

# 遥感科学的内涵与基础性问题

张兵<sup>1,2,3</sup>, 柳钦火<sup>1,2,3</sup>, 李晓明<sup>1</sup>, 刘良云<sup>1</sup>, 杨必胜<sup>4</sup>, 胡斯勒图<sup>1,3</sup>,  
高连如<sup>1</sup>, 张文娟<sup>1</sup>, 张浩<sup>1</sup>, 卞尊健<sup>1,3</sup>, 齐梦佳<sup>1</sup>, 陈驰<sup>4</sup>, 尚华哲<sup>1,3</sup>

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 资源与环境学院, 北京 100049;

3. 遥感科学国家重点实验室 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094;

4. 武汉大学 测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉 430072

**摘要:** 自20世纪60年代以来, 遥感科学与技术一直是世界大国竞相发展的高科技领域, 已成为人类开展地球系统科学研究和多领域空间信息综合应用的核心技术手段。近年来, 以深度学习为代表的人工智能技术引发了数据驱动的遥感数据分析与应用新范式的变革, “遥感科学与技术”也正式成为中国研究生教育交叉门类一级学科。在此背景下, 深入探讨遥感科学的内涵与基础性问题尤为重要。本文从遥感科学的物理基础出发, 即地物与电磁波相互作用并在特定条件下形成遥感电磁波谱图像, 将遥感科学的基本理论问题归纳为辐射、光谱、时相3大特性和尺度、大气、角度、邻近、传递5大效应, 前者是由于地物自身理化特点在电磁波谱上表现出的固有特征, 而后者是在成像尺度、大气条件、观测角度、背景环境、传感器成像机制等不同观测模式与条件下形成的地物遥感特征表达及其变化规律。上述对遥感科学的内涵与基础性问题的梳理与讨论, 有助于在人工智能蓬勃发展的大背景下深化和促进遥感科学基础理论研究, 进一步推进遥感信息获取、处理与应用技术的创新发展, 持续推动遥感与其他学科领域的深度交叉融合。

**关键词:** 遥感科学, 地物电磁波谱, 辐射传输, 尺度效应, 角度效应, 反射辐射, 发射辐射, 激光雷达, 合成孔径雷达

**中图分类号:** TP701/P2

**引用格式:** 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

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 [DOI: 10.11834/jrs.20244503]

## 1 引言

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、地磁场等)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(Remote Sensing)”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, 其起始于20世纪50年代末, 在电子材料、计算机、通讯、地球科学等发展基础上产生的一项新兴科学与技术。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。本文论述的“遥感”均是指以上狭义的“遥感”, 即通过各类航空航天平台搭载的遥感成像设备获取地物电磁波谱图像数据进而开展地物分类、识别、变化分析和参量反演等应用的科学与技术。

科学与技术一直以来都是人类文明发展的重要组成部分。科学是人类对自然界中固有规律的探索和发现的过程, 是通过观察、实验和推理来获取知识的方法体系; 而技术则是应用科学知识

收稿日期: 2024-11-04; 预印本: 2024-12-11

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 42030111, 42325104, 41930111, 42130105)

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

和方法来解决问题、满足需求的实践手段,是将科学成果转化为实际应用的工具(Nagel, 1979)。

在遥感领域同样包括科学和技术两个维度,前者用于研究遥感现象和规律,后者是指用于获取、处理和分析遥感数据的各种手段和方法。尽管遥感科学基础是物理学(比如,地物与电磁波的相互作用完全遵循物理学规律),但遥感又有特定的研究对象与研究模式。比如,在遥感技术与应用中非常关键的尺度效应问题:1 m、10 m、1 km 像元尺度下的同一块小麦田在不同电磁波段下的反射和发射特性是什么?这对于基于遥感技术的地物认知,尤其是量化参量反演极为重要,这就形成了遥感科学存在的依据。因此,遥感科学是研究发现遥感领域中所涉及的自然规律并总结形成相关理论以及可量化描述的模型、公式等。

尤其值得关注的是,2022年“遥感科学与技术”被正式列入研究生教育学科专业目录中的交叉学科门类一级学科,这充分表明了该领域在国家科技体系中的重要地位。另一方面,以深度学习为代表的人工智能技术近年来迅速发展,引发了数据驱动的遥感数据分析与应用新范式的变革(Reichstein等, 2019; Zhang等, 2019a)。在此大背景下,系统性地总结和探讨遥感科学的基础性问题尤为必要。

根据电磁波谱范围,遥感分为可见—短波红外遥感、热红外遥感和微波遥感等。其中,根据辐射源特点,可见—短波红外遥感又可进一步分为被动方式的太阳反射辐射遥感、日光诱导叶绿素荧光(SIF)遥感(简称荧光遥感)以及采用主动方式的激光遥感。可见—短波红外的反射辐射遥感以太阳为辐射源,通过接收地物在0.4—2.5  $\mu\text{m}$  波长范围的地物反射信号来研究地物的遥感特性;荧光遥感则是植物叶绿素分子吸收0.4—0.7  $\mu\text{m}$  的太阳光子后形成激发电子,当其激发电子回到基态时产生0.65—0.8  $\mu\text{m}$  波长范围的遥感辐射信号;激光遥感通过高精度、高频率的激光雷达器件发射一定波长(通常为1.064  $\mu\text{m}$ )的激光进行主动式探测,对地物目标进行三维主动成像,可同时获取地物目标形态的三维密集点云和目标特性的属性数据;中长波红外遥感是通过接收地物在3—14  $\mu\text{m}$  波长范围的反射辐射或发射辐射,以探测地物性质、状态和变化规律。根据探测波长范围一般又把3—5  $\mu\text{m}$  和8—14  $\mu\text{m}$  分别称为中波红外遥感和

长波热红外遥感;微波遥感是利用波长范围在1 mm至1 m(即频率范围为0.3—300 GHz)的电磁波进行地物观测,根据使用遥感器是否向目标发射电磁波可分为主动微波遥感(微波散射计、高度计和成像雷达)和被动微波遥感(微波辐射计),分别观测得到地物后向散射和发射辐射信号。

