的过程,是将海量、多源、异质的遥感观测“数据”转化为高价值、可决策

的“信息”与“知识”的纽带。在新一代人工智能和大模型技术的驱动下, 遥感图像解译方法研究迎来了深刻的范式变革, 从依赖专家经验的传统人工目视判读迈向高信度、全自动、自适应的智能解译新阶段, 形成“遥感图像智能解译”的全新技术趋势与学科前沿(张兵, 2018)。

遥感图像目标检测与识别的关键知识包括从遥感图像中准确定位预定义的感兴趣地物要素, 并判别其具体类别属性。其面向的问题与挑战主要包括暗—弱—小目标的特性表征、高密度聚集目标的边界解耦与极端受限条件下的鲁棒性提升(Zhang等, 2023)。从样本应用和模型学习机制上, 可以分为小样本与弱监督检测、无监督与自监督表征学习、跨域迁移与泛化等研究方向, 另外, 借助多模态大模型(LLM)突破闭集类别限制, 实现基于自然语言提示的开放词表零样本目标探测已经成为新的研究热点。从数据模态应用上, 又可以分为单一模态(高分辨率光学、红外、高光谱/多光谱和SAR等)的目标检测和多源异构跨模态融合的目标检测(李树涛等, 2021)。从目标空间几何表征与定位方式上, 已经从借鉴通用视觉的轴对齐水平边界框(HBB), 转向专为遥感俯视多向特性设计的旋转边界框(OBB), 进而发展为无锚框与关键点检测与实例级目标精细分割(党敏等, 2025)。

遥感图像分割与分类的关键知识包括通过提取和分析对地观测数据中的光谱与空间特征, 将图像中的像元或区域精确划分为具有特定地学语义的地物类别, 是提升图像解译性能与地表覆盖制图精度的核心技术环节。分类旨在根据遥感图像的光谱、纹理、形状和空间结构等特征, 对场景、土地覆盖类型和土地利用类型进行识别与判别(张兵, 2016), 具体包括场景分类、土地覆盖分类、土地利用分类以及细粒度分类等研究方向, 其目标是实现从图像级到像元级的语义认知。分割是在像元层面提取目标区域的精确空间范围, 主要包括语义分割、实例分割和全景分割3个层次。其中, 语义分割关注像元类别标注, 实例分割进一步区分同类目标的个体边界, 而全景分割则融合两者实现对复杂场景的完整理解。随着人工智能技术的发展, 基础模型与开放世界遥感理解逐渐成为该领域的前沿方向(Tuia等, 2025)。一方面, 遥感基础模型通过大规模预训练学习通

用遥感表征, 实现分类、分割和检测等任务的统一建模; 另一方面, 开放世界遥感理解突破传统封闭类别体系的限制, 重点研究开放集分类、开放词汇分割、零样本分割以及遥感视觉语言模型等内容, 使模型能够理解未知类别、响应文本指令并完成跨任务泛化。另外, 高光谱遥感图像的分割、分类与混合像元分解是实现地物精细化与定量化识别的关键(杜培军等, 2016)。特别是高光谱图像混合像元分解, 是利用光谱信息和线性/非线性光谱混合模型实现亚像元级分类的重要技术分支(苏远超等, 2024)。

遥感图像变化检测的关键知识包括通过对同一地理区域在不同时期获取的遥感数据进行定量分析与比对, 识别和量化地表覆盖状态或地理现象随时间演变而发生的变动信息。像元级变化检测是从多时相遥感图像中发现变化像素及其构成的区域, 实现变化与未变化区域的判别。目标级变化检测是在此基础上的进一步发展, 其研究对象从像元扩展到具体目标, 关注建筑物、道路、桥梁、车辆、船舶以及农田等典型地物的新增、消失、扩建和状态变化。语义变化理解是近年来变化检测研究的重要热点, 其核心目标是揭示变化的具体语义内涵, 即识别变化前后的类别转换关系, 实现从“变化发现”向“变化认知”的跨越(张兵等, 2025; 程堃等, 2025)。时空变化分析是将双时相变化检测拓展到长时间序列遥感数据, 重点关注变化过程的动态演化规律, 包括变化轨迹分析、变化趋势预测以及近实时动态监测等。多模态变化检测是当前遥感变化分析的重要发展方向, 利用光学、SAR、高光谱、LiDAR等多源异构遥感数据的互补优势, 提升复杂场景下变化检测的鲁棒性和可靠性(Cheng等, 2024)。随着人工智能技术特别是大模型技术的发展, 智能变化理解逐渐成为变化检测领域新的研究前沿, 不仅关注变化区域的自动提取, 还强调对变化原因、变化类型及其影响的深层理解(陈方等, 2023)。

遥感图像目标跟踪是利用卫星、航空器、无人机等遥感平台获取的连续时序观测数据, 对地表或空中目标进行持续定位、状态估计、轨迹恢复、行为分析和动态认知的过程。其关键知识包括目标运动规律与遥感观测机制之间的关系, 涵盖目标运动模型、状态空间建模、动态系统描述、

数据关联理论、轨迹生成理论等。单目标跟踪技术主要研究单个目标在连续遥感图像中的稳定定位与持续跟踪问题,多目标跟踪技术则关注多个目标同时存在条件下的轨迹管理与身份保持问题(李洋帆等,2025)。复杂场景目标跟踪和多源数据协同跟踪是体现遥感技术特点的重要研究方向,重点解决遥感数据中普遍存在的目标小且密集、尺度变化、背景干扰以及观测间断等问题,涵盖跨平台身份关联、跨视角目标跟踪以及天空地一体化协同跟踪等内容(Zhang等,2022b)。在人工智能技术发展的推动下,轨迹预测、行为识别、活动模式挖掘、事件感知等目标轨迹理解与智能分析相关的研究促使遥感目标跟踪向高层语义认知和智能决策演进。

遥感图像场景理解是对地表区域的组成结构、空间关系、功能属性、活动状态及演化规律进行综合认知与语义解释的过程,关键知识包括跨越底层像元特征与高阶地理信息之间的语义鸿沟,实现从“地物识别”向“场景认知”、从“信息提取”向“知识理解”的转变。其中,场景表征与特征建模研究光谱、纹理、形状、结构、上下文和语义等特征表示,为场景理解提供基础特征和全局特征的描述能力;场景分类与语义解析为整幅图像切片赋予诸如特定的土地覆盖类型或社会功能区语义标签(李德仁和李明,2014;李智等,2024);空间关系建模与结构理解研究场景内部地物之间以及区域之间的空间组织规律;场景知识建模与认知推理则面向遥感智能化发展的前沿需求,研究场景知识库构建、地理知识图谱、场景语义本体、规则约束表达、因果关系建模、视觉语言联合推理、场景问答、开放词汇场景识别以及可解释场景理解等内容(Guo等,2021;Tao等,2025),推动遥感场景理解由数据驱动的模式识别向知识驱动的认知推理发展。

遥感图像信息提取与解译的教学重点应讲解遥感图像解译的基本内涵、数据类型、任务体系和技术流程,使学生形成从像元、目标、地物、场景到过程认知的完整知识框架,理解其本质是综合图像处理、模式识别、计算机视觉、地球科学和地理信息科学等知识,将多源异质遥感数据转化为可分析、可解释、可决策的信息与知识。在教学中应突出遥感图像区别于通用视觉图像的学科特点,如俯视成像、尺度跨度大、小目标密

集、方向任意、异物同谱、同物异谱、跨区域泛化困难和多源异构融合复杂等,引导学生关注算法设计与遥感应用场景之间的关系。另外,还要面向学科发展趋势,介绍遥感基础模型、多模态融合、开放词汇检测、零样本分割、视觉语言模型、场景问答、知识图谱和可解释推理等前沿方向,使学生认识到遥感解译正在由封闭类别、单任务、强监督识别走向开放世界、跨任务、交互式 and 知识驱动的智能理解。

4.3 遥感图像高性能计算与信息工程

遥感高性能计算主要目的是通过并行处理、集群调度、分布式存储等计算技术,突破海量多源空天观测数据面临的算力瓶颈与时延限制,提升数据计算效能。遥感信息工程则在此基础上,通过系统架构设计、数据组织管理、平台集成及智能模型部署等一系列工程化体系建设,构建直接服务于常态化业务运行与行业应用的高效能信息综合系统。

随着遥感技术的飞速发展,遥感数据规模呈爆炸性增长,遥感进入大数据时代,如何高效存储、管理、共享这些海量遥感数据,成为遥感处理与应用的关键环节(Guo等,2014)。遥感数据组织管理与分发是指对海量、多源、多时相的遥感图像及相关元数据进行高效、安全、可靠的组织以及存储、检索、分发等过程,重点是通过数据组织模式的创新和系统架构的优化设计,以及云计算、微服务等对遥感数据资源的有效配置,实现遥感数据的全生命周期智能化管理,满足用户快速查询、访问与实时处理的需求。

遥感技术发展到今天,遥感处理的对象不再只是单景图像,而是存储于云端的多源、多时相、多尺度、多模态遥感大数据。遥感大数据云端访问及其预处理、深加工、智能解译等面临读取效率、时空索引、实时计算等一系列挑战,因而对遥感高性能计算提出了迫切需求。遥感数据高性能计算的技术栈可以概括为数据组织、并行计算、模型算法和服务部署等四层。相对于通用高性能计算,遥感高性能计算的核心不是单纯提升算力,而是解决“正确的数据在正确的时空位置、以正确的质量状态进入计算”的问题。

遥感卫星地面处理系统是指对卫星下传的原始载荷数据进行一系列加工处理,将其转化为具

备地理空间基准与物理定量意义的高阶标准化数据产品的核心业务系统(王冰冰等, 2021)。面对低轨大型遥感星座的蓬勃发展(柯知非等, 2023), 以及巨星座时代海量观测数据涌入带来的应用技术挑战(康利鸿等, 2024), 该系统在技术架构上正加速向高并发、智能化、低延迟的自动化流转流水线演进。聚焦于从预处理到数据产品生产的核心业务流程, 该系统主要由辐射处理、几何处理以及专题产品生产等关键组件或技术分系统构成。其中, 辐射处理部分主要负责基础辐射定标与大气校正, 几何处理部分则深度结合精细星历姿态参数、地面控制点及数字高程模型, 执行高精度的几何重建、正射校正与多源图像配准; 在此物理与几何基准之上, 专题产品生产部分进一步综合调度多源定量反演模型与前沿智能解译算法, 全自动提取特定的地学要素并生成高阶专题数据产品。

遥感图像在轨实时处理是指将传统在地面执行的数据处理和信息提取过程直接前置到卫星、无人机等空天观测平台, 实现从海量原始载荷码流到高价值时空信息的原位提取与即时转化(王家耀等, 2024)。作为构筑新型智能遥感卫星系统的核心驱动力, 该方向正围绕降低信息延迟、提升动态时效性开展深入研究。从技术体系的分支结构来看, 在轨实时处理主要分为3个层次: 首先是基础的数据预处理分支, 即构建在轨遥感图像实时预处理系统, 在轨快速完成辐射定标、几何纠正等流水线作业, 为星载计算确立统一的物理与几何基准(Qi等, 2018); 其次是面向特定任务的边缘智能解译, 其重点在于利用嵌入式边缘算力, 开展基于无人机或星载遥感平台的实时目标检测、语义分割、变化检测等信息智能提取, 实现对高价值时敏地物的快速捕获与实时感知; 最后是将在轨实时处理融入网络化协同架构, 通过突破遥感信息“云一边一端”智能服务关键技术, 将星载计算节点作为关键的“边”或“端”融入泛在互联网中, 为典型的实时应用场景提供快速、准确、灵活的时空连续信息服务(王密等, 2023)。

遥感大模型的关键知识包括通过大规模数据的无监督或自监督预训练, 提取具有极强泛化能力和普适性的地表特征表征, 从而突破传统深度学习模型严重依赖海量标注样本且难以跨任务迁

移的技术瓶颈, 推动空天信息智能解译向通用化与智能化方向发展(付琨等, 2024; 张帅豪和潘志刚, 2025)。随着视觉架构与大语言模型的深度融合, 不同研究机构陆续推出了多种各具技术特色的代表性模型。RingMo(空天·灵眸)创新性地采用了掩蔽图像建模机制, 构建了专门契合复杂地球观测数据特性的遥感基础模型, 有效提升了底层视觉特征的提取能力(Sun等, 2023)。SkySense则聚焦于多模态数据协同, 旨在打造面向地球观测图像通用解译的多模态遥感基础模型架构, 进一步拓宽了模型的感知边界(Guo等, 2024)。在视觉与自然语言交互维度, EarthGPT作为一种通用的多模态大型语言模型, 专门针对遥感领域的多传感器图像理解进行了深度优化, 赋予了跨传感器复杂场景的自然语言认知与综合解译能力(Zhang等, 2024b)。在此基础上, EarthMarker进一步在多模态大语言模型中引入了视觉提示机制, 显著提升了模型对遥感空间要素进行精细化定位、目标级感知与交互式解译的效能(Zhang等, 2025a)。AlphaEarth Foundation通过多模态表征学习模型, 整合如光学、雷达、DEM和地理上下文等数据, 以类似虚拟卫星观测的形式打造全球统一通用嵌入场。总体而言, 这些模型通过涵盖视觉预训练、多模态融合及交互式提示等多维度的技术创新, 正加速重塑遥感图像智能理解的技术体系。

遥感图像高性能计算与信息工程的教学应引导学生理解遥感数据已由单景图像转变为多源、多时相、多尺度、多模态的时空信息资源, 其处理过程需要依托分布式存储、并行计算、GPU/异构加速、云端调度和服务化部署等高性能计算技术。在教学中突出数据组织、并行计算、模型算法和系统服务的贯通关系, 使学生认识到遥感高性能计算的核心不只是提升算力, 而是海量遥感数据如何高效组织、快速计算、智能解译并工程化服务。此外, 在课程中结合遥感卫星地面处理系统等典型工程案例, 引入在轨实时处理、云一边一端智能服务和遥感大模型等实践训练, 培养学生在设计系统、组织数据、部署模型、应用服务等方面的综合能力。

5 遥感应用: 图像分析与多领域应用

遥感应用是遥感科学与技术学科实践价值的

核心体现,也是学科教学体系中链接基础理论、核心技术与行业需求的关键环节。遥感应应用重点涵盖国土资源、农业农村、生态环境、灾害应急、气象服务、海洋水利、城市管理、地质矿产、行星探测等领域,以及数字地球等前沿方向,各领域既相互独立又协同联动,形成了多源数据融合、动态过程监测、综合评估预警和治理决策支持于一体的全方位应用体系,对接各行业重要业务需求,为国家重大战略实施提供技术支撑(徐冠华等,2016)。

遥感应用的知识体系已由聚焦应用场景的图像判读理解,拓展为面向自然环境过程认知、行业业务化监测和数字化决策服务的综合技术体系(陈述彭等,2000;Wulder等,2022),并已从通用解译算法的简单复用,发展至依托不同场景的地物特征、行业业务与科学认知需求的专业化、差异化、体系化的图像分析技术(Tong等,2014;张兵,2016;Hong等,2021)。遥感应用的教学设置,需使学生系统掌握各行业差异化遥感图像分析技术,明晰不同应用领域的技术原理、知识边界与实践方法,实现遥感基础理论、探测手段、处理算法与行业业务场景的深度耦合。