长期以来,科学家围绕遥感科学与技术开展了系列文献综述与展望研究,大都侧重遥感与地理学关系、信息论角度、发展前沿到学科领域拓展等方面(童庆禧, 1994; 徐冠华等, 1996; 李小文, 2005; Zhang等, 2022a),也都或多或少提到遥感的谱段、时间、角度、尺度等问题,但尚未系统性总结,导致对于遥感的科学属性仍有不少困惑与争论。事实上,无论遥感使用哪些电磁波谱段以及哪种成像方式,遥感科学的基础性问题都可以归结为地物的内在属性表达和外在观测条件变化引起的差异性这两个方面,即地物遥感3大特性和5大效应,分别是辐射特性、波谱特性、时相特性以及尺度效应、大气效应、角度效应、邻近效应、传递效应。一方面,由于自身理化和生理特点,地物在电磁波谱上整体表现出的波形和强度差异的固有特征,可归结为地物遥感的辐射、光谱、时相3大特性,对于遥感成像机理的认知、数据处理方法和定量反演研究至关重要;另一方面,由于成像分辨率、大气条件、观测角度、地物周边环境、遥感器成像过程等外在条件变化造成同一地物的遥感成像结果呈现差异性,展现出尺度、大气、角度、邻近、传递5个效应,影响着遥感数据的获取和解析过程,需要在数据处理和分析中予以考虑。总之,由于地物自身及遥感观测技术、对象、环境的复杂变化性,引发了3个特性、5个效应方面的系列基础性问题。

深入分析和系统性探讨遥感科学的内涵与基础性问题具有重要意义和价值,特别是对推动遥感科学的系统化与规范化尤为重要。通过梳理遥感科学的3大特性和5大效应,本文试图提供对遥感科学基础性问题结构性理解,帮助科研人员在新兴技术,尤其是人工智能背景下,找到更具创新性和实用性的研究思路。首先,可帮助科研人员更好地把握遥感技术的研究方向和研究重点,推动遥感技术的进步和创新,更好地应对遥感领域中的挑战和问题,提出创新性的解决方案。其

次, 在推动遥感技术方面可以更好地指导遥感数据的获取、处理和应用, 为地球科学、环境保护、资源管理等领域提供更准确、更可靠的信息支持。此外, 深入探讨遥感科学的基础性问题有助于推动遥感技术与其他领域的融合与创新, 随着人工智能、大数据等新兴技术的发展, 遥感科学与这些领域的结合将会开辟出更广阔的应用前景和研究领域, 为人类社会的可持续发展提供更多可能性和机遇。

本文为论述方便, 针对可见—短波红外反射辐射、植被荧光发射辐射、激光反射辐射、中红外辐射、微波辐射及后向散射的遥感特性与效应, 从电磁波区间角度将前3项合并为可见—短波红外辐射。

## 2 地物的3大遥感特性

### 2.1 地物辐射特性

地物辐射特性反映地物在不同特性电磁波段区间(如可见光、近红外、短波红外、中波红外、长波红外、荧光、微波等)的辐射强弱整体性变化, 与地物理化特性密切相关。

#### 2.1.1 可见—短波红外辐射

反射辐射的光谱区间涵盖可见到短波红外区间, 地物在该区域反射辐射的综合特性可采用地表反照率(Albedo)来描述。该参数用于衡量不同地物对于太阳光谱整体反射的强弱, 定义为地物反射辐射度与到达物体表面的入射辐射度的比值, 是陆表能量平衡、农业、生态和全球变化等众多领域的重要参数和信息源(Dickinson, 1995)。可见至短波红外区间宽谱段地表反照率由光谱反照率积分等效计算得到:

$$A(\theta) = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \alpha(\theta, \lambda) F_d(\theta, \lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F_d(\theta, \lambda) d\lambda} \quad (1)$$

式中,  $A(\theta)$ 是 $\lambda_1$ 到 $\lambda_2$ 的宽谱段地表反照率;  $F_d$ 是大气底层入射的太阳辐射度, 随入射角 $\theta$ 和波长而变化。

总体上看, 地表反照率的时空变化通常受到土壤湿度、植被、冰/雪覆盖和人类活动等动态变化影响。冰/雪具有较高的反照率(约0.7), 沙漠的反照率大约0.4, 森林的反照率根据类型不

同在0.1—0.2变化, 海洋反照率最低, 小于0.1。表1展示了典型地物在冬季和夏季的地表反射率数值(Coakley, 2003)。

表1 典型地物类型的地表反照率

Table 1 The surface albedo of typical ground types

地表类型	反照率	
	夏季	冬季
混合农业/高草地	0.16	0.18
中高草原、常绿灌木林	0.20	0.21
低矮草原、草甸及灌木林	0.21	0.20
常绿针叶林	0.12	0.13
混合落叶林、常绿林	0.16	0.16
落叶林	0.17	0.18
热带常绿阔叶林	0.12	0.15
沙漠	0.36	0.36
苔原	0.17	0.17
雪	0.66	0.66
海冰	0.62	0.62
海洋	0.07	0.07

地表反照率是地球气候系统中开展全球变化研究的重要因子, 具有调制气候系统的能力, 影响到地表温度、能量平衡、水文循环、生物地球循环过程和气候变化等诸多方面(Seto等, 2012; Bright等, 2015)。有研究专门分析了城市化进程导致土地利用和土地覆被变化引起的地表反照率变化, 以及造成辐射强迫和温度变化。与很多人直观感受不同, 全球范围内城市地表比周边自然地表(主要是农田)总体上反照率更低, 这也表明高反射的材料在城市基础设施和建筑物中并没有广泛采用, 因此导致地表吸收更多太阳辐射造成全球温度升高(Ouyang等, 2022): 2018年和2050年相对2001年和2018年, 辐射强迫分别估算约0.00017 W/m<sup>2</sup>和0.00128 W/m<sup>2</sup>, 全球年均升温分别为0.00014°和0.0107°, 城市化进程导致全球地表反照率明显降低(Ouyang等, 2022)。

SIF是太阳光照下植被发射波长范围为0.65—0.85 μm的辐射信号。传感器探测到的SIF可以表示为(Berry等, 2012; Guanter等, 2014; Porcar-Castell等, 2014; Wieneke等, 2016)

$$SIF = PAR \times FAPAR \times \Phi_F \times f_{esc} \quad (2)$$

式中, PAR为太阳入射的光合有效辐射, FAPAR为植被吸收的光合有效辐射比例,  $f_{esc}$ 为冠层荧光逃逸概率, FAPAR和 $f_{esc}$ 均与植被冠层结构密切相关;  $\Phi_F$ 为荧光量子产率, 与植被生理状态有关。

因此, 传感器观测的SIF信号强弱受到太阳入射光照、植被冠层结构和生长状态的强烈影响。SIF已被证明是植被总初级生产力(GPP)的良好“指针”(Frankenberg等, 2013; Porcar-Castell等, 2014; 章钊颖等, 2019), 目前已被广泛应用于精确估算GPP和及时监测植物胁迫、物候和蒸腾作用等生态系统过程。

随着遥感技术的快速发展, SIF信号的探测与反演已成为可能。然而, 自然光照条件下传感器接收到植被反射的光谱信号中, 既包括SIF的贡献, 也包括植被冠层对太阳入射光的反射光谱的贡献(图1)。与反射能量相比, 冠层发射的SIF信号为弱信号, 仅仅不到吸收能量的1%(Smorenburg等, 2002), 而且SIF发射信号与反射光混叠在一起, 如何将微弱SIF信号从地表上下辐射信号中分离出来, 存在极大挑战。超高光谱分辨率卫星遥感为SIF全球观测带来巨大机会。比如, 中国首颗碳卫星(TanSat) O<sub>2</sub>-A通道光谱分辨率高达0.04 nm, 能够捕获植被日光诱导叶绿素荧光对Fe(758 nm)

和KI(771 nm)两个太阳夫琅禾费暗线的填充效应, 可以成功实现全球SIF的高精度反演。

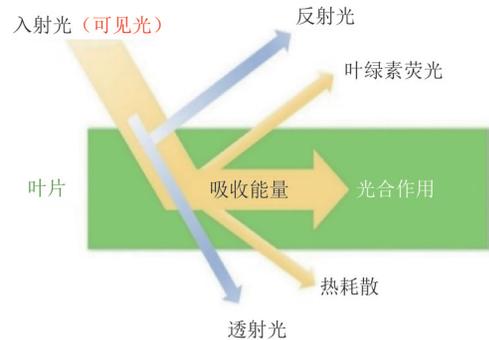


图1 入射到叶片的太阳光光子能量去向与分布图  
Fig. 1 Interaction between leaf and solar irradiance at visible band

激光雷达的三维信息探测优势在于其具有高密度、高分辨率、非接触的特点。利用激光雷达进行三维扫描可以高效采集各种场景的高精度、高密度三维点云数据, 进而可以重构出目标场景的真三维几何模型(图2)。

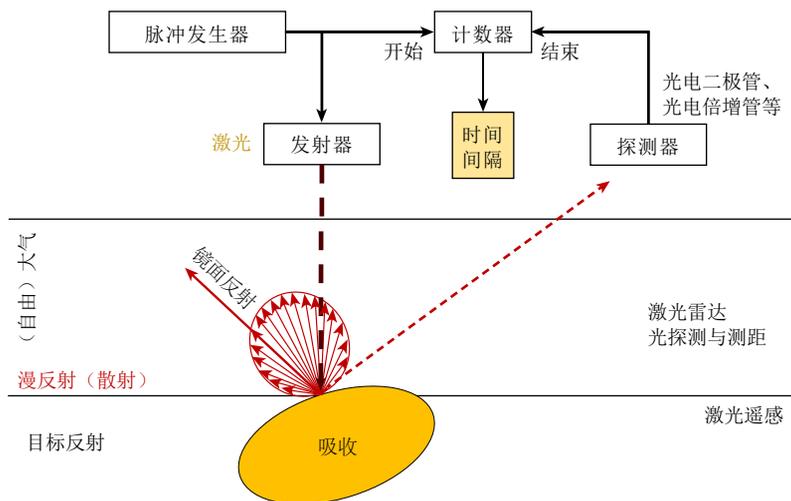


图2 激光雷达测量原理  
Fig. 2 Principle of LiDAR

扩展目标激光雷达方程为(Höfle和Pfeifer, 2007):

$$P_r = \frac{P_t D_r^2 \rho \cos \theta}{4R^2} \eta_{\text{sys}} \eta_{\text{atm}} \quad (3)$$

式中,  $P_r$ 和 $P_t$ 分别为激光接收功率和发射功率,  $D_r$ 为接收机孔径,  $\rho$ 为目标反射率,  $\theta$ 为入射角,  $\eta_{\text{atm}}$ 为大气衰减,  $\eta_{\text{sys}}$ 为仪器衰减,  $R$ 为距离目标的距离。可见测距的精度直接影响目标几何三维成像的质量。

一般而言, 激光反射强度 $I$ 与接收功率 $P_r$ 成正比, 即:  $I \propto P_r$ 。对于激光遥感系统而言,  $P_r$ 、 $D_r$ 及 $\eta_{\text{sys}}$ 都可以看做与系统相关的常数, 因此激光反射强度 $I$ 可表示为

$$I \propto \frac{\rho \cdot \cos \theta}{R^2} \cdot \eta_{\text{atm}} \quad (4)$$

反射强度与目标反射率、入射角及大气衰减因子成正比, 与距离的平方成反比。反射强度与目标的物理属性高度相关, 可用来区分地物表面的材质属性。

### 2.1.2 中长波红外辐射

所有物体, 只要绝对温度大于零度, 就会不断向外发射辐射。地表常见物体发射的峰值辐射波长位于3—14  $\mu\text{m}$ 的中长波红外区间, 该发射辐射不仅与地物表面状态有关, 而且是物质内部组成和温度的函数。

在遥感辐射传输过程中, 3—5  $\mu\text{m}$ 和8—14  $\mu\text{m}$ 是通常使用的两个大气窗口, 分别对应狭义的中波红外和长波红外波段。在晴空条件下, 大气层顶的红外辐射主要包括6个部分(对应图3中的序号): I: 地表自身发射的红外辐射; II: 大气的上行红外辐射; III: 地表反射的大气下行红外辐射; IV: 地表反射的太阳直射红外辐射; V: 大气散射的太阳红外辐射; VI: 地表反射的大气散射太阳红外辐射。对于8—14  $\mu\text{m}$ 的长波红外大气窗口, 太阳辐射的贡献微乎其微, 因此上述过程中的IV—VI部分可以忽略, 即地表反射的太阳直射辐射和散射辐射、大气散射的太阳辐射。而对于中红外波段, 太阳辐射对大气层顶辐射也具有重要影响, 必须加以考虑(Cao等, 2019; Liu等, 2016)。

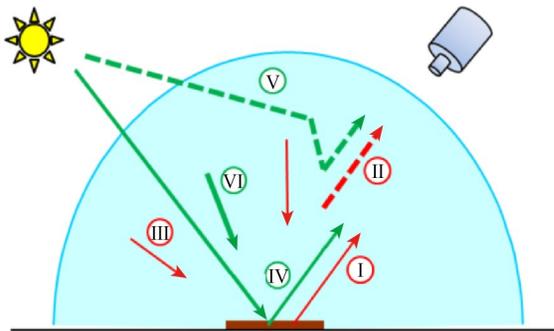


图3 中长波红外辐射传输过程  
Fig. 3 Radiative transfer process of the mid- and long-infrared spectrum

地表温度是太阳辐射—大气—地表相互作用的能量平衡结果。太阳辐射到达地表, 部分被反射, 部分被吸收变为热能引起地表增温。而地表接收的辐射能量, 一部分以长波辐射的形式发射出去, 一部分用于地表的感热、潜热和土壤热交换等(Bian等, 2017)。地表温度是辐射收支与能量平衡的动态过程参量, 与地表辐射特性以及地表热力学性质等因素(包括比热、热传导率、热容量、热惯量、热扩散率等)密切相关。因此, 热红外遥感在地表温度和地表比辐射率反演、地