5.1 国土资源遥感应应用

国土资源遥感应应用主要服务于国土空间规划、自然资源调查监测与资产清查、土地保护等领域,是支撑自然资源统一管理、国土空间治理和生态文明建设的 key 技术手段,其应用范围涵盖陆地、海域范围内的土地、森林、草原、湿地、水等自然资源要素的本底调查、动态监测与监管执法,是遥感应应用领域中基础性方向之一(陈述彭等,2000)。早期国土资源遥感应应用以单一卫星数据的土地覆盖人工制图为主,技术手段与应用场景较为单一;现阶段已逐步发展为天一空一地多平台协同观测体系,形成多模态、多尺度、长时序的综合观测能力,并结合云计算、大数据与智能解译算法的深度应用,实现了从传统周期性国土资源静态调查向全天候、全覆盖动态感知的跨越式转变(熊盛青,2002;Brown等,2022;王密等,2023)。

国土资源遥感应用的知识体系主要包括国土资源要素精细提取、长时序时空变化检测、多源数据精准配准集成分析、国土资源业务化智能解

译等内容(龚健雅等,2025),针对国土要素分布混杂、动态变化细碎、监管精度严苛等场景特征,创新区别于通用地表解译、贴合自然资源分类标准的图像分析技术。国土资源要素精细提取针对耕地、建设用地、矿山、零散坑塘等地类交错、细碎斑块密集的特征,在通用像素分类算法基础上拓展面向对象多尺度分层分割、国土分类规则约束型语义分割、混合像元逐级分解等图像处理技术,结合土地利用分类体系搭建专属标注样本库,提取国土资源要素,甄别耕地非农占用、零星违建、耕地撂荒等小型变更图斑,支撑林草资源遥感监测普查等(陈军等,2016;张增祥等,2016;刘力荣等,2024)。长时序时空变化检测面向年度国土变更调查与卫片执法等需求,集成时序影像重构、物候周期基线拟合、时空谱突变识别等技术,利用连续多年遥感数据集自动剔除季节物候波动干扰,批量输出符合自然资源执法规范的变更矢量图斑等(Cohen等,2010;Zhu和Woodcock,2014;朱紫阳等,2025)。多源数据精准配准集成分析针对卫星、航空、无人机、地面核查多源异构数据基准匹配问题,定制跨遥感器自适应辐射归一化、多级尺度几何精校正、地籍边界约束镶嵌融合方法等,依托国土调查先验数据,消除多平台数据源不兼容问题。国土资源业务化智能解译深度融合国土行业规程与图像处理模型,搭建规则引擎和深度学习协同的解译架构,嵌入规划管控、用地管制等业务阈值参数,打通原始影像至标准化国土矢量成果的自动化生产链路,形成算法适配行业规范的定制化图像处理模式,构成国土遥感工程化应用的核心知识模块。

国土资源遥感应用的教学重点内容包括多源国土影像配准与跨源辐射校正、细碎地物的面向对象分割、国土要素的语义分割模型、时序遥感数据的国土资源变化检测等,并结合我国自然资源国土空间“一张图”,实现理论知识与行业工程应用的深度对接实践。

5.2 农业遥感应应用

农业遥感应应用主要聚焦于粮食安全保障、农业生产全过程监测、农业防灾减灾、乡村振兴以及智慧农业等关键方向,覆盖大田种植业、养殖业、设施农业等各类农业生产。其核心在于实现对农业生产要素的大面积、快速、精准、定量、

智能感知, 为农业管理与决策提供科学依据, 已成为支撑国家粮食安全的重要手段(吴炳方等, 2025)。当前, 农业遥感应用的内涵已不再局限于传统的“作物识别与长势判断”, 而是持续向田块尺度精细化诊断、生产过程动态化监测、农业参数精准化反演方向演进, 逐步发展为面向农业生产全过程的定量监测与决策支持体系, 贯穿作物种植、生长、收获及产后评估等完整链条(Weiss等, 2020)。

农业遥感应用的知识体系主要包括田块尺度作物精细分类、作物生物物理化学参数反演、作物长势监测与综合诊断、遥感—作物模型数据同化等内容(哈斯图亚和陈仲新, 2025), 针对农田地块破碎、作物物候分异明显、农情胁迫诱因繁杂等特点, 创新农业行业的图像分析技术。田块尺度作物精细分类以农田地块权属边界为先验约束, 研发适配细碎水田、轮作耕地等的自适应多尺度分割算法, 融合地块几何拓扑、田间沟渠纹理与作物特征光谱, 构建分区域农作物深度学习分类模型, 区分小麦、水稻、玉米等主粮作物, 同时识别耕地内部休耕、撂荒、非农侵占等地块状态。作物生物物理化学参数反演依托作物独有光谱吸收特征, 在通用植被反演框架下利用PROSPECT-SAIL等模型进行本地化参数修订, 基于红边、热红外波段构建作物水分、叶绿素、氮素胁迫等农业特有光谱指数, 结合分生育期的机器学习回归算法等, 实现叶面积、冠层含水量、土壤养分、作物生理胁迫指标精细化定量提取(陈仲新等, 2016; 沈艳艳等, 2026)。作物长势监测与综合诊断利用时序影像逐景辐射校正、云掩膜插值修复、作物生长时序曲线重构等处理技术, 依托区域多年物候数据库提取关键生育节点长势状况, 并建立多特征融合胁迫判别模型, 同时结合病虫害、旱涝灾害等特有光谱图谱, 区分不同诱因造成的农田长势异常, 量化受灾地块空间范围与受损等级等(Zhang等, 2003; 吴炳方等, 2025)。遥感—作物模型数据同化将遥感时序反演参数作为观测约束, 集合卡尔曼滤波、粒子滤波算法等实现遥感观测与作物机理模型耦合, 持续优化作物生长模拟初始场, 实现粮食产量网格化预估, 贯通遥感图像信息向农业机理模拟的技术链路(Dorigo等, 2007; Huang等, 2024)。

农业遥感应用的教学重点内容包括高分辨影

像的农田地块分割与农作物分类、利用作物光谱原理的植被指数构建、辐射传输模型的农田适配构建、物候提取与农田胁迫识别等, 并结合作物机理模型, 掌握粮食产能定量预估, 并紧密对接农业农村常态化监测、粮食安全估产等业务场景, 配套行业真实遥感数据集、农情监测业务案例开展综合实践。

5.3 生态环境遥感应用

生态环境遥感应用范围涵盖生态系统、大气环境、水环境、土壤环境等要素的监测、评估与治理, 核心是实现生态环境状态的常态化、大范围监测, 揭示生态环境变化规律, 为生态环境保护、污染治理和生态文明建设提供技术支撑(Li和Strahler, 1986; Wulder等, 2022)。目前, 生态环境遥感应用已从早期依靠光学影像开展植被、水体、土地覆盖单要素分类判读的模式, 发展至打通遥感观测、地面实地调查、生态机理模型的数据链路, 形成兼顾生态系统结构、物质循环过程、环境质量水平的综合评估模式, 既能完成大气污染物、水体水质等环境指标定量反演, 也可核算生态系统服务价值、识别生态退化区域、评估生态修复工程成效等(Pettorelli等, 2014)。

生态环境遥感应用的知识体系主要包括生态本底参数反演、环境要素定量监测、生态扰动识别、生态环境质量综合评估等内容(王桥等, 2010; 闻建光等, 2023), 针对生态系统立体分层、水气介质光谱微弱易受干扰、人为扰动渐进隐蔽等特点, 面向生态系统结构、生态功能、环境质量等多个维度, 创新生态环境行业的图像分析技术。生态本底参数反演突破通用植被二维反演边界, 一方面依托植被生理光谱规律定制生态专用光谱指数, 改进植被辐射传输模型以适配森林、湿地、草地群落差异特征, 反演植被覆盖度、NPP等二维生态参数(Jacquemoud等, 2009; 李爱农等, 2025); 另一方面优化激光雷达点云滤波、分层分割算法等, 提取林冠高度、群落垂直分层等三维生态结构数据, 形成多/高光谱-激光协同的生态本底信息提取图像处理技术(Dubayah等, 2020)。环境要素定量监测主要针对大气痕量气体、水体离水辐亮度偏弱等特征, 构建精细化大气辐射传输模型与水体的大气校正算法, 结合高光谱精细光谱拆分等反演气溶胶、氮氧化物、

叶绿素、悬浮物等污染指标,并利用污染溯源空间插值与特征追踪图像处理等技术,刻画污染物空间分布与迁移路径(Gitelson等,1993;吴季友,2024)。生态扰动识别针对生态退化结构、属性等特征,通过时序影像归一化、生长基线拟合、时序残差突变检测等算法,结合物候、土地利用地学规则剔除气候自然波动带来的伪变化,识别植被退化、湿地萎缩等状况的主导扰动。生态环境质量综合评估融合多源遥感反演指标,研发遥感指标归一化预处理、熵权—机器学习组合赋权建模等技术,整合生态结构、环境质量、扰动强度多维度参数构建综合指数,实现全域生态质量分级划定(Pettorelli等,2014;高吉喜等,2023)。

生态环境遥感应用的教学重点内容包括植被光谱反演与激光雷达三维生态参数解译、大气及水体的信息提取方法与污染指标反演、长时序生态扰动时序检测、多源指标融合的生态质量综合建模等,并结合生态保护红线、生态修复成效评估等真实业务数据集开展综合实践,夯实面向生态治理业务的定量分析与综合研判能力。

5.4 灾害应急遥感应用

灾害应急遥感应用范围覆盖各类自然灾害、事故灾难的监测、评估、预警、处置与恢复重建,核心是利用遥感科学与技术的快速、大范围、非接触式观测优势,为灾害应急管理全流程提供技术支撑,最大限度减少人员伤亡和财产损失,是保障人民生命财产安全、维护社会稳定的重要技术手段(Guo等,2010;吴一戎,2013)。灾害应急遥感应用对象涵盖地震、洪涝、冰湖溃决、火灾、地质灾害、旱灾、海洋灾害和高温热浪等多类灾种,其任务已由早期灾害影像判读,发展为面向灾害识别、动态监测、损失评估、风险预警和灾后恢复的全过程技术支撑,直接对接应急管理“防、减、救”一体化的业务需求(Chen等,2024)。

灾害应急遥感应用的知识体系主要包括灾害分布检测、灾害演变刻画、灾害影响评估等内容,其主要任务是将不同体制卫星影像中灾害目标在分辨单元内的电磁波散射(雷达)、反射(可见光)或发射(红外)信号等进行逐一处理,通过全场景立体解算,刻画灾害分布、演变、影响的过程(Moreira等,2013;陈方等,2022),针对

灾后地表突变剧烈、受灾地物形态破碎、多源影像时相偏差大、应急处理时效需求高等特点,创新灾害应急行业的图像分析技术。灾害分布检测需要高质量、协同检测灾害目标的类型、位置和范围特征,针对灾后地物光谱纹理随机异变、受灾图斑零散分布等问题,研发多灾种的灾害特征一体化增强方法,利用多频域分层灾害信号解混、反卷积—矩阵卷积关联信息挖掘等技术,解决地物信号混杂、图谱信号弱、形状不规则等造成的灾害目标的错漏提取问题。灾害演变刻画针对孕灾、致灾、成灾全过程演化的特点,研发灾害目标边界形态演化表征、灾害目标本体的空间相对变化刻画、自适应原型引导的时序灾害目标表征等技术,通过单体对象几何空间距离计算、多对象时序语义关系计算等,消除不同卫星过境监测时的几何与光谱基准偏差,连续刻画冰湖溃决、火情扩张等灾害动态过程(Zou等,2023)。灾害影响评估针对多模态遥感数据进行危害阈值精确划定时的动态差异性,研发灾害场景危害程度自适应任务分配、危害阈值跨任务交互计算、危险性—暴露度—脆弱性的多模态协同计算等技术,通过时频学习注意力机制、基于地物类型差异的危害阈值划定等,实现灾害场景和非灾害场景任务的任务均衡分配、危害阈值特征跨线程协同计算、危险性—暴露度—脆弱性驱动的危害影响度量,适配突发灾害海量遥感数据短时影响综合评估处理需求(陈方等,2022)。

灾害应急遥感应用的教学重点内容包括多体制卫星的多灾种影像预处理与分灾种目标提取算法、时序遥感的灾变边界动态追踪、多线程灾害危害阈值计算、多源信息融合的灾害损失分级建模等,并结合典型洪涝、林火、滑坡等遥感监测真实业务数据集,模拟应急快速响应全流程任务,强化学生面向突发灾害应急场景的快速解译、定量评估与工程化处理能力(陈方等,2022;Chen等,2024)。

5.5 气象遥感应用

气象遥感应用范围涵盖大气温湿状态、云降水结构、水汽分布、气溶胶与温室气体组分等气象与大气环境要素,通过对大气圈层全域、连续、三维动态观测,弥补地面气象站点稀疏的不足,揭示极端天气演变、大气污染输送、云辐射反馈、

全球大气环流变化等关键过程, 为天气预报、气候研究、大气环境治理和防灾减灾提供技术支撑(徐冠华等, 1996, 2016; Guo等, 2014)。气象遥感应用以大气辐射传输、大气粒子散射吸收机理为物理基础, 已突破了早期单一气象要素定性监测的局限, 发展为融合物理机理建模、大气参数定量反演、气象数据同化、天气过程解析与气候效应评估的综合性应用模式(Li和Strahler, 1992; Tong等, 2014; Wu等, 2019b)。

气象遥感应用的知识体系主要包括大气辐射传输机理与建模、大气三维剖面参数反演、云降水与天气系统解析、多源气象遥感数据同化等内容, 面向大气圈层三维动态、无固定地物、强动态演化等特点, 创新气象行业的图像分析技术。大气辐射传输机理与建模基于大气分子、气溶胶、云滴散射吸收规律, 构建分层大气辐射正演模型, 依托波段精细拆分、光学厚度迭代优化等图像处理技术, 量化不同高度大气组分对卫星入瞳辐亮度的调制作用, 建立观测辐亮度向大气真实物理量转化的物理解译链路(Li和Strahler, 1986; 李小文等, 2002; Zhang等, 2024a)。大气三维剖面参数反演依托辐射传输正演模型, 开发最优估算法、统计机器学习逆向反演等算法, 自上而下反演对流层至平流层大气温湿气压垂直廓线, 突破地面站点仅能获取近地表面观测的局限, 搭建大气立体空间数据集。云降水与天气系统解析面向台风、强对流等灾害天气, 开展遥感驱动的云系分类、云顶参数、降水落区与强度提取, 依托连续时序观测追踪天气系统生消演变, 解析水汽辐合、热力配置等关键演变条件。多源气象遥感数据同化打通遥感观测产品与数值预报模型壁垒, 将遥感反演廓线、水汽、云参量通过最优插值、集合滤波等同化算法融入预报模式, 修正模式初始场误差, 实现遥感静态观测向天气模拟动态驱动数据转化。

气象遥感应用的教学重点内容包括大气光学特性与辐射传输方程理论、大气廓线反演算法、云型识别与降水参数提取、多源遥感数据与预报模型同化等, 并依托风云系列等国产气象卫星数据, 结合气象预报业务案例开展教学实践, 培养学生开展大气环境遥感监测、气象要素反演、数值预报优化的专业能力。

5.6 海洋与内陆水体遥感应应用

海洋与内陆水体遥感应应用涵盖海洋及内陆水体(河流、湖泊、水库等)的水循环过程监测、水资源管理、水环境保护和海洋资源调查及安全保障, 通过遥感科学与技术解决水体范围广、变化快、观测难度大等问题, 为海洋资源开发、水资源管理和水环境保护提供技术支撑。海洋与内陆水体遥感应应用已从早期单一的水体范围制图、简单水质参数提取, 逐步拓展为集大气精准校正、水色定量反演、水文要素解析、时序过程演化建模于一体的综合应用体系, 能够刻画水体水质状态、水文形态特征、海洋动力过程与水生态演变规律, 实现从静态要素观测向动态机理解析、多维度综合评估的提升(潘德炉和李淑菁, 1998; Palmer等, 2015; Chen等, 2021; 张兵等, 2021)。