物目标识别、地表能量平衡估算、矿产资源勘查、火灾和干旱监测、地球系统科学与全球变化研究等领域具有重要的应用意义(田国良等, 2006)。

描述地物热红外辐射特性的基本定理主要包括: 基尔霍夫定律、普朗克定律、斯蒂芬—波尔兹曼定律和维恩位移定律。基尔霍夫定律表明, 在一定的温度下, 任何物体的辐射出射 $F_{\lambda, T}$ 与其吸收率 $A_{\lambda, T}$ 的比值是随波长和温度变化的函数 $E_{\lambda, T}$ 。普朗克定律精确描述了绝对黑体的光谱辐射出射度 $E_{\lambda, T}$ 随波长和温度变化的分布函数。1879年斯蒂芬实验发现, 绝对黑体的积分辐射能力 $E_T$ 与其温度的4次方成正比, 1893年维恩从热力学理论导出黑体辐射光谱的极大值对应的波长与温度成反比。

$$E_{\lambda, T} = \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5} \left( E^{\frac{hc}{k\lambda T}} - 1 \right)^{-1} = \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \left( e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1 \right)^{-1} \quad (5)$$

式中,  $E_{\lambda, T}$ 的单位是 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ ,  $c$ 是光速,  $c = 2.99793 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $h$ 是普朗克常数,  $h = 6.6262 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ ,  $k$ 是波尔兹曼常数,  $k = 1.3806 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$ ,  $c_1 = 2\pi hc^2 = 3.7418 \times 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2$ ,  $c_2 = \frac{hc}{k} = 14388 \mu\text{m} \cdot \text{K}$ 。

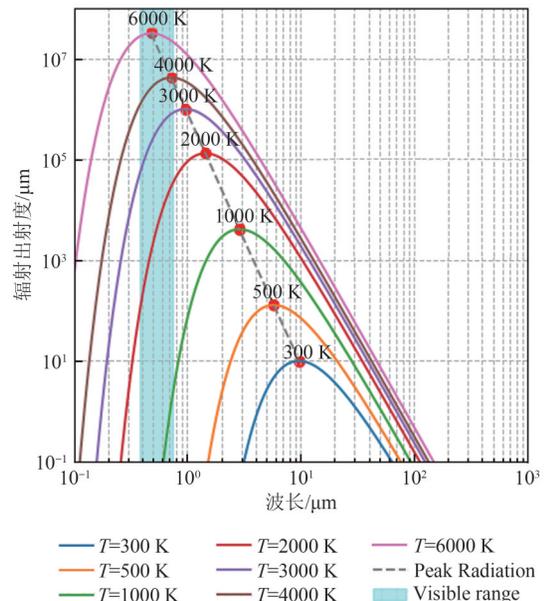


图4 不同温度黑体辐射曲线

Fig. 4 Blackbody radiation curves at different temperatures

地物的热红外辐射特性主要由温度和发射率两个因素决定, 不同地物热红外辐射特性的差异正是热红外遥感的基础。一方面, 热辐射强度与地表温度的4次方成正比, 而地表温度由时间变化、太阳辐射强度和地物属性等因素决定。具体

来说, 地表温度受到季节和气候条件、局地气象状况影响, 在年尺度和日尺度上一般呈现出周期性的变化规律; 在地域上由于太阳辐射强度和入射角度影响, 从赤道到两极温度呈现出从高到低的空间分布; 此外, 地表植被、土壤、岩石、水体、冰雪、以及人工目标等对太阳辐射具有不同的吸收能力, 加上不同的热力学性质导致的地表能量平衡过程差异, 使得不同地表物体具有明显的温度差异 (Bian 等, 2017)。另一方面, 不同材料的发射率不同, 同温不同物体热辐射的强度不同, 发射率高的材料能释放更多的热辐射。

地物发射率首先受材料的物理化学属性影响, 由化学成分、表面结构和粗糙度等因素决定, 例如湿润土壤的发射率会高于干旱土壤 (Wang 等, 2015); 其次在卫星遥感尺度, 像元对应的地表由不同地物组成, 由于其复杂的结构特性, 对应的发射率是由所有可视地物的发射率共同作用, 是混合后的结果; 最后, 由于多次散射影响, 还会产生“空穴效应” (Cao 等, 2018)。以上因素共同决定了地表发射率大小, 影响了辐射特性。

### 2.1.3 微波辐射与后向散射

微波遥感是一种具有全天候监测能力和穿透云雨大气的电磁波遥感技术, 在全球资源管理、环境监测和保护、科学研究和社会经济发展中发挥着重要的作用。微波遥感分为主动微波遥感和被动微波遥感。被动微波遥感接收地物的微波辐射来提取目标信息, 主动微波遥感是观测地物对传感器发射微波的后向散射来获取信息。

地物在微波波段的辐射特性取决于其物理特性和结构特征, 前者受介电常数和地物温度影响, 后者受地物表面结构和立体结构影响。其中, 介电常数是影响地物微波辐射的最重要参数, 直接影响地物的微波散射与辐射, 例如: 由于水的介电常数较高导致反射比吸收强, 使得海洋相比陆地表现出较低的辐射亮温; 而干燥土壤和植被由于介电常数较低, 表现出较高的微波辐射; 冰雪的低损耗特性导致的冰雪覆盖的地表在低频微波波段显示出独特的高亮温特性。地物温度在特定频率决定了地物微波辐射强弱, 但地物温度对地物微波辐射强弱的影响并不是线性, 温度会一定程度上改变地物介电常数, 从而改变地物辐射率, 最终影响地物微波辐射。地物表面结构直接影响

微波的反射和散射并导致其强度的变化; 地物立体结构, 如层状结构 (如积雪覆盖、植被层) 和孔隙结构 (如土壤、岩石) 对穿透的微波的产生散射和吸收效应, 直接影响地物的微波散射强度。

## 2.2 地物波谱特性

地物的光谱特性表现为地物反射和发射信号强弱随着波长的变化, 从辐射源上看包括太阳、地物自身和其他发射源。从可见光到微波谱段, 地物因物质成分、结构和状态差异造成吸收、反射和发射特性在不同波段间出现明显差异性, 即“谱”特性。

### 2.2.1 可见—短波红外辐射

地物的光谱特性与其内在的理化特性紧密相关, 由于物质成分和结构的差异造成物质内部对不同波长光子的吸收和散射, 在可见—短波红外波段表现出明显的特征光谱。地物光谱特性在遥感技术及应用中占有重要地位, 可以利用这些光谱曲线的反射峰、吸收谷、斜率等主要形态特征来定量提取地物参量信息 (童庆禧 等, 2006)。决定物质光谱形状的主要物质成分被称为“色基 (Chromophore)”: 在一些离散波长处能够造成能量吸收 (如植被中的叶绿素) 或者发射 (如荧光) 的成分称为“化学色基 (Chemical chromophore)”, 通过近红外—短波红外区间的泛频及合频谱带分子振动和可见光区间的电子作用 (主要是晶体场和电荷转移效应) 两个化学过程发挥作用; 主导光谱整体形状的因素称为“物理色基 (Physical chromophore)”, 主要指颗粒尺度和折射率指数 (Ben-Dor 等, 2013)。表 3 罗列了主要化学色基和典型吸收峰位置 (童庆禧 等, 2006)。

通过这些色基更容易理解不同地物独特的光谱特征, 以下仅以矿物和植被为例进一步讨论。

图 5 展示了实验室测量的矿物光谱曲线 (张兵 等, 2020a), 可见光区间主要受金属离子的电子作用, 例如褐铁矿的  $Fe^{2+}$  离子在  $1.0 \mu m$  有明显的吸收; 近红外—短波红外区间受到分子振动影响, 表现为羟基的吸收特征, 例如黄钾铁矾在  $2.28 \mu m$  的  $Fe-OH$  吸收、高岭石和蒙脱石在  $2.2 \mu m$  的  $Al-OH$  吸收。这些物质因为成分不同呈现出明显的诊断光谱特征, 这也说明了遥感科学中关注地物光谱特性这一自然属性的重要性。

表3 地物主要化学色基及吸收波长

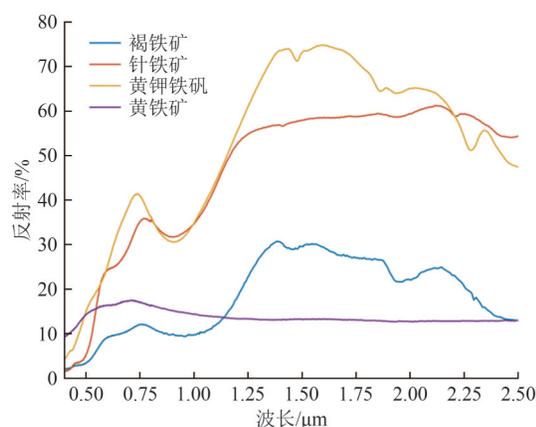
Table 3 The chemical chromophores and absorption wavelength for surface objects

色基	吸收峰波长/ $\mu\text{m}$
$\text{Fe}^{2+}$	0.43, 0.45, 0.51, 0.55, 1.0—1.1, 1.8—1.9
$\text{Fe}^{3+}$	0.40, 0.45, 0.49, 0.52, 0.70, 0.87
$\text{Ni}^{2+}$	0.40, 0.75, 1.25
$\text{Cu}^{2+}$	0.8
$\text{Mn}^{2+}$	0.34, 0.37, 0.41, 0.45, 0.55
$\text{Cr}^{3+}$	0.40, 0.55, 0.70
$\text{Ti}^{4+}$	0.45, 0.55, 0.60, 0.64
$\text{La}^{2+}$	0.5, 0.6, 0.75, 0.8
叶绿素 a	0.43, 0.66
叶绿素 b	0.46, 0.64
蛋白质	0.91, 1.02, 1.51, 1.69, 1.94, 1.98, 2.06
水分子	0.94, 0.97, 1.02, 1.135, 1.38, 1.40, 1.45, 1.875, 1.94
淀粉	0.97, 0.99, 1.20, 1.45, 1.53, 1.54, 1.58, 1.69, 1.78, 1.90, 1.94, 1.96, 2.00, 2.08, 2.10
木质素	1.12, 1.20, 1.42, 1.45, 1.69, 1.94
纤维素	1.20, 1.49, 1.54, 1.78, 1.82, 1.94, 2.10
糖	1.49, 1.58, 1.96, 2.08
$\text{OH}^-$	1.40, 2.15—2.22 (Al-OH), 2.30—2.39 (Mg-OH), 2.24—2.27 (Fe-OH)
$\text{CO}_3^{2-}$	1.90, 2.00, 2.16, 2.35, 2.55
$\text{NH}_4^+$	2.0—2.13

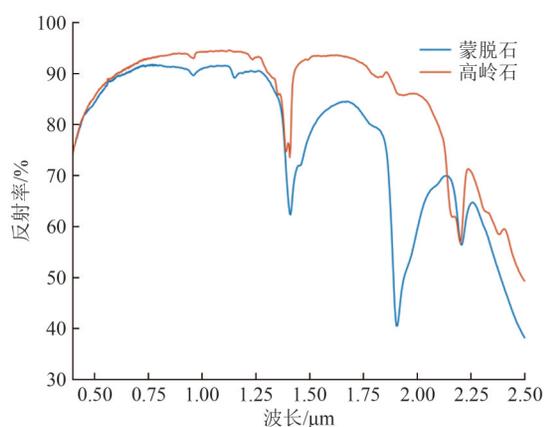
植被光谱特征与植被发育、健康状况以及生长条件密切相关。以叶绿素为主的色素物质主导了植被可见光区间的光谱特征，表现为 $0.45 \mu\text{m}$ 和 $0.65 \mu\text{m}$ 波段的吸收谷；近红外波段区间，叶片生化组分吸收很弱，其光谱特征主要受植被叶片内部多次散射特性的影响，表现为高反射特征（45%—50%）；红光波段到近红外波段（ $0.76 \mu\text{m}$ ）植被反射率迅速上升形成所谓“红边”，成为诊断植被健康状况的重要指标；短波红外区间光谱形状主要受叶片水分的吸收影响，表现为 $1.4 \mu\text{m}$ 和 $1.9 \mu\text{m}$ 两个明显的吸收特征。图6展示了健康绿色植被、胁迫植被以及枯黄植被的光谱特征。

SIF信号不仅具有强度信息，还具有光谱形状信息。SIF光谱范围为 $0.65$ — $0.85 \mu\text{m}$ ，呈现出双峰的形状，其中红光SIF峰值位于 $0.687 \mu\text{m}$ 附近，近红外SIF峰值位于 $0.74 \mu\text{m}$ 附近（图7）。SIF光谱是光系统I即PSI（Photo-system I）和光系统II即PSII（Photosystem II）发射荧光的总和，这两个光系统对两个荧光峰贡献不同，其中PSI主要发射近红外SIF，PSII同时发射红光和近红外SIF。研究表明，SIF两个荧光峰强度的消长与植物受胁迫程

度有密切联系（吴荣等，1992），比如红光与近红外SIF比值随植被水分和病虫害等胁迫增加而增加（张永江等，2007）。此外，植物叶绿素含量的变化也会影响荧光光谱的双峰大小和比值（图8），叶绿素含量越大，两个荧光峰值的差距越大。SIF光谱形状的双峰特点和峰值比值反映了两个光系统的匹配程度，与植被生理状态密切相关，因此这种波谱特性可以用于预测植被长势、监测植被胁迫和进行植物生理状态的研究（Lichtenthaler和Rinderle，1988；Agati等，1995；Lichtenthaler和Miehe，1997；Porcar-Castell等，2014；Zarco-Tejada等，2009）。