海洋与内陆水体遥感应用的知识体系主要包括水体精准大气校正、水生态水质参数定量反演、水陆边界动态精细提取、水体多维时序演化解析等内容, 针对水体离水辐亮度微弱、水陆交界季节性变迁、海洋动力过程时空多变等特点, 创新海洋与内陆水体目标的图像分析技术(蒋兴伟等, 2016)。水体精准大气校正针对水体信号极易被大气气溶胶、水汽掩盖的特点, 建立水体辐射传输校正模型, 分步剔除大气散射吸收干扰与云霾噪声, 还原水体真实离水辐亮度, 是水质参数精准反演的关键图像处理环节。水生态水质参数定量反演依托水体组分独有光谱响应规律, 融合统计、辐射传输、机器学习等多类模型, 一方面反演叶绿素a、悬浮物、透明度等内陆水体指标, 支撑黑臭水体、藻华监测; 另一方面提取海表温度、海冰、海洋初级生产力等海洋环境要素, 兼顾内陆水环境与近海动力环境监测需求(Mishra和Mishra, 2012; 童庆禧等, 2016; 张方方等, 2023)。水陆边界动态精细提取针对汛期湖体扩缩、河道迁徙、潮间带潮汐进退带来的边界时变特征, 采用自适应阈值、面向对象与深度学习分割等算法, 提取动态水域轮廓, 解决固定阈值法难以适配水体季节性变迁等问题(李红波等, 2002; Pekel等, 2016; Lv等, 2024)。水体多维时序演化解析搭建长时序标准化水体数据集, 从年际、季节、月度多时间尺度解析水域面积消长、水质迁移演化、地下水变化、海平面波动、水循环变化规律,

区分气候波动与人类排污、围垦等人为扰动造成的水体演变差异,实现从单点瞬时监测向全过程机理解释的能提升。

海洋与内陆水体遥感应用的教学重点内容包括水体辐射原理与大气校正、内陆水质及海洋环境参数遥感反演、水陆动态监测方法、时序水体演变驱动因素解析等,并紧扣流域水环境治理、海洋生态保护、海岸线管控等行业实际业务进行综合实践,提升学生面向水生态环境遥感监测与综合治理的专业应用能力。

5.7 城市遥感应用

城市遥感应用覆盖各类城市及乡镇的城市规划、建设、管理和人居环境优化等领域,监测城市空间形态、基础设施与生态环境等动态演变,为新型城镇化、城市治理现代化与可持续发展提供重要空间信息支撑。城市遥感应用正经历从单一地物识别向城市陆表环境综合监测的转型,研究范式从二维静态表征向三维动态过程耦合、从客观物理观测向主客观融合的人本感知演进(李德仁, 2005; Guo等, 2014),形成了以“绿度、热度、灰度、湿度、亮度、宜居度”为代表的“城市六度空间”遥感技术体系,前五度分别解构城市物理本底,宜居度则实现对城市综合人居环境的整体评判。

城市遥感应用的知识体系主要包括城市高密度地物精细解译、城市三维形态与形变监测、城市多维度环境参数反演、城市宜居性综合评估等内容,围绕城区人工建筑密集、地类光谱混淆、人地耦合作用突出等特点,创新城市场景的图像分析技术。城市高密度地物精细解译针对建筑、道路、不透水面交错排布、光谱混叠严重等问题,采用面向对象分割与深度学习语义解译等算法,完成建成区提取、建设用地变更监测、路网与建筑边界提取、城市功能区智能划分,破解传统像素分类密集城区地物错分、边界粗糙的弊端(Gao等, 2008; Li等, 2022; 张兵等, 2025)。城市三维形态与形变监测突破二维平面局限(Su等, 2024; Shi等, 2025),一方面依托激光雷达等反演建筑层高与城市竖向空间格局等,支撑城镇由平面扩张向立体开发的演变模拟;另一方面借助InSAR干涉图像处理等实现毫米级地表与建构筑物形变探测,持续监测城区地面沉降、高层建筑与

重大市政工程形变隐患。城市多维度环境参数反演定量提取绿度、热度、湿度、亮度等核心指标,利用植被指数表征绿地分布、地表温度反演刻画热岛格局、水体遥感监测城区积涝、夜光数据反演城市群经济与能耗空间特征,多维度量化城市本底环境(Meng等, 2018; 孟庆岩, 2020; 张琳琳等, 2025)。城市宜居性综合评估耦合土地利用、生态、热环境与社会属性,构建多指标综合评价模型,完成全域宜居分级、生态短板识别,支撑城市更新空间优化决策(Zhang等, 2025b)。

城市遥感应用的教学重点内容包括城区高分辨率影像预处理与语义分割、城市场景点云三维重建、城市InSAR形变数据处理、城市社会经济状况的夜光遥感感知、城市多环境参数反演与宜居综合评价等,并对接城市安全监测、人居环境提质、城市更新等行业需求进行综合实践,培养学生面向城市精细化治理的遥感定量分析、空间研判与综合应用能力。

5.8 地质矿产遥感应用

地质矿产遥感应用覆盖地质调查、矿产资源勘查、地质灾害监测等领域,实现对岩性、地层、构造、蚀变带及矿化异常等地学信息的快速识别与综合解译,提升地质调查和矿产勘查效率,为矿产资源安全保障和地质灾害防控提供技术支撑。地质矿产遥感应用已从早期宏观地层、构造目视解译,逐步向蚀变矿物精准识别、矿物组分定量反演、隐伏矿异常综合预测方向发展;依托矿物特征光谱、地表构造形态与覆被穿透探测能力,可系统提取岩性、地层、断裂褶皱、矿化蚀变等示矿信息,构建遥感综合找矿模型,在高海拔、荒漠、浅覆盖等重点勘查区发挥关键作用。

地质矿产遥感应用的知识体系主要包括高光谱蚀变矿物精细识别、多尺度地质构造形态解译、复杂覆被区多源地学信息提取、多因子综合成矿远景建模等内容,围绕矿物光谱指纹、构造地貌特征、林区及浅覆盖荒漠成矿探测等特点,创新地质矿产领域的图像分析技术。高光谱蚀变矿物精细识别利用蚀变矿物特有吸收谷光谱特征,通过MNF降噪、PPI纯净像元提取、光谱匹配滤波、光谱角匹配、线性光谱解混等图像处理算法,剔除围岩与植被混合像元干扰,区分褐铁矿、绿泥石、绢云母等蚀变矿物,实现大范围蚀变填图与

矿化强度量化(张兵, 2016; Gao等, 2017; Chen等, 2025)。多尺度地质构造形态解译依托影像色调、纹理、水系错动等地貌标志, 使用边缘检测、纹理分割算法等逐级提取巨型断裂、次级节理、环形岩体等控矿构造, 利用大尺度卫星影像把控区域构造格架, 中高分影像细化中小型断层, 耦合DEM还原构造产状, 明确构造控矿规律(陈述彭, 2005; Ahmadi等, 2023)。复杂覆被区多源地学信息提取面向林区、浅覆盖荒漠等光学盲区, 依托雷达后向散射异常捕捉隐伏构造与矿化扰动信号, 配套山地地形畸变校正、阴影剔除算法等, 补齐覆被遮挡缺失的地质信息(Chen等, 2023)。多因子综合成矿远景建模集成蚀变、构造、岩性遥感因子, 耦合物化探实测数据, 通过随机森林机器学习等算法量化控矿权重, 分级圈定成矿远景区与勘查靶区。

地质矿产遥感应用的教学重点内容包括矿物波谱与高光谱预处理、构造影像解译、隐伏地质信息提取、成矿预测建模与勘查靶区优选等, 并结合地质调查、矿产资源勘查等行业业务场景, 开展从光谱预处理、地质解译、异常提取到成矿预测等的全链条教学实践, 有效提升学生面向地质与矿产工程场景的遥感应用能力(Yuan等, 2026)。

5.9 行星探测遥感应用

行星探测遥感应用涵盖月球、火星、小行星及其他太阳系天体的探测与研究, 核心是通过深空探测平台搭载的遥感器, 获取行星表面及浅表层信息, 行星遥感应用可分为工程应用和科学应用两大类, 为行星科学研究、深空探测工程实施提供技术支撑, 是推动航天强国战略、拓展人类认知边界的重要手段。相较于传统地球遥感, 行星探测遥感面临探测距离远、深空辐射环境复杂、信号衰减显著、无地面控制点校验、天体地物机理未知等特殊难题, 随着我国“嫦娥”探月工程、“天问一号”火星探测等重大深空工程的持续推进, 行星探测遥感已从单一影像成像观测, 逐步发展为集深空影像精准处理、天体地貌解析、矿物组分反演、次表层探测与工程智能保障于一体的技术体系, 兼顾深空工程落地应用与行星地质演化、宜居性评价、深空资源探索等前沿科学研究, 有效拓展了遥感学科的应用边界(邸凯昌等,

2016; He等, 2021; 郭华东等, 2022)。

行星探测遥感应用的知识体系主要包括深空影像辐射几何精校正、行星地表形貌精细解析、地外矿物组分光谱反演、深空次表层结构探测建模等内容, 针对深空无控制点、空间辐照干扰、远距离信号衰减等特点, 创新行星探测的图像分析技术(邸凯昌等, 2016; 凌宗成等, 2025)。深空影像辐射几何精校正突破地面控制点校正模式, 建立深空专属星上定标与无控几何校正模型, 依托畸变改正、高能粒子噪声滤除、辐射归一化图像处理等, 实现多轨道深空影像配准与辐射基准统一, 解决无控校正等难题(童庆禧等, 2006; 程春泉等, 2025)。行星地表形貌精细解析在缺少地物先验知识库前提下, 采用地形分割、形态特征提取、地貌参数统计算法等, 自动识别撞击坑、火山、断裂、熔岩管道、沟壑等地外典型地貌, 量化坡度、起伏度参数, 反演天体构造演化规律, 支撑着陆区选址风险研判等(Kim等, 2023; 童小华等, 2024)。地外矿物组分光谱反演结合地外矿物光谱指纹特征, 采用适配深空辐射干扰的光谱匹配、线性解混模型, 剔除空间辐照噪声, 定量区分硅酸盐、含水氧化物等地表矿物类型与丰度(He等, 2021; Ke等, 2024)。深空次表层结构探测建模依托雷达回波解析算法等, 反演月壤厚度、地下冰层、隐伏空洞等次表层信息, 耦合形貌与矿物数据构建综合评价模型, 服务支撑深空资源探查、巡视路径规划等(Roncoroni等, 2024; Soldovieri等, 2025)。

行星探测遥感应用的教学重点内容包括深空无控校正、行星地貌自动提取、地外矿物光谱反演、雷达次表层解译等, 并结合深空探测、行星科学、地外资源勘查等前沿科研与学科发展方向, 利用国内外深空探测公开数据集开展专题实践, 培养学生面向深空场景的遥感数据处理、地外科学分析与前沿创新能力。

5.10 数字地球遥感应用

数字地球科学平台是融合遥感、大数据、云计算和人工智能等新一代信息技术形成的综合研究平台, 其核心目标是利用遥感观测等技术手段, 实现地球系统多圈层、多尺度信息集成管理与综合分析, 是推动跨部门、跨领域数据协同治理与综合应用的重要基础设施(Guo等, 2014)。数字

地球中的遥感应用,利用多平台重复观测、海量遥感数据云端并行处理、多模态遥感模型协同分析的优势,突破传统遥感数据碎片化、处理效率低、分析维度单一的局限,构建“多源数据获取—云端智能处理—指标定量反演—综合决策服务”的技术模式,来系统刻画生态、水文、城市、大气、人文等多要素协同演变规律,支撑联合国可持续发展目标量化评估、全球气候响应机制研究与国家生态文明数字化建设,是新时代遥感学科服务宏观地学研究 with 全球空间治理的核心支撑技术(陈述彭, 1999; 郭华东和杨崇俊, 1999; Guo 等, 2021)。

数字地球遥感应用的知识体系主要包括多源异构遥感数据标准化融合、云端遥感大数据智能处理、可持续发展指标定量遥感建模、全球长时序地学过程耦合解析等内容,面向海量多源数据异构、全球尺度算法受限、多圈层要素耦合复杂等特点,创新数字地球领域的遥感图像分析技术。多源异构遥感数据标准化融合针对多平台、多分辨率、多时相遥感基准不匹配问题,开展统一辐射校正、几何配准、时空归一化与跨源信息融合,把遥感与辅助地学数据归集至统一时空基准,形成全域标准化数据集(徐冠华等, 1999; Li 等, 2018)。云端遥感大数据智能处理依托云计算分布式算力,在云端实现全球遥感批量预处理、地物智能分类、覆被变化自动检测,突破单机算力瓶颈,支撑全球高频次全覆盖自动化解译(Tuia等, 2025)。可持续发展指标定量遥感建模对标可持续发展目标(SDGs)指标,面向SDG 2 零饥饿、SDG 6 清洁饮水和卫生设施、SDG 7 经济适用的清洁能源、SDG 11 可持续城市和社区、SDG13 气候行动、SDG 14 水下生物和SDG 15 陆地生物等内容,构建遥感反演与评估模型,实现指标空间化、量化、长时序标准化核算(Guo 等, 2021; 陈方等, 2023)。全球长时序地学过程耦合解析整合历年标准化遥感长序列产品,耦合大气、水文、生态、人文社会多源辅助数据,从年际、年代际尺度解析全球生态演化、土地退化、城市扩张、气候环境响应等多圈层耦合演变规律,实现由单点指标统计向宏观地学成因与演化机理深度分析。

数字地球遥感应用的教学重点内容包括海量遥感归一化与时空融合方法、云架构下遥感批量智能解译、SDGs 遥感指标建模、全球长时序地学

耦合分析等,并结合地球大数据与数字地球前沿领域,开展数智化、全球化的数字地球遥感应用教学实践,提升学生的地球大数据处理、宏观地学分析与跨领域综合应用能力(Guo等, 2021)。

6 结 语

本文系统梳理遥感科学与技术的发展历程,阐述了学科内涵与交叉特征,以“遥感科学—遥感探测—遥感处理—遥感应用”四位一体的学科体系架构为指导,剖析了遥感科学与技术学科知识体系的核心内容、内在逻辑与耦合机制,结合学科知识体系系统探讨了适配新时代人才培养需求的教学内容,明确了遥感学科理论本源、技术载体、处理枢纽与实践出口的闭环发展逻辑,为遥感科学与技术学科规范化、体系化教学建设与高质量发展提供了理论支撑与框架依据。

从学科知识体系来看,遥感科学作为核心理论根基,依托地物波谱特性、遥感辐射传输机理、遥感定量反演与信息同化理论、遥感定标与真实性检验四大核心方向,建立了完备的学科理论体系,阐明了遥感信息生成、演化、校验的内在科学规律,是学科创新发展的基石。遥感探测以学科理论为支撑,覆盖探测物理基础与成像原理、遥感器成像体制与成像效能、天空地遥感观测平台的核心知识,构建了多维度、多尺度的数据获取技术体系,是衔接理论研究 with 工程实践的关键载体。遥感处理聚焦定量化预处理、信息提取与解译、高性能计算与信息工程,打通了遥感数据向有效地学信息转化的技术链路,是学科体系的核心中转枢纽。遥感应用立足国土、农业、生态、应急、行星探测等多领域场景,形成了专业化、差异化的行业应用技术体系,实现了学科理论与技术的价值落地。四大模块相互赋能、动态闭环,构成了逻辑严谨、层次清晰、交叉融合的遥感学科知识体系。作为一门典型交叉学科,遥感科学与技术深度融合物理、电子、计算机、地球科学等多领域知识,其知识链条贯穿机理、观测、建模、计算、应用全流程,既强调基础理论的严谨性,又注重工程技术的实用性,这也决定了遥感科学与技术学科人才培养必须兼顾理论素养、技术能力与行业视野。当前中国已建成自主可控的遥感卫星观测体系,在辐射传输机理研究、多体制探测技术、遥感数据智能处理、数字地球应用