(a) 黄铁矿化和褐铁矿化主要矿物的光谱反射率  
(a) Spectral reflectance of the primary minerals involved in pyritization and limonitization



(b) 高岭石和蒙脱石矿物的光谱反射率  
(b) Spectral reflectance of kaolinite and montmorillonite minerals

图5 实验室测量的矿物光谱对比

Fig. 5 Comparison of laboratory measurements for different minerals

SIF波谱特性的重要意义使得研究全波段SIF光谱遥感反演及其应用机理具有了重要的科学价

值。图9显示了0.3 nm光谱分辨率、0.15 nm光谱采样间隔条件下0.65—0.8 μm范围的SIF光谱和冠层总上行辐亮度光谱。可以看出，在0.3 nm光谱分辨率的条件下，SIF光谱范围内主要有4个可利用的吸收波段，分别为0.656 μm附近的Hα太阳夫琅和费吸收线、0.687 μm附近的O<sub>2</sub>-B吸收波段、0.719 μm附近的水汽吸收波段和0.76 μm附近的O<sub>2</sub>-A吸收波段。基于荧光的夫琅和费暗线填充原理可以反演单波段和全波段SIF信号。全波段SIF反演需要利用多个吸收波段信息，通过光谱拟合方法重建全波段SIF光谱，目前常用的全波段SIF反演算法包括F-SFM算法(Liu和Liu, 2015)、

SpecFit算法(Cogliati等, 2015)、FSR算法(Zhao等, 2014)等。

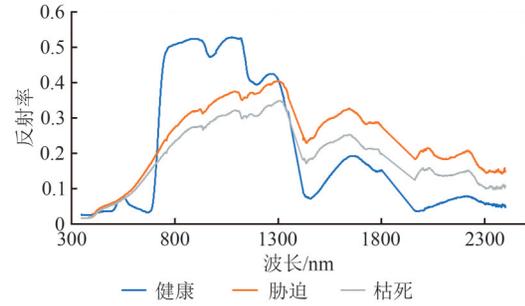


图6 各类植被光谱特征对比

Fig. 6 Comparison of spectral features from different vegetation types

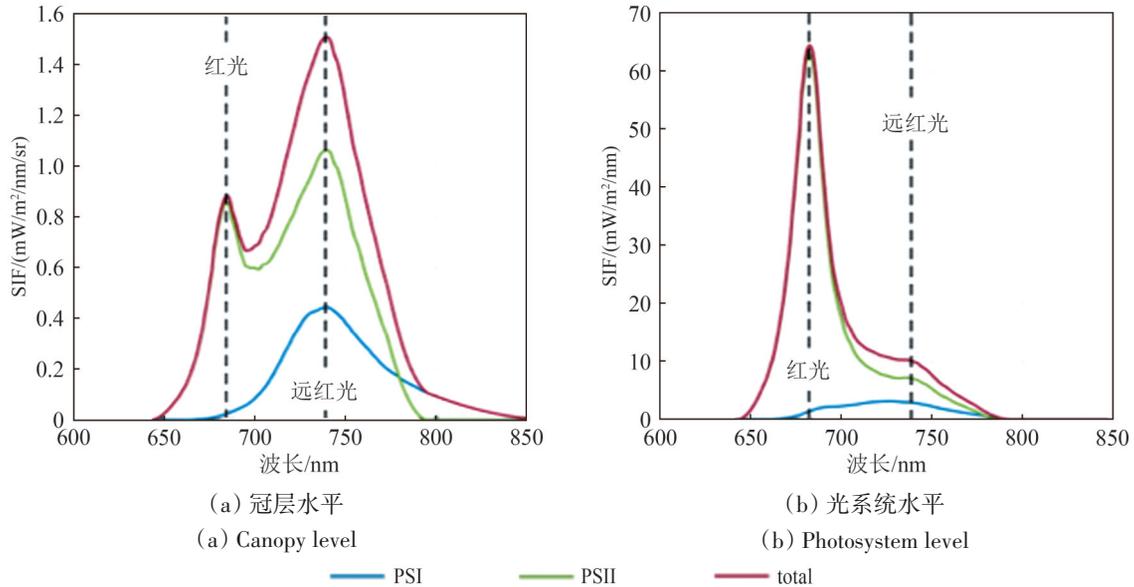


图7 荧光光谱形状分布

Fig. 7 Spectral curves of SIF

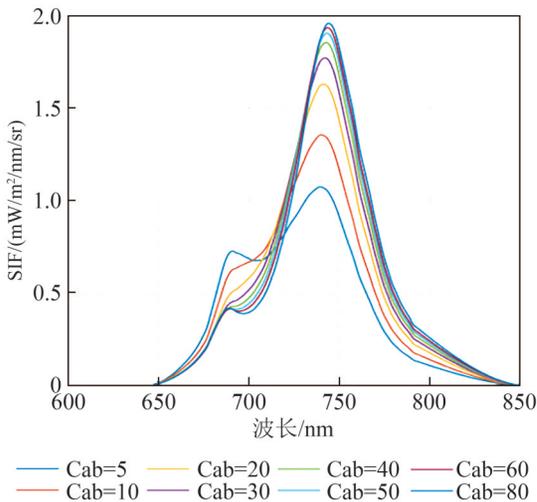


图8 不同叶绿素含量下的冠层荧光光谱形状

Fig. 8 The shape of canopy SIF spectrum under different chlorophyll content

激光相比普通光源单色性、方向性好，亮度更高，根据不同的波长范围分为紫外激光、可见激光、近红外激光和中远红外激光。发射激光的激光雷达器件主要有固体激光器(0.355 μm、0.532 μm和1.064 μm)、光纤激光器(1.07 μm)和CO<sub>2</sub>激光器(10.6 μm)。在遥感领域，激光雷达主要用于地形测绘(固体激光器)、大气探测(CO<sub>2</sub>激光器等)、海冰厚度测量和海洋测深(蓝绿双波长激光雷达)，不同波长的激光雷达与激光器的功率和测量的精度高度相关，用于测绘遥感的激光雷达常用波长有0.532 μm、1.064 μm和1.55 μm等。激光遥感使用一定波长的激光对地物目标进行主动探测，除获取地物目标的几何特性外，可同时获取反映地物物理特征的属性数据，即地物