等领域形成一批特色成果,也为学科知识体系的落地与迭代筑牢了科研与产业根基。

从教学培养层面来看,现有遥感学科教学已形成覆盖理论、探测、处理、应用的基础课程与实践体系。在课程体系建设方面,遥感科学与技术学科正积极推进学科课程体系的系统化构建,同步推动教材体系的迭代与优化,组织高校、科研院所、行业科研团队撰写具备科学性、前瞻性与时效性的系列教材。在实践教学方面,遥感科学与技术作为一门实践性强的交叉学科,其教学逐步从知识型实验为主的课堂模式,转向结合野外台站的综合性实验体系,推动教学从课堂走向野外台站,从模拟走向真实场景。同时,在教学内容上正加强对宏观系统、微观世界、极端条件下的遥感科学前沿方向的引入,培养学生形成前沿科学问题驱动的工程实践能力,以适配新时代遥感学科交叉发展、智能化升级与国家战略落地对复合型创新人才的培养需求。

立足学科发展与教学建设长远需求,未来遥感科学与技术学科建设与教学可从3方面重点推进。一是完善系统化学科教学框架,以四位一体学科知识体系为核心,构建课程体系与教学内容,打通机理、探测、处理、应用各模块的教学壁垒,融入大数据、人工智能、多源协同观测等前沿内容,构建“理论筑基、探测赋能、处理创新、应用落地”的一体化教学体系。二是强化交叉融合人才培养,立足遥感学科多学科交叉核心特征,融合物理学、计算机科学、地球科学、电子工程等多学科知识,优化实践教学体系,培养学生的物理洞察力、建模反演能力、智能解译能力与工程应用能力。三是推动学科教学与科研应用协同发展,依托国产遥感卫星体系、遥感大模型、天—空—地一体化观测等前沿科研成果,实现科研资源向教学资源的转化,依托行业实际应用场景搭建实训平台,提升教学与行业需求链接水平。

综合来看,中国遥感科学与技术已具备成熟的理论基础、完备的探测和数据处理能力与多领域应用体系,在人工智能、大数据、云计算等数字技术快速迭代的背景下,遥感科学与技术学科迎来了数智化转型的重大机遇。未来遥感科学与技术学科需持续深化四位一体学科知识体系的完善与优化,进一步拓展面向宏观系统、微观世界、极端条件的新型应用场景,持续革新教学模式、

丰富教学资源,构建适配数智时代、契合国家战略、接轨学科前沿的人才培养框架,以此提升遥感服务国家重大战略、支撑全球科技治理与推动地球科学创新发展的核心能力。

志 谢 中国遥感科技的发展是一代代中国遥感人开拓进取、接续奋进的历史,我们深切缅怀陈述彭院士、李小文院士为中国遥感事业所做出的奠基性贡献,我们也衷心感谢和致敬李德仁院士、徐冠华院士、童庆禧院士、薛永祺院士、郭华东院士、龚健雅院士、吴一戎院士等遥感科学家为遥感科技发展和学科建设所做出的开创性杰出贡献!

参考文献(References)

- Ahmadi H, Pekkan E and Seyitoğlu G. 2023. Automatic lineaments detection using radar and optical data with an emphasis on geologic and tectonic implications: A case study of Kabul Block, eastern Afghanistan. *Geocarto International*, 38(1): 2231400 [DOI: 10.1080/10106049.2023.2231400]
- Brown C F, Brumby S P, Guzder-Williams B, Birch T, Hyde S B, Mazzariello J, Czerwinski W, Pasquarella V J, Haertel R, Ilyushchenko S, Schwehr K, Weisse M, Stolle F, Hanson C, Guinan O, Moore R and Tait A M. 2022. Dynamic World, Near real-time global 10 m land use land cover mapping. *Scientific Data*, 9(1): 251 [DOI: 10.1038/s41597-022-01307-4]
- Cai R, Yang Y C, Jiang L H, Zhang T H, Xu G N, Zhang X Q, Zhou J H, Miao J G, Gong Z Q, Wang S, Li Z J, Ma L L, Zhu R C, Zhang H Y, Feng H, He Z Q, Wang Q, Zhang D H, Liu Q, Yan F, He X H, Wang N, Huang W N, Xu W K, Nie Y, Wang B C, Zhang Y L and Zhu Y. 2025. Research progress of high-altitude scientific balloons in Chinese Academy of Sciences. *National Remote Sensing Bulletin*, 29(6): 1502-1514 (蔡榕, 杨燕初, 姜鲁华, 张泰华, 徐国宁, 张向强, 周江华, 苗景刚, 宫泽奇, 王生, 李兆杰, 马灵玲, 祝榕辰, 张航悦, 冯慧, 何泽青, 王谦, 张冬辉, 刘强, 闫峰, 何小辉, 王宁, 黄宛宁, 徐文宽, 聂营, 王保成, 张衍奎, 朱殷. 2025. 中国科学院高空科学气球研究进展. *遥感学报*, 29(6): 1502-1514) [DOI: 10.11834/jrs.20255099]
- Chen F, Jia H C and Wang L. 2023. Spatial observation and assessment of Sustainable Development Goals. *Chinese Journal of Space Science*, 43(6): 973-985 (陈方, 贾慧聪, 王雷. 2023. 可持续发展目标空间观测与评估. *空间科学学报*, 43(6): 973-985) [DOI: 10.11728/cjss2023.06.2023-0108]
- Chen F, Li B, Wang L, Jia H C, Yu B, Lu L L, Zhang M M, Chen Y, Lin Z Y and Yan J N. 2022. Theory, methods and applications of disaster remote sensing information extraction. Beijing: Science Press: 1-256 (陈方, 李斌, 王雷, 贾慧聪, 于博, 鹿琳琳, 张美美, 陈玉, 林政阳, 闫继宁. 2022. 灾害遥感信息提取的理论、方法与

- 应用. 北京: 科学出版社: 1-256)
- Chen F, Zhang M M, Guo H D, Allen S, Kargel J S, Haritashya U K and Watson C S. 2021. Annual 30 m dataset for glacial lakes in High Mountain Asia from 2008 to 2017. *Earth System Science Data*, 13(2): 741-766 [DOI: 10.5194/essd-13-741-2021]
- Chen F, Zhang M M, Zhao H, Guan W G and Yang A Q. 2024. Pakistan's 2022 floods: Spatial distribution, causes and future trends from Sentinel-1 SAR observations. *Remote Sensing of Environment*, 304: 114055 [DOI: 10.1016/j.rse.2024.114055]
- Chen J, Zhang J, Zhang W W and Peng S. 2016. Continuous updating and refinement of land cover data product. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 20(5): 991-1001 (陈军, 张俊, 张委伟, 彭舒. 2016. 地表覆盖遥感产品更新完善的研究动向. *遥感学报*, 20(5): 991-1001) [DOI: 10.11834/jrs.20166250]
- Chen Q, Cai D Y, Xia J S, Zeng M, Yang H Y, Zhang R S, He Y, Zhang X X, Chen Y, Xu X H and Zhao Z F. 2025. Remote sensing identification of hydrothermal alteration minerals in the Duobuza porphyry copper mining area in Tibet using WorldView-3 and GF-5 data: The impact of spatial and spectral resolution. *Ore Geology Reviews*, 180: 106573 [DOI: 10.1016/j.oregeorev.2025.106573]
- Chen S P. 1999. The "Digital Earth" as a global strategy and its master point. *Journal of Remote Sensing*, 3(4): 247-253 (陈述彭. 1999. "数字地球"战略及其制高点. *遥感学报*, 3(4): 247-253) [DOI: 10.11834/jrs.19990401]
- Chen S P. 2005. From geological remote sensing to land resources investigation. *Journal of Remote Sensing*, 9(2): 113-116 (陈述彭. 2005. 从地质遥感迈向国土资源普查. *遥感学报*, 9(2): 113-116) [DOI: 10.11834/jrs.20050218]
- Chen S P, Yue T X and Li H G. 2000. Studies on Geo-Informatic Tupu and its application. *Geographical Research*, 19(4): 337-343 (陈述彭, 岳天祥, 励惠国. 2000. 地学信息图谱研究及其应用. *地理研究*, 19(4): 337-343) [DOI: 10.3321/j.issn:1000-0585.2000.04.001]
- Chen Y S, Wang Y C, Zhang F, Dong Y L, Song Z H and Liu G Y. 2023. Remote sensing for lithology mapping in vegetation-covered regions: methods, challenges and opportunities. *Minerals*, 13(9): 1153 [DOI: 10.3390/min13091153]
- Chen Z X, Ren J Q, Tang H J, Shi Y, Leng P, Liu J, Wang L M, Wu W B, Yao Y M and Hasituya. 2016. Progress and perspectives on agricultural remote sensing research and applications in China. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 20(5): 748-767 (陈仲新, 任建强, 唐华俊, 史云, 冷佩, 刘佳, 王利民, 吴文斌, 姚艳敏, 哈斯图亚. 2016. 农业遥感研究应用进展与展望. *遥感学报*, 20(5): 748-767) [DOI: 10.11834/jrs.20166214]
- Cheng C Q, Zhang J X, Zhang L, Huang G M and Hu D D. 2025. Re-imaging and RPC fitting for planetary TDI-CCD images with varying exposure times. *National Remote Sensing Bulletin*, 29(2): 402-414 (程春泉, 张继贤, 张力, 黄国满, 胡豆豆. 2025. 行星TDI-CCD时变行积分影像重构及其RPC拟合. *遥感学报*, 29(2): 402-414) [DOI: 10.11834/jrs.20254041]
- Cheng G, Wang G X and Han J W. 2025. Deep learning for change detection in remote sensing: A review and new outlooks. *National Remote Sensing Bulletin*, 29(6): 1587-1597 (程攀, 王光兴, 韩军伟. 2025. 深度学习遥感变化检测综述: 典型算法及发展趋势. *遥感学报*, 29(6): 1587-1597) [DOI: 10.11834/jrs.20254441]
- Cheng G L, Huang Y M, Li X T, Lyu S C, Xu Z Y, Zhao H B, Zhao Q and Xiang S M. 2024. Change detection methods for remote sensing in the last decade: A comprehensive review. *Remote Sensing*, 16(13): 2355 [DOI: 10.3390/rs16132355]
- Choate M J, Rengarajan R, Storey J C and Lubke M. 2023. Landsat 9 geometric commissioning calibration updates and system performance assessment. *Remote Sensing*, 15(14): 3524 [DOI: 10.3390/rs15143524]
- Cohen W B, Yang Z Q and Kennedy R. 2010. Detecting trends in forest disturbance and recovery using yearly Landsat time series: 2. TimeSync—Tools for calibration and validation. *Remote Sensing of Environment*, 114(12): 2911-2924 [DOI: 10.1016/j.rse.2010.07.010]
- Dang M, Liu G, Wang Q, Zhang Y Z, Wang D and Pan R. 2025. Review of oriented object detection in aerial remote sensing images. *National Remote Sensing Bulletin*, 29(8): 2483-2510 (党敏, 刘刚, 王泉, 张元泽, 王笛, 潘蓉. 2025. 航空遥感图像旋转目标检测技术研究综述. *遥感学报*, 29(8): 2483-2510) [DOI: 10.11834/jrs.20254504]
- Deng Y K, Zhao F J and Wang Y. 2012. Brief analysis on the development and application of spaceborne SAR. *Journal of Radars*, 1(1): 1-10 (邓云凯, 赵凤军, 王宇. 2012. 星载SAR技术的发展趋势及应用浅析. *雷达学报*, 1(1): 1-10) [DOI: 10.3724/SP.J.1300.2012.20015]
- Di K C, Liu B, Liu Z Q and Zou Y L. 2016. Review and prospect of lunar mapping using remote sensing data. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 20(5): 1230-1242 (邸凯昌, 刘斌, 刘召芹, 邹永廖. 2016. 月球遥感制图回顾与展望. *遥感学报*, 20(5): 1230-1242) [DOI: 10.11834/jrs.20166158]
- Ding C B, Liu J Y, Lei B and Qiu X L. 2017. Preliminary exploration of systematic geolocation accuracy of GF-3 SAR satellite system. *Journal of Radars*, 6(1): 11-16 (丁赤飏, 刘佳音, 雷斌, 仇晓兰. 2017. 高分三号SAR卫星系统级几何定位精度初探. *雷达学报*, 6(1): 11-16) [DOI: 10.12000/JR17024]
- Dorigo W A, Zurita-Milla R, de Wit A J W, Brazile J, Singh R and Schaepman M E. 2007. A review on reflective remote sensing and data assimilation techniques for enhanced agroecosystem modeling. *International Journal of Applied Earth Observation and Geo-information*, 9(2): 165-193 [DOI: 10.1016/j.jag.2006.05.003]
- Du P J, Xia J S, Xue Z H, Tan K, Su H J and Bao R. 2016. Review of hyperspectral remote sensing image classification. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 20(2): 236-256 (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. *遥感学报*, 20(2): 236-256) [DOI: 10.11834/jrs.20165022]
- Dubayah R, Blair J B, Goetz S, Fatoyinbo L, Hansen M, Healey S, Hofton M, Hurtt G, Kellner J, Luthcke S, Armston J, Tang H, Duncanson L, Hancock S, Jantz P, Marselis S, Patterson P L, Qi W L and Silva C. 2020. The Global Ecosystem Dynamics Investigation: High-resolution laser ranging of the Earth's forests and topography. *Science of Remote Sensing*, 1: 100002 [DOI: 10.1016/j.

- srs.2020.100002]
- Fraser C S, Dial G and Grodecki J. 2006. Sensor orientation via RPCs. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 60(3): 182-194 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2005.11.001]
- Fraser C S and Hanley H B. 2005. Bias-compensated RPCs for sensor orientation of high-resolution satellite imagery. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 71(8): 909-915 [DOI: 10.14358/PERS.71.8.909]
- Fu K, Lu W X, Liu X Y, Deng C B, Yu H F and Sun X. 2024. A comprehensive survey and assumption of remote sensing foundation modal. *National Remote Sensing Bulletin*, 28(7): 1667-1680 (付琨, 卢宛萱, 刘小煜, 邓楚博, 于泓峰, 孙显. 2024. 遥感基础模型发展综述与未来设想. *遥感学报*, 28(7): 1667-1680) [DOI: 10.11834/jrs.20233313]
- Gao H L, Gu X F, Zhou X, Yu T and Wang Y X. 2023. Analysis of the development trend of Chinese remote sensing validation sites and infrastructure construction. *National Remote Sensing Bulletin*, 27(5): 1088-1098. (高海亮, 顾行发, 周翔, 余涛, 王艺学. 2023. 中国遥感真实性检验基础设施建设发展态势分析. *遥感学报*, 27(5): 1088-1098) [DOI: 10.11834/jrs.20231694]
- Gao J X, Wan H W, Wang Y C, Hou P, Shi P R and Sun C X. 2023. New framework for large-scale ecological quality evaluation and application research using remote sensing data. *National Remote Sensing Bulletin*, 27(12): 2860-2872 (高吉喜, 万华伟, 王永财, 侯鹏, 施佩荣, 孙晨曦. 2023. 大尺度生态质量遥感评价方法构建及应用. *遥感学报*, 27(12): 2860-2872) [DOI: 10.11834/jrs.20221186]
- Gao L R, Yao D, Li Q T, Zhuang L N, Zhang B and Bioucas-Dias J M. 2017. A new low-rank representation based hyperspectral image denoising method for mineral mapping. *Remote Sensing*, 9(11): 1145 [DOI: 10.3390/rs9111145]
- Gao L R, Zhang B, Zhang X, Zhang W J and Tong Q X. 2008. A new operational method for estimating noise in hyperspectral images. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 5(1): 83-87 [DOI: 10.1109/LGRS.2007.909927]
- Giri R K, Prakash S, Yadav R, Kaushik N, Shukla M V, Thapliyal P K and Saikrishnan K C. 2025. A review of the global operational geostationary meteorological satellites. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 37: 101403 [DOI: 10.1016/j.rsase.2024.101403]
- Gitelson A, Garbuzov G, Szilagyi F, Mittenzwey K H, Karnieli A and Kaiser A. 1993. Quantitative remote sensing methods for real-time monitoring of inland waters quality. *International Journal of Remote Sensing*, 14(7): 1269-1295 [DOI: 10.1080/01431169308953956]
- Gong J Y, Wang M and Yang B. 2017. High-precision geometric processing theory and method of high-resolution optical remote sensing satellite imagery without GCP. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 46(10): 1255-1261 (龚健雅, 王密, 杨博. 2017. 高分辨率光学卫星遥感影像高精度无地面控制精确处理的理论与方法. *测绘学报*, 46(10): 1255-1261) [DOI: 10.11947/j.AGCS.2017.20170307]
- Gong J Y, Yue P, Xiang L G, Wu H R, Wang K X, Liu R X and Teng B X. 2025. The design and implementation of the open geospatial engine (OGE). *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 54(4): 587-602 (龚健雅, 乐鹏, 向隆刚, 吴浩儒, 王凯旋, 刘瑞祥, 滕宝鑫. 2025. 开放地球引擎 OGE 设计与研制. *测绘学报*, 54(4): 587-602) [DOI: 10.11947/j.AGCS.2025.20250051]
- Guo H D, Chen F, Sun Z C, Liu J and Liang D. 2021. Big Earth Data: A practice of sustainability science to achieve the Sustainable Development Goals. *Science Bulletin*, 66(11): 1050-1053 [DOI: 10.1016/j.scib.2021.01.012]
- Guo H D, Ding Y X and Liu G. 2022. Research status and prospect of Moon-based Earth observation: A review. *Journal of Deep Space Exploration*, 9(3): 250-260 (郭华东, 丁翼星, 刘广. 2022. 月基对地观测研究现状与展望. *深空探测学报*, 9(3): 250-260) [DOI: 10.15982/j.issn.2096-9287.2022.20210080]
- Guo H D, Liu L Y, Lei L P, Wu Y H, Li L W, Zhang B, Zuo Z L and Li Z. 2010. Dynamic analysis of the Wenchuan Earthquake disaster and reconstruction with 3-year remote sensing data. *International Journal of Digital Earth*, 3(4): 355-364 [DOI: 10.1080/17538947.2010.532632]
- Guo H D, Wang L Z, Chen F and Liang D. 2014. Scientific big data and Digital Earth. *Chinese Science Bulletin*, 59(35): 5066-5073 [DOI: 10.1007/s11434-014-0645-3]
- Guo H D and Yang C J. 1999. Developing national Earth observing system for "Digital Earth". *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 3(2): 7-10 (郭华东, 杨崇俊. 1999. 建设国家对地观测体系, 构筑“数字地球”. *遥感学报*, 3(2): 7-10) [DOI: 10.11834/jrs.19990202]
- Guo H D and Zhang L. 2019. 60 years of radar remote sensing: Four-stage development. *Journal of Remote Sensing*, 23(6): 1023-1035 (郭华东, 张露. 2019. 雷达遥感六十年: 四个阶段的发展. *遥感学报*, 23(6): 1023-1035) [DOI: 10.11834/jrs.20199398]
- Guo X, Lao J W, Dang B, Zhang Y Y, Yu L, Ru L X, Zhong L H, Huang Z Y, Wu K, Hu D X, He H M, Wang J, Chen J D, Yang M, Zhang Y J and Li Y S. 2024. SkySense: a multi-modal remote sensing foundation model towards universal interpretation for Earth observation imagery//2024 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Seattle, WA, USA: IEEE, 27662-27673 [DOI: 10.1109/CVPR52733.2024.02613]
- Hasituya and Chen Z X. 2025. The development and prospect of agricultural remote sensing in the digital transformation of agrifood systems. *National Remote Sensing Bulletin*, 29(6): 1901-1917 (哈斯图亚, 陈仲新. 2025. 农业粮食体系数字转型期农业遥感研究进展与展望. *遥感学报*, 29(6): 1901-1917) [DOI: 10.11834/jrs.20254565]
- He G J, Jiao W L and Long T F. 2021. *Remote Sensing Information Engineering*. Beijing: Science Press: 1-221 (何国金, 焦伟利, 龙腾飞. 2021. 遥感信息工程. 北京: 科学出版社: 1-221)
- He G J, Liu H C, Yang R Q, Zhang Z M, Xue Y, An S H, Yuan M R, Wang G Z, Long T F, Peng Y and Yin R Y. 2025. Remote sensing data intelligence: Progress and perspectives. *Journal of Geo-information Science*, 27(2): 273-284 (何国金, 刘慧婵, 杨瑞清, 张兆

- 明, 薛远, 安诗豪, 袁铭若, 王桂周, 龙腾飞, 彭燕, 尹然宇. 2025. 遥感数据智能: 进展与思考. 地球信息科学学报, 27(2): 273-284 [DOI: 10.12082/dqxxkx.2025.240630]
- He Z P, Xu R, Li C L, Yuan L Y, Liu C Y, Lv G, Jin J, Xie J N, Kong C F, Li F F, Chen X W, Wang R, Xu S, Pan W, Wu J C, Li C K, Wang T H, Jin H J, Chen H R, Qiu J and Wang J Y. 2021. Mars mineralogical spectrometer (MMS) on the Tianwen-1 Mission. Space Science Reviews, 217(2): 27 [DOI: 10.1007/s11214-021-00804-z]
- Hong D F, Gao L R, Yao J, Zhang B, Plaza A and Chanussot J. 2021. Graph convolutional networks for hyperspectral image classification. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 59(7): 5966-5978 [DOI: 10.1109/TGRS.2020.3015157]
- Hu X Q, Wang L, Zhang P, Xu N, Qi C L, Xu H L, He X W, He Y Q, Chen L, Sun L and Lu N M. 2023. Overview of historical data retrospective calibration for space-borne optical payloads. National Remote Sensing Bulletin, 27(10): 2229-2251 (胡秀清, 王玲, 张鹏, 徐娜, 漆成莉, 徐寒列, 何兴伟, 何玉青, 陈林, 孙凌, 卢乃锰. 2023. 星载光学载荷历史数据再定标综述. 遥感学报, 27(10): 2229-2251) [DOI: 10.11834/jrs.20233359]
- Huang J X, Song J J, Huang H, Zhuo W, Niu Q D, Wu S R, Ma H and Liang S L. 2024. Progress and perspectives in data assimilation algorithms for remote sensing and crop growth model. Science of Remote Sensing, 10: 100146 [DOI: 10.1016/j.srs.2024.100146]
- Jacquemoud S, Verhoef W, Baret F, Bacour C, Zarco-Tejada P J, Asner G P, François C and Ustin S L. 2009. PROSPECT+SAIL models: A review of use for vegetation characterization. Remote Sensing of Environment, 113(S1): S56-S66 [DOI: 10.1016/j.rse.2008.01.026]
- Jia P, Chen J and Tian D P. 2022. Overview of computational studies of aerodynamic optical transmission effects in aerial optical imaging (invited). Infrared and Laser Engineering, 51(12): 20220713 (贾平, 陈健, 田大鹏. 2022. 航空光学成像气动光学传输效应计算研究综述(特邀). 红外与激光工程, 51(12): 20220713) [DOI: 10.3788/IRLA20220713]
- Jiang B T, Wen G H, Zhou J L and Zheng D Z. 2024. Cross-domain cooperative technology of intelligent unmanned swarm systems: Current status and prospects. Strategic Study of CAE, 26(1): 117-126 (江碧涛, 温广辉, 周佳玲, 郑德智. 2024. 智能无人集群系统跨域协同技术研究现状与展望. 中国工程科学, 26(1): 117-126) [DOI: 10.15302/J-SSCAE-2024.01.015]
- Jiang X W, Lin M S and Zhang Y G. 2016. Progress and prospect of Chinese ocean satellites. Journal of Remote Sensing, 20(5): 1185-1198 (蒋兴伟, 林明森, 张有广. 2016. 中国海洋卫星及应用进展. 遥感学报, 20(5): 1185-1198) [DOI: 10.11834/jrs.20166153]
- Jin Y Q. 2016. Information chains in fine quantitative remote sensing based on scattering radiative transfer and imaging. Journal of Remote Sensing (in Chinese), 20(5): 768-774 (金亚秋. 2016. 从散射辐射传输成像到定量精细遥感的链条. 遥感学报, 20(5): 768-774) [DOI: 10.11834/jrs.20166119]
- Kang L H, Tian J and Jiang B T. 2024. Challenges and research on remote sensing satellite application technology in the Giant Constellation Era. National Remote Sensing Bulletin, 28(7): 1658-1666 (康利鸿, 田菁, 江碧涛. 2024. 巨星座时代遥感卫星应用技术挑战与思考. 遥感学报, 28(7): 1658-1666) [DOI: 10.11834/jrs.20233248]
- Ke T, Zhong Y F, Song M, Wang X Y and Zhang L P. 2024. Mineral detection based on hyperspectral remote sensing imagery on Mars: From detection methods to fine mapping. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 218: 761-780 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2024.09.020]
- Ke Z F, Huang S S, Li Y L, Qiao K, Teng F, Ruan H, Wang X T, Wei C Q and Ma X L. 2023. Research on the development status and key technologies of large LEO remote sensing constellations. Spacecraft Recovery and Remote Sensing, 44(1): 93-101 (柯知非, 黄石生, 李玉良, 乔凯, 滕飞, 阮航, 王晓婷, 魏楚奇, 马星亮. 2023. 低轨大型遥感星座发展现状及其关键技术. 航天返回与遥感, 44(1): 93-101) [DOI: 10.3969/j.issn.1009-8518.2023.01.010]
- Kim J, Lin S Y and Xiao H F. 2023. Remote sensing and data analyses on planetary topography. Remote Sensing, 15(12): 2954 [DOI: 10.3390/rs15122954]
- Letu H S, Yang K, Nakajima T Y, Ishimoto H, Nagao T M, Riedi J, Baran A J, Ma R, Wang T X, Shang H Z, Khatri P, Chen L F, Shi C X and Shi J C. 2020. High-resolution retrieval of cloud microphysical properties and surface solar radiation using Himawari-8/AHI next-generation geostationary satellite. Remote Sensing of Environment, 239: 111583 [DOI: 10.1016/j.rse.2019.111583]
- Li A N, Bian J H, Miao G F, Wen J G, He T, Mu X H, Zhao W, Zhang Z J, Nan X, Lei G B, Jiao Z H, Cheng Z Q, Zeng H D, Xie D H, You D Q, Li L, Tian F, Jin H A, Jiang B and Ma Y C. 2025. Research progress of the stereoscopic observation and high spatial resolution products development of key global change parameters for mountain ecosystem. National Remote Sensing Bulletin, 29(6): 2015-2034 (李爱农, 边金虎, 缪国芳, 闻建光, 何涛, 穆西哈, 赵伟, 张正健, 南希, 雷光斌, 焦中虎, 程志强, 曾宏达, 谢东辉, 游冬琴, 李丽, 田丰, 靳华安, 江波, 马一川. 2025. 山地生态系统全球变化关键参数立体观测与高分辨率产品研制研究进展. 遥感学报, 29(6): 2015-2034) [DOI: 10.11834/jrs.20254361]
- Li D R. 2005. On generalized and specialized spatial information grid. Journal of Remote Sensing, 9(5): 513-520 (李德仁. 2005. 论广义空间信息网格和狭义空间信息网格. 遥感学报, 9(5): 513-520) [DOI: 10.11834/jrs.20050575]
- Li D R and Li M. 2014. Research advance and application prospect of unmanned aerial vehicle remote sensing system. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 39(5): 505-513, 540 (李德仁, 李明. 2014. 无人机遥感系统的研究进展与应用前景. 武汉大学学报(信息科学版), 39(5): 505-513, 540) [DOI: 10.13203/j.whugis.20140045]
- Li D R, Shen X and Wang L. 2018. Connected Geomatics in the big data era. International Journal of Digital Earth, 11(2): 139-153 [DOI: 10.1080/17538947.2017.1311953]
- Li D R and Wang M. 2020. A review of high resolution optical satellite surveying and mapping technology. Spacecraft Recovery and Remote Sensing, 41(2): 1-11 (李德仁, 王密. 2020. 高分辨率光学卫