目标的反射强度，通过反射强度可区分地物目标的物理特性。

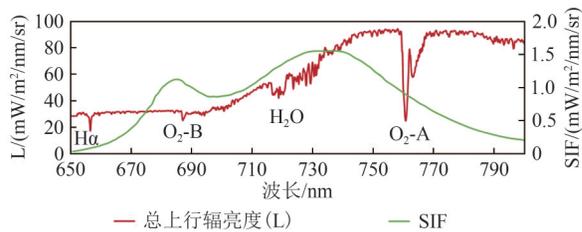


图9 0.3 nm 光谱分辨率下叶绿素荧光、冠层总上行辐亮度及主要吸收光谱位置示意图

Fig. 9 The schematic diagram of chlorophyll fluorescence, total upward canopy radiance, and the positions of major absorption wavelengths at a spectral resolution of 0.3 nm

### 2.2.2 中长波红外辐射

地物中长波红外发射率就是物体发射辐射与同温黑体辐射的比值，又称地物的比辐射率。中长波红外波谱用于表述地物红外发射率随波长的变化谱特征，不同地物由于成分、结构和状态存在差异，表现出不同的中长波红外发射波谱特性。因此，研究地物红外发射波谱具有重要的意义。首先，红外发射波谱可以用于典型目标识别和地物分类，如可以用于识别典型岩石和矿物，有效区分植被、土壤、水体、冰雪以及人工目标等；其次，由于卫星接收到的红外辐射是地表温度和红外发射波谱的耦合结果，获得红外发射波谱是高精度反演地表温度的基础；红外发射波谱在大气湿度廓线反演、大气痕量气体浓度反演、地表与大气之间的能量交换过程、地球系统能量平衡以及气候变化的驱动机制研究等方面具有重要的意义 (Li等, 2023)。

从机理上讲，发射光谱是由组成物体的分子振动和转动产生，可以分为伸缩振动和弯曲振动两大类：伸缩振动指原子沿着键轴方向往复运动，过程中键长发生改变，振动过程中带来偶极矩变化的称之为具有红外活性振动，否则是红外非活性振动；弯曲振动指原子垂直于化学键的振动。石英作为地壳中最普遍的矿物，其最典型的特征反射峰便是由Si-O键拉伸和弯曲造成。中、长波红外光谱属于分子的基频振动光谱，基频振动与物质的晶体结构、物质组成密切相关，形成特有的波谱特征，从而可以用来识别矿物。由于分子振动和转动的能量不是连续的，呈现量子化特点，

从而形成了位于不同波长的特征谱线，这对于气体来说尤为明显，而对于固体和液体来说，分子排列紧密，相互作用也更强，时刻变化的分子状态，物体分子的综合波谱将一些细小的特征谱线掩盖，所以固体和液体的发射率相比气体会更为平滑。在地球表面，71%的面积被发射率非常稳定的海洋所覆盖，而陆地表面是一个复杂多样的集合体，按地表覆盖情况，可以简单划分为裸露地表和植被覆盖区两大部分；植被区，特别是浓密植被具有非常高的发射率（通常为0.95—0.98），与水体一样常被视为黑体。而裸露地表发射率稍小，并且随着成分、理化条件和表面状态等变化较大（通常为0.7—0.95）。

中长波红外波谱可以由主动测量和被动测量方法得到，主动测量方法主要是通过向待测量目标发射红外辐射，通过测量半球空间内目标的二向反射率，根据基尔霍夫定律计算发射率波谱；被动测量方法是指通过红外波谱仪，被动测量目标物体发射的分谱红外辐射亮度，通过辐射传输方程计算得到目标物体的热红外发射率波谱。目前，应用最广泛的热红外波谱库包括：美国JPL、USGS和JHU光谱库，其发射率波谱均在实验室采用主动测量得到；中国的典型地物光谱数据库主要是野外被动测量方法得到 (程洁等, 2008)。图10是2003年5月4日在河北省栾城县测量的几种陆地表面的热红外发射率波谱。可以看出，在8—14  $\mu\text{m}$ 热红外大气窗口下，多种地物的发射率大于0.95，且随波长的变化较小。人工地物的发射率在9  $\mu\text{m}$ 处略小，小于0.90。

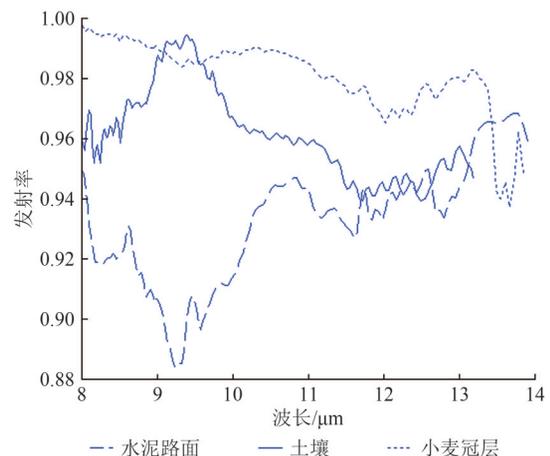


图10 典型地物红外发射率光谱

Fig. 10 Spectral emissivity of typical surface objects

影响地物热红外波谱特性的因素包括地物组成、成分、结构、状态等因素，下面以植被叶片和土壤的热红外波谱特性为例进行说明。

叶片的发射率整体上呈现出变化较小的特点，集中在0.95—0.98，但也受到水分含量、内部结构、表面性质、色素含量、生理状况等的影响。含水量较高的叶片通常具有较高的发射率，因为水分子对红外辐射的吸收能力强，从而增加了叶片的辐射能力；叶片的内部细胞的排列方式、细胞壁的厚度以及细胞间隙的大小都会影响叶片的发射率，较厚的叶片通常会有较高的发射率；叶

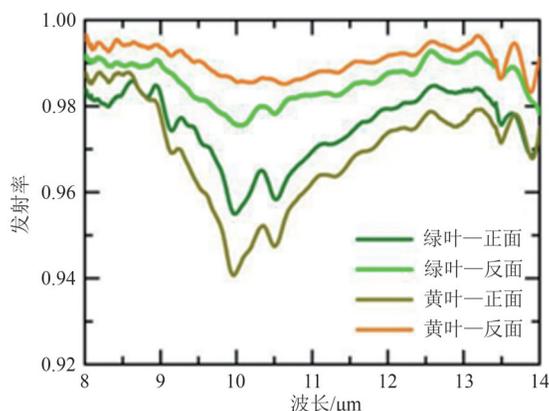


图11 同一棵树绿色与黄色叶片正反面发射率

Fig. 11 Emissivity for the front and back surfaces of green and yellow leaves on the same tree