- 星测绘技术综述. 航天返回与遥感, 41(2): 1-11 [DOI: 10.3969/j.issn.1009-8518.2020.02.001]
- Li H B, Shu R and Xue Y Q. 2002. Pushbroom Hyperspectral Imager and its potential application to oceanographic remote sensing. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 21(6): 429-433 (李红波, 舒嵘, 薛永祺. 2002. PHI超光谱成像系统及其海洋遥感应用前景分析. 红外与毫米波学报, 21(6): 429-433)
- Li J X, Hong D F, Gao L R, Yao J, Zheng K, Zhang B and Chanussot J. 2022. Deep learning in multimodal remote sensing data fusion: A comprehensive review. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 112: 102926 [DOI: 10.1016/j.jag.2022.102926]
- Li S T, Li C Y and Kang X D. 2021. Development status and future prospects of multi-source remote sensing image fusion. *National Remote Sensing Bulletin*, 25(1): 148-166 (李树涛, 李聪好, 康旭东. 2021. 多源遥感图像融合发展现状与未来展望. 遥感学报, 25(1): 148-166) [DOI: 10.11834/jrs.20210259]
- Li X. 2013. Characterization, controlling, and reduction of uncertainties in the modeling and observation of land-surface systems. *Science China Earth Sciences*, 57(1): 80-87 (李新. 2013. 陆地表层系统模拟和观测的不确定性及其控制. 中国科学: 地球科学, 43(11): 1735-1742) [DOI: 10.1007/s11430-013-4728-9]
- Li X, Liu F and Fang M. 2020. Harmonizing models and observations: data assimilation in earth system science. *Science China Earth Sciences*, 63(8): 1059-1068 (李新, 刘丰, 方苗. 2020. 模型与观测的和弦: 地球系统科学中的数据同化. 中国科学: 地球科学, 50(9): 1185-1194) [DOI: 10.1360/SSTe-2019-0280]
- Li X, Liu S M, Liu Q H, Xiao Q, Che T, Ma M G, Jin R, Ran Y H, Wen J G, Xu Z W and Li Z Y. 2023. Heihe remote sensing experiments: Retrospect and prospect. *National Remote Sensing Bulletin*, 27(2): 224-248 (李新, 刘绍民, 柳钦火, 肖青, 车涛, 马明国, 晋锐, 冉有华, 闻建光, 徐自为, 李增元. 2023. 黑河遥感试验: 回顾与展望. 遥感学报, 27(2): 224-248) [DOI: 10.11834/jrs.20235013]
- Li X W. 2005. Retrospect, prospect and innovation in quantitative remote sensing. *Journal of Henan University (Natural Science)*, 35(4): 49-56 (李小文. 2005. 定量遥感的发展与创新. 河南大学学报(自然科学版), 35(4): 49-56) [DOI: 10.3969/j.issn.1003-4978.2005.04.012]
- Li X W and Strahler A H. 1986. Geometric-optical bidirectional reflectance modeling of a conifer forest canopy. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, GE-24(6): 906-919 [DOI: 10.1109/TGRS.1986.289706]
- Li X W and Strahler A H. 1992. Geometric-optical bidirectional reflectance modeling of the discrete crown vegetation canopy: Effect of crown shape and mutual shadowing. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30(2): 276-292 [DOI: 10.1109/36.134078]
- Li X W, Wang J D, Hu B X and Strahler A H. 1998. On utilization of a priori knowledge in inversion of remote sensing models. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 41(6): 580-585 (李小文, 王锦地, 胡宝新, Strahler A H. 1998. 先验知识在遥感反演中的作用. 中国科学(D辑: 地球科学), 28(1): 67-72) [DOI: 10.1007/BF02878739]
- Li X W and Wang Y T. 2013. Prospects on future developments of quantitative remote sensing. *Acta Geographica Sinica*, 68(9): 1163-1169 (李小文, 王伟婷. 2013. 定量遥感尺度效应刍议. 地理学报, 68(9): 1163-1169) [DOI: 10.11821/dlxb201309001]
- Li X W, Zhao H R, Zhang H and Wang J D. 2002. Global change study and quantitative remote sensing for land surface parameters. *Earth Science Frontiers*, 9(2): 365-370 (李小文, 赵红蕊, 张颢, 王锦地. 2002. 全球变化与地表参数的定量遥感. 地学前缘, 9(2): 365-370) [DOI: 10.3321/j.issn:1005-2321.2002.02.015]
- Li Y F, Li W, Tian J and Shen Q. 2025. Object tracking in satellite videos: a survey. *Chinese Space Science and Technology*, 45(5): 60-74 (李洋帆, 李伟, 田静, 沈清. 2025. 遥感卫星视频目标跟踪方法综述. 中国空间科学技术(中英文), 45(5): 60-74) [DOI: 10.16708/j.cnki.1000-758X.2025.0076]
- Li Z, Gao L R, Zheng K and Ni L. 2024. Research progress of high-resolution remote sensing image scene classification. *National Remote Sensing Bulletin*, 28(11): 2739-2760 (李智, 高连如, 郑珂, 倪丽. 2024. 高分辨率遥感图像场景分类研究进展. 遥感学报, 28(11): 2739-2760) [DOI: 10.11834/jrs.20243519]
- Li Z Y, Liu Q H, Yan G J, Wang J D, Niu Z, Jiang L M and Chen E X. 2019. Complex land surface quantitative remote sensing modeling and inversion. Beijing: Science Press: 1-608 (李增元, 柳钦火, 阎广建, 王锦地, 牛铮, 蒋玲梅, 陈尔学. 2019. 复杂地表定量遥感模型与反演. 北京: 科学出版社: 1-608)
- Li Z W, Wen J G, Xiao Q, You D Q, Tang Y, Wu X D, Lin X W, Piao S, Zhao N, and Li Q Q. 2025. Error traceability in remote sensing product production and validation: Methods and applications. *National Remote Sensing Bulletin*, 29(12): 3666-3678. (李子薇, 闻建光, 肖青, 游冬琴, 唐勇, 吴小丹, 林兴稳, 朴森, 赵娜, 李曲曲. 2025. 误差溯源在遥感产品生产与检验中的方法与应用. 遥感学报, 29(12): 3666-3678) [DOI: 10.11834/jrs.20254475]
- Liang S L. 2004. Quantitative Remote Sensing of Land Surfaces. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons. Inc.
- Liang S L, Chen X N, Chen Y, Cheng J, Jia K, Jiang B, Li B, Liu Q, Ma H, Song L L, Tang B H, Xu J L, Yao Y J, Yuan W P, Zhang X T, Zhang Y Z, Zhao X and Zhou J. 2023. Updates on Global Land Surface Satellite (GLASS) products suite. *National Remote Sensing Bulletin*, 27(4): 831-856 (梁顺林, 陈晓娜, 陈琰, 程洁, 贾坤, 江波, 李冰, 刘强, 马晗, 宋柳霖, 唐伯惠, 徐蒋磊, 姚云军, 袁文平, 张晓通, 张玉珍, 赵祥, 周纪. 2023. 陆表卫星遥感GLASS产品集的研发新进展. 遥感学报, 27(4): 831-856) [DOI: 10.11834/jrs.20232462]
- Ling Z C, Li B, Wei G F, Guo D J, Lü Y B, Liu C Q, Zhu K, Chen J, Zhao Q, Li J, Hu G P, Wang J and Liu J Z. 2025. Research on key technologies and applications of feature extraction and knowledge mining in planetary exploration. *Frontiers of Data and Computing*, 7(4): 3-19 (凌宗成, 李勃, 魏广飞, 郭弟均, 吕英波, 刘长卿, 朱凯, 陈剑, 赵强, 李静, 胡国平, 王娇, 刘建忠. 2025. 行星探测特征信息提取与知识挖掘关键技术及应用研究. 数据与计算发展前沿, 7(4): 3-19) [DOI: 10.11871/jfdc.issn.2096-742X.2025.

- 04.001]
- Liu F, Li X. 2017. Formulation of scale transformation in a stochastic data assimilation framework. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 24(2): 279-291 [DOI: 10.5194/npg-24-279-2017]
- Liu G K, Wen J G, You D Q, Han Y, Tang Y, Wu S B, Wei K X, Xiao Q and Liu Q H. 2026. A hybrid geometric optical-radiative transfer model for characterizing thermal infrared anisotropy over sloping terrain. *Remote Sensing of Environment*, 341: 115441 [DOI: 10.1016/j.rse.2026.115441]
- Liu L R, Tang X M, Gan Y H, You S C, Liu K and Luo Z Y. 2024. Research on satellite remote sensing-based intelligent monitoring technologies for new construction land. *National Remote Sensing Bulletin*, 28(11): 2828-2837 (刘力荣, 唐新明, 甘宇航, 尤淑撑, 刘克, 罗征宇. 2024. 新增建设用地卫星遥感智能监测技术研究. *遥感学报*, 28(11): 2828-2837) [DOI: 10.11834/jrs.20244063]
- Liu Q H, Wen J G, Zhou X, Zhao J, Li Z Y, Li X, Ma M G, Wang W Z, Liao X H, Liu S M, Fan W J, Xiao Q, Zhong B, Li J, Xin X Z, Li L, Jia L, Gao Z H, Jin J D, Liang S, Xing J, Liao C J and Wu Y R. 2023. Technique system of remote sensing product generation and validation of GF common products. *National Remote Sensing Bulletin*, 27(3): 544-562 (柳钦火, 闻建光, 周翔, 赵坚, 李增元, 李新, 马明国, 王维真, 廖小罕, 刘绍民, 范闻捷, 肖青, 仲波, 李静, 辛晓洲, 李丽, 贾立, 高志海, 金家栋, 梁师, 邢进, 廖楚江, 吴一戎. 2023. 高分遥感共性产品生成和真实性检验技术体系. *遥感学报*, 27(3): 544-562) [DOI: 10.11834/jrs.20232531]
- Liu Q H, Yan G J, Jiao Z T, Xiao Q, Wen J G, Liang S L and Wang J D. 2019. Geometric-optical remote sensing modeling to quantitative remote sensing theory and methodology development: In memory of academician Li Xiaowen. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 23(1): 1-10 (柳钦火, 阎广建, 焦子锦, 肖青, 闻建光, 梁顺林, 王锦地. 2019. 发展几何光学遥感建模理论, 推动定量遥感科学前行——深切缅怀李小龙院士. *遥感学报*, 23(1): 1-10) [DOI: 10.11834/jrs.20198077]
- Liu Y, Zhang W J, Zhang B and Gan F P. 2017. Radiance image simulation at the bottom of atmosphere in mid-infrared absorption bands. *Remote Sensing for Natural Resources*, 29(3): 98-103 (刘瑶, 张文娟, 张兵, 甘甫平. 2017. 中红外大气强吸收通道的地表辐射亮度图像模拟. *国土资源遥感*, 29(3): 98-103) [DOI: 10.6046/gtzyyg.2017.03.14]
- Liu Y N, Xue Y Q, Wang J Y and Shen M M. 2002. Operational modular imaging spectrometer. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 21(1): 9-13 (刘银年, 薛永祺, 王建宇, 沈鸣明. 2002. 实用型模块化成像光谱仪. *红外与毫米波学报*, 21(1): 9-13) [DOI: 10.3321/j.issn:1001-9014.2002.01.003]
- Long T F, Jiao W L, He G J, Wang G Z and Zhang Z M. 2023. Digital orthophoto map products and automated generation algorithms of Chinese optical satellites. *National Remote Sensing Bulletin*, 27(3): 635-650 (龙腾飞, 焦伟利, 何国金, 王桂周, 张兆明. 2023. 国产光学卫星正射影像产品及自动生成算法. *遥感学报*, 27(3): 635-650) [DOI: 10.11834/jrs.20232041]
- Lu N M, Ding L, Zheng X B, Ye X, Li C R, Lü D R, Zhang P, Hu X Q, Zhou C H, You Z, Fang J C, Gong J Y, Jiang X W, Li J J, Ma L L and Xu N. 2020. Introduction of the radiometric benchmark satellite being developed in China for remote sensing. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 24(6): 672-680 (卢乃锰, 丁雷, 郑小兵, 叶新, 李传荣, 吕达仁, 张鹏, 胡秀清, 周成虎, 尤政, 房建成, 龚建雅, 蒋兴伟, 李建军, 马灵玲, 徐娜. 2020. 中国空间辐射测量基准技术. *遥感学报*, 24(6): 672-680) [DOI: 10.11834/jrs.20200011]
- Lü Y Z, Jia L, Menenti M, Zheng C L, Jiang M, Lu J, Zeng Y L, Chen Q T and Bennour A. 2024. A novel remote sensing method to estimate pixel-wise lake water depth using dynamic water-land boundary and lakebed topography. *International Journal of Digital Earth*, 17(1): 2440443 [DOI: 10.1080/17538947.2024.2440443]
- Ma L L, Wang N, Gao C X, Zhao Y G, Yang B Y, Wang X H, Han Q J, Xu N, Song P L and Liu Y K. 2023. On-orbit absolute radiometric calibration for optical remote sensing satellites: Progress and trends. *National Remote Sensing Bulletin*, 27(5): 1061-1087 (马灵玲, 王宁, 高彩霞, 赵永光, 杨本永, 王新鸿, 韩启金, 徐娜, 宋培兰, 刘耀开. 2023. 光学遥感卫星在轨绝对辐射定标: 进展与趋势. *遥感学报*, 27(5): 1061-1087) [DOI: 10.11834/jrs.20222117]
- Meng Q Y. 2020. Remote sensing of urban green space. Beijing: Science Press: 1-195 (孟庆岩. 2020. 城市绿度空间遥感. 北京: 科学出版社: 1-195)
- Meng Q Y, Zhang L L, Sun Z H, Meng F, Wang L and Sun Y X. 2018. Characterizing spatial and temporal trends of surface urban heat island effect in an urban main built-up area: A 12-year case study in Beijing, China. *Remote Sensing of Environment*, 204: 826-837 [DOI: 10.1016/j.rse.2017.09.019]
- Mishra S and Mishra D R. 2012. Normalized difference chlorophyll index: A novel model for remote estimation of chlorophyll-*a* concentration in turbid productive waters. *Remote Sensing of Environment*, 117: 394-406 [DOI: 10.1016/j.rse.2011.10.016]
- Moreira A, Prats-Iraola P, Younis M, Krieger G, Hajnsek I and Papathanassiou K P. 2013. A tutorial on synthetic aperture radar. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 1(1): 6-43 [DOI: 10.1109/MGRS.2013.2248301]
- Palmer S C J, Kutser T and Hunter P D. 2015. Remote sensing of inland waters: Challenges, progress and future directions. *Remote Sensing of Environment*, 157: 1-8 [DOI: 10.1016/j.rse.2014.09.021]
- Pan D L and Li S J. 1998. A study on the signal characteristic scale of satellite ocean color remote sensing. *Journal of Remote Sensing*, 2(1): 26-31 (潘德炉, 李淑菁. 1998. 卫星海洋水色遥感信息特征量的研究. *遥感学报*, 2(1): 26-31) [DOI: 10.11834/jrs.19980105]
- Pan J, Zhu J B, Yang H, Zhang W J, Zhao H T and Wu Y R. 2025. Airborne remote sensing system: The innovative verification platform of Earth observation technology. *National Remote Sensing Bulletin*, 29(6): 1451-1461 (潘洁, 朱金彪, 杨宏, 张文娟, 赵海涛, 吴一戎. 2025. 航空遥感系统——对地观测技术创新验证平台. *遥感学报*, 29(6): 1451-1461) [DOI: 10.11834/jrs.20254413]
- Pekel J F, Cottam A, Gorelick N and Belward A S. 2016. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature*, 540(7633): 418-422 [DOI: 10.1038/nature20584]

- Peng Y, He G J, Zhang Z M, Long T F, Wang M M and Ling S G. 2016. Study on atmospheric correction approach of Landsat-8 imageries based on 6S model and look-up table. *Journal of Applied Remote Sensing*, 10(4): 045006 [DOI: 10.1117/1.JRS.10.045006]
- Pettorelli N, Lurance W F, O'Brien T G, Wegmann M, Nagendra H and Turner W. 2014. Satellite remote sensing for applied ecologists: Opportunities and challenges. *Journal of Applied Ecology*, 51(4): 839-848 [DOI: 10.1111/1365-2664.12261]
- Qi B G, Shi H, Zhuang Y, Chen H and Chen L. 2018. On-board, real-time preprocessing system for optical remote-sensing imagery. *Sensors*, 18(5): 1328 [DOI: 10.3390/s18051328]
- Qi J B, Xie D H, Yin T G, Yan G J, Gastellu-Etcheberry J P, Li L Y, Zhang W M, Mu X H and Norford L K. 2019. LESS: Large-Scale remote sensing data and image simulation framework over heterogeneous 3D scenes. *Remote Sensing of Environment*, 221, 695-706 [DOI:10.1016/j.rse.2018.11.036]
- Qiu X L, Luo Y T, Song S J, Peng L X, Cheng Y, Yan Q C, Shanguan S T, Jiao Z K, Zhang Z and Ding C B. 2024. Microwave vision 3D SAR experiment system and its fully polarimetric data processing method. *Journal of Radars*, 13(5): 941-954 (仇晓兰, 罗一通, 宋舒洁, 彭凌霄, 程遥, 颜千程, 上官松涛, 焦泽坤, 张柘, 丁赤飏. 2024. 微波视觉三维SAR实验系统及其全极化数据处理方法. *雷达学报*, 13(5): 941-954)
- Rogalski A. 2023. Infrared and Terahertz Detectors. Ding L, Ge J, trans. 3rd ed. Beijing: Science Press: 1-896 (罗加尔斯基. 2023. 红外与太赫兹探测器. 丁雷, 葛军, 译. 第3版. 北京: 科学出版社: 1-896)
- Roncoroni G, Forte E, Santin I, Černok A, Rajšić A, Frigeri A and Pipan M. 2024. High frequency Lunar Penetrating Radar quality control, editing and processing of Chang'E-4 lunar mission. *Scientific Data*, 11(1): 118 [DOI: 10.1038/s41597-024-02963-4]
- Shen Y Y, Meng R, Li J S, Zhao P, Zhao F, Sun R, Zhang H Y, Ni X, Lu L J, Liu Y and Liu J. 2026. A hybrid method for major food crops leaf chlorophyll content inversion driven by remote sensing mechanisms and deep learning. *National Remote Sensing Bulletin*, 30(5): 1392-1412 (沈艳艳, 孟冉, 李佳晟, 赵平, 赵峰, 孙瑞, 张红艳, 倪响, 路利杰, 刘勇, 刘劼. 2026. 遥感机理与深度学习双驱动的主粮作物叶片叶绿素含量混合反演方法. *遥感学报*, 30(5): 1392-1412) [DOI: 10.11834/jrs.20265150]
- Shi W X, Meng Q Y, Zhang L L, Zhao M F, Su C, Guo G N, Li T and Atkinson P M. 2025. Instance-level multitask learning for 3-D building extraction from monocular off-nadir satellite sensor imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 63: 5635924 [DOI: 10.1109/TGRS.2025.3591180]
- Shu N. 2000. Principles of Microwave Remote Sensing. Wuhan: Wuhan University Press: 1-220 (舒宁. 2000. 微波遥感原理. 武汉: 武汉大学出版社: 1-220)
- Soldovieri F, Gennarelli G, Su Y, Ding C Y and Du W. 2025. Microwave tomography for Lunar Penetrating Radar data processing in Chang'e 4 mission. *Scientific Reports*, 15(1): 5219 [DOI: 10.1038/s41598-025-89813-4]
- Storey J, Choate M and Lee K. 2014. Landsat 8 Operational Land Imager on-orbit geometric calibration and performance. *Remote Sensing*, 6(11): 11127-11152 [DOI: 10.3390/rs6111127]
- Su C, Hu X L, Meng Q Y, Zhang L L, Shi W X and Zhao M F. 2024. A multimodal fusion framework for urban scene understanding and functional identification using geospatial data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 127: 103696 [DOI: 10.1016/j.jag.2024.103696]
- Su Y C, Xu R Q, Gao L R, Han Z and Sun X. 2024. Development of deep learning-based hyperspectral remote sensing image unmixing. *National Remote Sensing Bulletin*, 28(1): 1-19 (苏远超, 许若晴, 高连如, 韩竹, 孙旭. 2024. 基于深度学习的高光谱遥感图像混合像元分解研究综述. *遥感学报*, 28(1): 1-19) [DOI: 10.11834/jrs.20243165]
- Sun J B. 2009. Principles and applications of remote sensing. 2nd ed. Wuhan: Wuhan University Press (孙家柄. 2009. 遥感原理与应用. 第2版. 武汉: 武汉大学出版社)
- Sun X, Wang P J, Lu W X, Zhu Z C, Lu X N, He Q B, Li J X, Rong X E, Yang Z J, Chang H, He Q L, Yang G, Wang R P, Lu J W and Fu K. 2023. RingMo: a remote sensing foundation model with masked image modeling. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 61: 5612822 [DOI: 10.1109/TGRS. 2022. 3194732]
- Tang G A, Zhang Y S, Liu Y M, Xie Y L, Yang X and Liu A L. 2004. Remote Sensing Digital Image Processing. Beijing: Science Press: 1-274 (汤国安, 张友顺, 刘咏梅, 谢元礼, 杨昕, 刘爱利. 2004. 遥感数字图像处理. 北京: 科学出版社: 1-274)
- Tao L J, Zhang H K, Jing H Z, Liu Y, Yan D W, Wei G T and Xue X Z. 2025. Advancements in vision-language models for remote sensing: Datasets, capabilities, and enhancement techniques. *Remote Sensing*, 17(1): 162 [DOI: 10.3390/rs17010162]
- Tong Q X, Xue Y Q and Zhang L F. 2014. Progress in hyperspectral remote sensing science and technology in China over the past three decades. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 7(1): 70-91 [DOI: 10.1109/JSTARS. 2013.2267204]
- Tong Q X, Zhang B and Zhang L F. 2016. Current progress of hyperspectral remote sensing in China. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 20(5): 689-707 (童庆禧, 张兵, 张立福. 2016. 中国高光谱遥感的前沿进展. *遥感学报*, 20(5): 689-707) [DOI: 10.11834/jrs.20166264]
- Tong Q X, Zhang B and Zheng L F. 2006. Hyperspectral remote sensing: principles, techniques, and applications. Beijing: Higher Education Press: 1-415 (童庆禧, 张兵, 郑兰芬. 2006. 高光谱遥感——原理、技术与应用. 北京: 高等教育出版社: 1-415)
- Tong X H, Yuan F, Zheng H, Yan X F, Wang C, Xie H, Xu X, Xu Y S, Chen P and Wei C. 2024. Progress and key challenges of lunar resource exploration and in-situ utilization. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 52(8): 1151-1162 (童小华, 袁烽, 郑虎, 晏雄锋, 王超, 谢欢, 许雄, 徐聿升, 陈鹏, 魏超. 2024. 月球资源勘测与原位利用进展及关键挑战. *同济大学学报(自然科学版)*, 52(8): 1151-1162) [DOI: 10.11908/j.issn.0253-374x.24261]
- Toutin T. 2004. Review article: geometric processing of remote sens-

- ing images: models, algorithms and methods. *International Journal of Remote Sensing*, 25(10): 1893-1924 [DOI: 10.1080/0143116031000101611]
- Tuia D, Schindler K, Demir B, Zhu X X, Kochupillai M, Džeroski S, van Rijn J N, Hoos H H, Del Frate F, Datcu M, Markl V, Le Saux B, Schneider R and Camps-Valls G. 2025. Artificial intelligence to advance Earth observation: A review of models, recent trends, and pathways forward. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 13(4): 119-141 [DOI: 10.1109/MGRS.2024.3425961]
- Vermote E, Justice C, Claverie M and Franch B. 2016. Preliminary analysis of the performance of the Landsat 8/OLI land surface reflectance product. *Remote Sensing of Environment*, 185: 46-56 [DOI: 10.1016/j.rse.2016.04.008]
- Vermote E F, El Saleous N Z and Justice C O. 2002. Atmospheric correction of MODIS data in the visible to middle infrared: first results. *Remote Sensing of Environment*, 83(1/2): 97-111 [DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00089-5]
- Wang B B, Yu W Y, Long X X, Lin J, Wang H B, Song C Y, Chen Q, Ge S L and Li S. 2021. Development of high-resolution satellite ground processing system. *National Remote Sensing Bulletin*, 25(9): 1946-1963 (王冰冰, 喻文勇, 龙小祥, 林军, 王海波, 宋超宇, 陈琦, 葛曙乐, 李帅. 2021. 高分辨率卫星地面处理系统研制. 遥感学报, 25(9): 1946-1963) [DOI: 10.11834/jrs.20210369]
- Wang J Y and Li C L. 2021. Development and prospect of hyperspectral imager and its application. *Chinese Journal of Space Science*, 41(1): 22-33 (王建宇, 李春来. 2021. 高光谱遥感成像技术的发展与展望. 空间科学学报, 41(1): 22-33) [DOI: 10.11728/cjss2021.01.022]
- Wang J Y, Yan J, Wu J Q, Deng J W, Dong W Y, Zhang Q, Gong Y H, Jiang X H, Zhang J C and Hu S H. 2024. AI technology empowers in-orbit processing of remote sensing satellite data. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 40(6): 571-590 (王家耀, 颜军, 吴佳奇, 邓剑文, 董文岳, 张强, 龚永红, 蒋晓华, 张建辰, 胡胜华. 2024. AI技术赋能遥感卫星数据在轨处理. 测绘科学技术学报, 40(6): 551-570) [DOI: 10.3969/j.issn.1673-6338.2024.06.001]
- Wang M, Wu Q Y, Xiao J and Yang C. 2023. Key technologies on "Cloud-Edge-End" collaborative intelligent service of low-orbit giant constellation. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 48(8): 1256-1263 (王密, 仵倩玉, 肖晶, 杨晨. 2023. 低轨巨型星座遥感信息“云—边—端”智能服务关键技术. 武汉大学学报(信息科学版), 48(8): 1256-1263) [DOI: 10.13203/j.whugis.20220767]
- Wang M, Yang B, Hu F and Zang X. 2014. On-orbit geometric calibration model and its applications for high-resolution optical satellite imagery. *Remote Sensing*, 6(5): 4391-4408 [DOI: 10.3390/rs6054391]
- Wang Q, Wu C Q and Li Q. 2010. Environment satellite 1 and its application in environmental monitoring. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 14(1): 104-121 (王桥, 吴传庆, 厉青. 2010. 环境一号卫星及其在环境监测中的应用. 遥感学报, 14(1): 104-121) [DOI: 10.11834/jrs.20100109]
- Weiss M, Jacob F and Duveiller G. 2020. Remote sensing for agricultural applications: A meta-review. *Remote Sensing of Environment*, 236: 111402 [DOI: 10.1016/j.rse.2019.111402]
- Wen J G, Dou B C, You D Q, Tang Y, Xiao Q, Liu Q and Liu Q H. 2017. Forward a small-timescale BRDF/albedo by multisensor combined BRDF inversion model. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 55(2): 683-697 [DOI: 10.1109/TGRS.2016.2613899]
- Wen J G, Liu Q H, Li Z Y, Li X, Liu S M, Xiao Q, Gao Z H, Ma M G, Che T, Liu L Y, Fang H L, Yan G J, Ge Y, Chen E X, Zhang Y, Ma L L, Wu X D and Chen X. 2023. A review of the development of remote sensing field experiments and product validation in China. *National Remote Sensing Bulletin*, 27(3): 573-583 (闻建光, 柳钦火, 李增元, 李新, 刘绍民, 肖青, 高志海, 马明国, 车涛, 刘良云, 方红亮, 阎广建, 葛咏, 陈尔学, 张勇, 马灵玲, 吴小丹, 陈曦. 2023. 中国遥感实验与真实性检验的发展思考. 遥感学报, 27(3): 573-583) [DOI: 10.11834/jrs.20232673]
- Wen J G, Liu Q H, You D Q, Bian Z J, Wei K X, Zhao C C, Xiao Q, Du Y M, Yan G J, Fan W J and Wu Y R. 2025a. Modeling of optical remote sensing mechanism: Review and prospect. *National Remote Sensing Bulletin*, 29(6): 1331-1346 (闻建光, 柳钦火, 游冬琴, 卞尊健, 魏珂昕, 赵聪聪, 肖青, 杜永明, 阎广建, 范闻捷, 吴一戎. 2025a. 光学遥感机理建模: 回顾与展望. 遥感学报, 29(6): 1331-1346) [DOI: 10.11834/jrs.20255007]
- Wen J G, Wu X D, Xiao Q, Liu Q H, Ma M G, Zheng X M, Qu Y H, Jin R, You D Q, Tang Y, Lin X W, Yu W P, Gong B C, Yang J and Han Y. 2023. Full-band, multi-angle, multi-scale, and temporal dynamic field spectral measurements in China. *Scientific Data*, 10: 353 [DOI: 10.1038/s41597-023-02265-1]
- Wen J G, Wu X D, Xiao Q, You D Q, Lin X W and Liu Q H. 2025b. Theory, Method and Practice of Remote Sensing Validation. Beijing: Science Press: 1-221 (闻建光, 吴小丹, 肖青, 游冬琴, 林兴稳, 柳钦火. 2025b. 遥感真实性检验理论、方法与实践. 北京: 科学出版社: 1-221)
- Wu B F, Tian F Y, Zeng H W, Zhang M, Yan N N, Qin X L and Ma Z H. 2025. Recent advancements of cloud-based global crop monitoring system (CropWatch). *National Remote Sensing Bulletin*, 29(6): 1918-1937 (吴炳方, 田富有, 曾红伟, 张森, 闫娜娜, 覃星力, 马宗瀚. 2025. 全球农情遥感监测云服务平台的新进展. 遥感学报, 29(6): 1918-1937) [DOI: 10.11834/jrs.20254500]
- Wu J Y. 2024. Development ideas and measures for remote sensing monitoring of ecological environment in the new era. *Environment and Sustainable Development*, 49(3): 21-26 (吴季友. 2024. 新时期生态环境遥感监测发展思路与举措. 环境与可持续发展, 49(3): 21-26) [DOI: 10.19758/j.cnki.issn1673-288x.202403021]
- Wu L X and Gong J Y. 2025. The formation process, construction status and challenging issues of remote sensing discipline in China. *National Remote Sensing Bulletin*, 29(6): 1314-1330 (吴立新, 龚健雅. 2025. 中国遥感学科的形成过程、现状与挑战. 遥感学报, 29(6): 1314-1330) [DOI: 10.11834/jrs.20254375]
- Wu S B, Wen J G, Gastellu-Etchegorry J P, Liu Q H, You D Q, Xiao Q, Hao D L, Lin X W and Yin T G. 2019a. The definition of remote-

- ly sensed reflectance quantities suitable for rugged terrain. *Remote Sensing of Environment*, 225: 403-415 [DOI: 10.1016/j.rse.2019.01.005]
- Wu X D, Xiao Q, Wen J G and You D Q. 2019. Advances and challenges in the validation of remote sensing albedo products. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 23(1): 11-23 (吴小丹, 肖青, 闻建光, 游冬琴. 2019. 异质地表反照率遥感产品真实性检验研究现状及挑战. *遥感学报*, 23(1): 11-23) [DOI: 10.11834/jrs.201908057]
- Wu X D, Wen J G, Xiao Q, Li X, Liu Q, Tang Y, Dou B C, Peng J J, You D Q and Li X W. 2015. Advances in validation methods for remote sensing products of land surface parameters. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 19(1): 75-92 (吴小丹, 闻建光, 肖青, 李新, 刘强, 唐勇, 窦宝成, 彭菁菁, 游冬琴, 李小文. 2015. 关键陆表参数遥感产品真实性检验方法研究进展. *遥感学报*, 19(1): 75-92) [DOI: 10.11834/jrs.20154009]
- Wu X D, Xiao Q, Wen J G, You D Q and Hueni A. 2019b. Advances in quantitative remote sensing product validation: Overview and current status. *Earth-Science Reviews*, 196: 102875 [DOI: 10.1016/j.earscirev.2019.102875]
- Wu Y R. 2013. Concept of multidimensional space joint-observation SAR. *Journal of Radars*, 2(2): 135-142 (吴一戎. 2013. 多维度合成孔径雷达成像概念. *雷达学报*, 2(2): 135-142) [DOI: 10.3724/SP.J.1300.2013.13047]
- Wu Y R, Hong W and Wang Y P. 2007. The current status and implications of polarimetric SAR interferometry. *Journal of Electronics and Information Technology*, 29(5): 1258-1262 (吴一戎, 洪文, 王彦平. 2007. 极化干涉SAR的研究现状与启示. *电子与信息学报*, 29(5): 1258-1262) [DOI: 10.3724/SP.J.1146.2006.00886]
- Wulder M A, Roy D P, Radeloff V C, Loveland T R, Anderson M C, Johnson D M, Healey S, Zhu Z, Scambos T A, Pahlevan N, Hansen M, Gorelick N, Crawford C J, Masek J G, Hermosilla T, White J C, Belward A S, Schaaf C, Woodcock C E, Huntington J L, Lymburner L, Hostert P, Gao F, Lyapustin A, Pekel J F, Strobl P and Cook B D. 2022. Fifty years of Landsat science and impacts. *Remote Sensing of Environment*, 280: 113195 [DOI: 10.1016/j.rse.2022.113195]
- Xiao Q, Wu X D, Wen J G, Bian Z J, Lin X W, You D Q and Yin G F. 2025. Thoughts on the global validation of remote sensing. *National Remote Sensing Bulletin*, 29(6): 1739-1753 (肖青, 吴小丹, 闻建光, 卞尊健, 林兴稳, 游冬琴, 尹高飞. 2025. 全局性遥感真实性检验的思考. *遥感学报*, 29(6): 1739-1753) [DOI: 10.11834/jrs.20254466]
- Xiong S Q. 2002. The application status and development trend of remote sensing technology in national land and resources. *Remote Sensing for Land and Resources*, 14(1): 1-5 (熊盛青. 2002. 国土资源遥感技术应用现状与发展趋势. *国土资源遥感*, 14(1): 1-5) [DOI: 10.3969/j.issn.1001-070X.2002.01.001]
- Xu G H, Liu Q H, Chen L F and Liu L Y. 2016. Remote sensing for China's sustainable development: Opportunities and challenges. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 20(5): 679-688 (徐冠华, 柳钦火, 陈良富, 刘良云. 2016. 遥感与中国可持续发展: 机遇和挑战. *遥感学报*, 20(5): 679-688) [DOI: 10.11834/jrs.20166308]
- Xu G H, Sun S, Chen Y T and Wu Z L. 1999. Meeting the challenge of "Digital Earth". *Journal of Remote Sensing*, 3(2): 2-6 (徐冠华, 孙枢, 陈运泰, 吴忠良. 1999. 迎接“数字地球”的挑战. *遥感学报*, 3(2): 2-6) [DOI: 10.11834/jrs.19990201]
- Xu G H, Tian G L, Wang C, Niu Z, Hao P W, Huang B and Liu Z. 1996. Remote sensing information science: Progress and prospect. *Acta Geographica Sinica*, 51(5): 385-397 (徐冠华, 田国良, 王超, 牛铮, 郝鹏威, 黄波, 刘震. 1996. 遥感信息科学的进展和展望. *地理学报*, 51(5): 385-397) [DOI: 10.11821/xb199605001]
- Xu Q S, Shi Y L, Bamber J L, Tuo Y, Ludwig R and Zhu X X. 2025. Physics-aware machine learning revolutionizes scientific paradigm for process-based modeling in hydrology. *Earth-Science Reviews*, 271: 105276 [DOI: 10.1016/j.earscirev.2025.105276]
- Xue Y Q. 1992. The technical development of airborne scan imaging systems. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 11(3): 169-180 (薛永祺. 1992. 机载扫描成像系统的技术发展. *红外与毫米波学报*, 11(3): 169-180)
- Yan G J, Jiang H L, Yan K, Cheng S Y, Song W J, Tong Y Y, Liu Y N, Qi J B, Mu X H, Zhang W M, Xie D H and Zhou H M. 2021. Review of optical multi-angle quantitative remote sensing. *National Remote Sensing Bulletin*, 25(1): 83-108 (阎广建, 姜海兰, 闫凯, 程诗宇, 宋婉娟, 童依依, 刘雅楠, 漆建波, 穆西哈, 张吴明, 谢东辉, 周红敏. 2021. 多角度光学定量遥感. *遥感学报*, 25(1): 83-108) [DOI: 10.11834/jrs.20218355]
- Yan L, Jiang K W, Fan B K, Zheng Y Q, Wang M Z, Gou Z Y, Hu X Q, Zuo Z K, Fu Y and Zhao H Y. 2021. The source-end method of remote sensing information quality enhancement and the physical basis of geoscience-optoelectronic parameters correlation. *Scientia Sinica Technologica*, 51(1): 65-77 (晏磊, 姜凯文, 樊邦奎, 郑玉泉, 王明志, 勾志阳, 胡秀清, 左正康, 付瑜, 赵红颖. 2021. 遥感信息质量提升的源端方法及其地学-光电参量关联物理基础. *中国科学: 技术科学*, 51(1): 65-77) [DOI: 10.1360/SST-2020-0031]
- Yuan M B, Li Q T, Zhang B, Pan J, Gao L R, Jing L H and Lu L L. 2026. A systematic review of deep learning methods for mineral exploration using multisource geoscience data (2018 - 2025). *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 149: 105254 [DOI: 10.1016/j.jag.2026.105254]
- Zhang B. 2016. Advancement of hyperspectral image processing and information extraction. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 20(5): 1062-1090 (张兵. 2016. 高光谱图像处理与信息提取前沿. *遥感学报*, 20(5): 1062-1090) [DOI: 10.11834/jrs.20166179]
- Zhang B. 2018. Remotely sensed big data era and intelligent information extraction. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 43(12): 1861-1871 (张兵. 2018. 遥感大数据时代与智能信息提取. *武汉大学学报 (信息科学版)*, 43(12): 1861-1871) [DOI: 10.13203/j.whugis20180172]
- Zhang B, Li J S, Shen Q, Wu Y H, Zhang F F, Wang S L, Yao Y, Guo L N and Yin Z Y. 2021. Recent research progress on long time series and large scale optical remote sensing of inland water. *National Remote Sensing Bulletin*, 25(1): 37-52 (张兵, 李俊生, 申茜, 吴

- 艳红, 张方方, 王胜蕾, 姚月, 郭立男, 殷子瑶. 2021. 长时序大范围内陆水体光学遥感研究进展. 遥感学报, 25(1): 37-52 [DOI: 10.11834/jrs.20210570]
- Zhang B, Liu Q H, Li X M, Liu L Y, Yang B S, Husi L T, Gao L R, Zhang W J, Zhang H, Bian Z J, Qi M J, Chen C and Shang H Z. 2025. The core concepts and fundamental issues of remote sensing science. National Remote Sensing Bulletin, 29(1): 1-48 (张兵, 柳钦火, 李晓明, 刘良云, 杨必胜, 胡斯勒图, 高连如, 张文娟, 张浩, 卞尊健, 齐梦佳, 陈驰, 尚华哲. 2025. 遥感科学的内涵与基础性问题. 遥感学报, 29(1): 1-48) [DOI: 10.11834/jrs.20244503]
- Zhang B, Wu Y F, Zhao B Y, Chanussot J, Hong D F, Yao J and Gao L R. 2022a. Progress and challenges in intelligent remote sensing satellite systems. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 15: 1814-1822 [DOI: 10.1109/JSTARS.2022.3148139]
- Zhang F F, Li J S, Wang C and Wang S L. 2023. Estimation of water quality parameters of GF-1 WVF in turbid water based on soft classification. National Remote Sensing Bulletin, 27(3): 769-779 (张方方, 李俊生, 王超, 王胜蕾. 2023. 高分一号卫星浑浊水体水质参数软分类反演. 遥感学报, 27(3): 769-779) [DOI: 10.11834/jrs.20232442]
- Zhang H, Zhang F, Liu L, Liu Y Z, Letu H S, Yang Y J, Li Z Q, Wu K, Hu S, Li M, Dai T, Wang F, Wang Z L, Ling Y X, Shi Y N and Liu C. 2024a. Advances in atmospheric radiation: theories, models, and their applications. Part II: Radiative transfer models and related applications. Journal of Meteorological Research, 38(2): 183-208 [DOI: 10.1007/s13351-024-3089-y]
- Zhang L L, Wu J H, Meng Q Y, Wang X M, Du H Y and Pan J. 2025. Thermal environmental benefit based on the fine landscape pattern of urban green space. National Remote Sensing Bulletin, 29(7): 2469-2482 (张琳琳, 吴嘉豪, 孟庆岩, 汪雪森, 杜弘宇, 潘婧. 2025. 基于城市绿度空间精细景观格局的热环境效益研究. 遥感学报, 29(7): 2469-2482) [DOI: 10.11834/jrs.20254184]
- Zhang S H and Pan Z G. 2025. Remote sensing large models: Review and future prospects. Remote Sensing Technology and Application, 40(1): 1-13 (张帅豪, 潘志刚. 2025. 遥感大模型: 综述与未来设想. 遥感技术与应用, 40(1): 1-13) [DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2025.1.0001]
- Zhang W, Cai M X, Zhang T, Zhuang Y, Li J and Mao X R. 2025a. EarthMarker: a visual prompting multimodal large language model for remote sensing. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 63: 5604219 [DOI: 10.1109/TGRS.2024.3523505]
- Zhang W, Cai M X, Zhang T, Zhuang Y and Mao X R. 2024b. EarthGPT: a universal multimodal large language model for multisensor image comprehension in remote sensing domain. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 62: 5917820 [DOI: 10.1109/TGRS.2024.3409624]
- Zhang X Y, Friedl M A, Schaaf C B, Strahler A H, Hodges J C F, Gao F, Reed B C and Huete A. 2003. Monitoring vegetation phenology using MODIS. Remote Sensing of Environment, 84(3): 471-475 [DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00135-9]
- Zhang X R, Zhang T Y, Wang G C, Zhu P, Tang X, Jia X P and Jiao L C. 2023. Remote sensing object detection meets deep learning: a metareview of challenges and advances. IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, 11(4): 8-44 [DOI: 10.1109/MGRS.2023.3312347]
- Zhang X Y, Dong X Y, Zhou Q and Du S H. 2025b. Spatiotemporal big data empower community modeling, monitoring, evaluation, and optimization for sustainable community development: A review of challenges and opportunities. IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, 13(1): 8-31 [DOI: 10.1109/MGRS.2024.3486264]
- Zhang Y T, Xiao Q, Wen J G, You D Q, Dou B C, Tang Y and Peng S. 2017. Review on spectral libraries: progress and application. Journal of Remote Sensing (in Chinese), 21(1): 12-26 (张莹彤, 肖青, 闻建光, 游冬琴, 窦宝成, 唐勇, 彭实. 2017. 地物波谱数据库建设进展及应用现状. 遥感学报, 21(1): 12-26) [DOI: 10.11834/jrs.20175324]
- Zhang Z X, Wang C H, Song J N and Xu Y L. 2022b. Object tracking based on satellite videos: A literature review. Remote Sensing, 14(15): 3674 [DOI: 10.3390/rs14153674]
- Zhang Z X, Wang X, Wen Q K, Zhao X L, Liu F, Zuo L J, Hu S G, Xu J Y, Yi L and Liu B. 2016. Research progress of remote sensing application in land resources. Journal of Remote Sensing (in Chinese), 20(5): 1243-1258 (张增祥, 汪潇, 温庆可, 赵晓丽, 刘芳, 左丽君, 胡顺光, 徐进勇, 易玲, 刘斌. 2016. 土地资源遥感应用研究进展. 遥感学报, 20(5): 1243-1258) [DOI: 10.11834/jrs.20166149]
- Zhao C C, Wen J G, You D Q, Tang Y, Han Y, Liu G K, Wei K X, Wang H J and Liu Q H. 2025. Modeling top-of-atmosphere anisotropic reflectance of discrete forests over sloped surface. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 63: 4407711 [DOI: 10.1109/TGRS.2025.3557557]
- Zhao Y S. 2003. Principles and methods of remote sensing application analysis. Beijing: Science Press (赵英时. 2003. 遥感应用分析原理与方法. 北京: 科学出版社)
- Zhong S Y, Xiao Q, Wen J G, Zheng X M, Ma M G, Qu Y H, Zheng K, Chi T H, Tang Y, You D Q, Hao D L, Cheng J, He M, Jiang T, Jin R, Yao X J and Zhao L J. 2020. Design and realization of ground object background spectral library for surveying and mapping. Journal of Remote Sensing (in Chinese), 24(6): 701-716 (钟守熠, 肖青, 闻建光, 郑兴明, 马明国, 屈永华, 郑柯, 池天河, 唐勇, 游冬琴, 郝大磊, 程娟, 贺敏, 姜涛, 晋锐, 姚晓婧, 赵理君. 2020. 测绘地物波谱本底数据库. 遥感学报, 24(6): 701-716) [DOI: 10.11834/jrs.20209482]
- Zhou Z G, Yang Y J and Chen H. 2023. Optoelectronic Technology and Applications. 3rd ed. Beijing: Science Press: 1-236 (周自刚, 杨永佳, 陈浩. 2023. 光电子技术及应用. 第3版. 北京: 科学出版社: 1-236)
- Zhu Z and Woodcock C E. 2014. Continuous change detection and classification of land cover using all available Landsat data. Remote Sensing of Environment, 144: 152-171 [DOI: 10.1016/j.rse.2014.01.011]
- Zhu Z Y, Chang Z B, Tan B, Chen R, Li X Y, Zheng H J, Kang X Y,

Sun D, Peng X T and Wang T. 2025. Research on the provincial normalised monitoring of natural resources for territorial spatial supervision: A case study of Guangdong province. *Journal of Natural Resources*, 40(3): 600-617 (朱紫阳, 常中兵, 谭宾, 陈睿, 李妍妍, 郑华健, 康昕怡, 孙端, 彭小桃, 王腾. 2025. 面向国土空间

监管的省域自然资源常态化监测研究——以广东省为例. *自然资源学报*, 40(3): 600-617) [DOI: 10.31497/zrzyxb.20250303]

Zou L, Chen F, Huang X and Kar B. 2023. Big Earth Data for disaster risk reduction. *Big Earth Data*, 7(4): 931-936 [DOI: 10.1080/20964471.2023.2291901]

Research on disciplinary knowledge and teaching system of remote sensing science and technology

ZHANG Bing^{1,2}, CHEN Fang^{1,2}, GAO Lianru^{1,2}, ZHANG Wenjuan^{1,2}, WEN Jianguang^{1,2},
NIU Zheng^{1,2}, LIU Qinhua^{1,2}, HE Guojin^{1,2}, MENG Qingyan^{1,2}

1. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Remote Sensing Science and Technology is a strategic emerging interdisciplinary subject, which has formed a four-in-one disciplinary framework consisting of remote sensing science, remote sensing observation, remote sensing data processing, and remote sensing application. This study systematically investigates and elaborates the knowledge and teaching system, as well as the overall disciplinary architecture of remote sensing science and technology. As the theoretical foundation of the discipline, remote sensing science contains four core knowledge modules: spatiotemporal spectral characteristics of ground objects, remote sensing radiative transfer mechanism, quantitative remote sensing inversion theory, and radiometric calibration and validation. These modules lay the mathematical and physical foundation for the whole discipline. Remote sensing observation focuses on the core theories and technical systems of electromagnetic wave detectors, remote sensing imaging systems, and space – air – ground observation platforms. It relies on multispectral, multimodal sensors and constellation observation technologies to realize the source acquisition of massive remote sensing data. Remote sensing data processing is composed of key theories and methods, including quantitative image preprocessing, intelligent interpretation, high-performance computing, and on-orbit real-time processing. Combined with remote sensing foundation models, it realizes the efficient conversion of raw observation data into valuable geoscientific information. Remote sensing application covers image analysis technologies and methods for a wide range of fields, including land resources, agriculture, ecoenvironment, disaster emergency response, meteorology and oceanography, urban studies, geology and mineral resources, planetary exploration, and Digital Earth. It comprehensively supports major strategies, such as food security, ecological civilization construction, climate change, and global sustainable development. @@At present, China has achieved fruitful progress in the theoretical research, technical development, and industrial application of remote sensing science and technology. However, the undergraduate and postgraduate teaching systems continue to suffer from fragmented knowledge, incomplete disciplinary logic, insufficient integration of cutting-edge advances, and weak connection between theoretical lectures and practical training. This issue has brought multiple challenges to interdisciplinary discipline construction and the cultivation of compound innovative talents. Amid the digital transformation driven by big data and artificial intelligence, curriculum arrangement and teaching practice based on the four-in-one knowledge and teaching framework must be continuously optimized. Furthermore, the full-chain digital and intelligent upgrading of remote sensing science and technology must be promoted. Cutting-edge research directions, such as a dual-drive paradigm that combines physical models and data-driven algorithms, multiplatform collaborative observation, multimodal remote sensing foundation models, and cross-domain intelligent decision support should be further developed. Through the collaborative optimization of theory, technology, application, and teaching, the discipline can continuously strengthen its original innovation capacity, industrial service capability, and talent training quality to advance the high-quality development of remote sensing science and technology.

Key words: remote sensing science and technology, remote sensing science, remote sensing observation, remote sensing data processing, remote sensing application, disciplinary architecture

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 42425103, 42325104, 42471371)