土壤的发射率受到矿物成分、土壤湿度、土壤粒径与结构等的影响，大部分土壤发射率集中在0.90—0.95 (Wang等, 2020)。土壤的矿物成分是影响发射率的主要因素之一，不同矿物具有不同的红外发射率。例如，石英砂通常具有较低的发射率，而含有较多黏土矿物的土壤发射率较高；土壤中有机质含量越高，发射率通常越高，这是因为有机质能够吸收更多的热量并有效地发射红外辐射；湿润的土壤由于水的存在，发射率较高，通常接近1，干燥的土壤则可能表现出较低的发射率；细粒土壤，如黏土和粉砂，通常具有较高的发射率，因为它们的表面积较大，能吸收并发射更多的红外辐射，粗粒土壤如沙土，发射率相对较低。图12为怀来地区典型的土壤，从干土到饱和分别配制不同梯度含水量(S1到S10对应0.8%、5.3%、6.2%、10.5%、2.3%、11.5%、13.9%、16.1%、17.3%和20.3%)情况下的发射率测量结果，在一定范围内发射率随着含水量增加而增加，但含水量达到一定的程度后，发射率不再增加而

片表面的蜡质层会影响其反射和吸收红外辐射的能力，从而影响发射率，较厚的蜡质层可能会导致发射率的降低；健康的叶片通常具有较高的发射率，而受到病害或环境应激的叶片可能会显示出较低的发射率。图11为2012年9月28日，河北保定同一棵树的两个叶片发射率的观测结果。叶片一个为绿色，一个已经变黄，分别测量了两个叶片的正反面。可以看到，绿色与黄色叶片的发射率不同，这可能与叶片的含水量、叶绿素含量有关；绿色或黄色叶片的正面发射率均小于反面，这与叶片的表面结构有关。



是在某一范围内浮动 (Wang等, 2015)。

### 2.2.3 微波辐射与后向散射

根据不同应用，微波常被划分为多个波段，主要包括：L波段 (1—2 GHz)，S波段 (2—4 GHz)，C波段 (4—8 GHz)，X波段 (8—12 GHz)，Ku波段 (12—18 GHz) 和Ka波段 (26—40 GHz)。地物在微波波段的辐射和反射特性受温度、介电特性、表面粗糙度和内部结构的影响，这些特性随频率变化。

地物的介电常数及其结构特征的差异决定了地物的微波辐射在各频段的响应各不相同，可归结为各类地物微波辐射的典型波谱和地物结构特征对微波辐射波谱特征的影响：(1) 以土壤湿度遥感为例。在低频，如L波段，湿润土壤的微波辐射明显高于干燥土壤。随着频率升高，微波的穿透深度减少，对表层土壤湿度的响应更为敏感 (Escorihuela等, 2010)。因此，明确各类地物微波辐射的典型波谱有利于设置遥感频段对目标地物进行有效的观测；(2) 以植被遥感为例，在L波段

和S波段，微波可以穿透植被层，获取地表以下的信息，同时反映植被的生长状态和覆盖度（Bolten等，2003）。较高的频段如X波段和Ku波段则主要对表层植被敏感，可以用于分析植被的细节和结

构变化（Krieger等，2007）。因此，确定地物结构特征尺度对其微波辐射波谱特征的影响是地物遥感需要解决的基本问题。

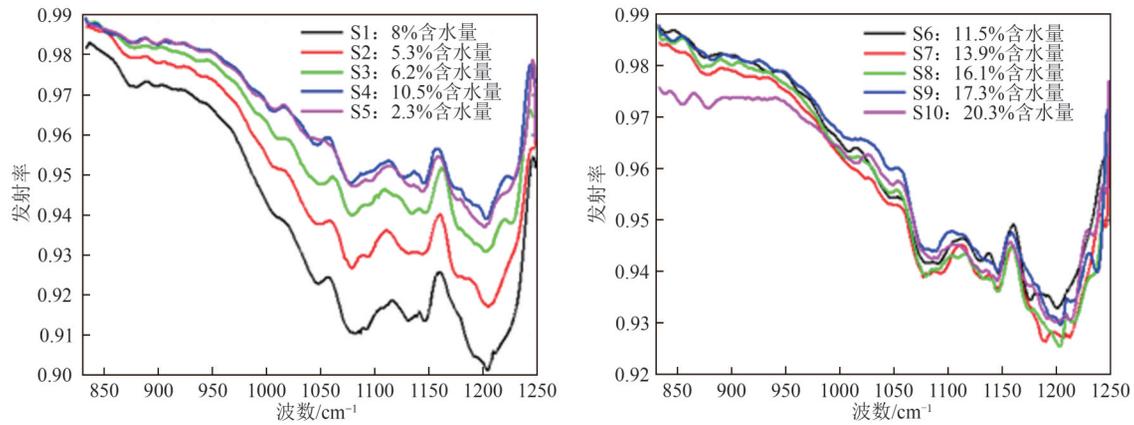


图12 不同含水量下土壤发射率

Fig. 12 Emissivity of soil under different moisture contents

### 2.3 地物时相特性

地物的光谱反射或发射特性通常随时间呈现规律性变化，可用作地物遥感识别或特性反演，这就是地物遥感的时相特性。遥感时相特性反映了地物在不同时间的表现和变化，这些特征往往蕴含着日变化、季节变化、天气变化、生物生长周期、人类活动等不同驱动因子导致的地物组成、结构及其功能变化。时相特性对于研究自然的季节性变化、植被覆盖的生长过程等方面具有重要意义，能够追踪和分析地球上各种动态变化的模式（图13）。航天遥感和航空遥感有不同的时间尺度特征，例如，静止轨道气象卫星以分钟为单位实现短时间的天气观测，陆地卫星以天为单位进行同一地点的重复观测。在不同的时间尺度上，地球表面上的地物不断发生着变化，这些变化中有些是以年计的变化，比如河道和建筑物的变迁；有些是以月、天计的变化，比如植被和农田的生长；有些是以小时、分钟计量的，如静止轨道卫星遥感的云、灾害和植被动态监测等。通过对这些具有多时相特性的地物（如植被、水体等）进行监测和分析，既可以解决遥感应用的诸多问题，也能够提高遥感数据的信息挖掘能力和应用水平。在不同波段区间，地物的时相特性也呈现不同的表现形式。从可见光到微波谱段，不同谱段的时相特性反映了地物在不同能量或频率

范围内的变化规律，对于理解自然现象、环境监测、农业应用以及地质调查等方面具有重要作用。

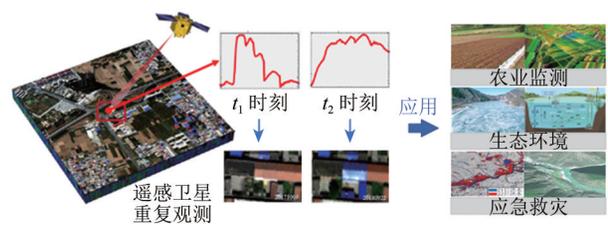


图13 遥感时相特征

Fig. 13 Temporal features in remote sensing

#### 2.3.1 可见—短波红外辐射

在可见光—短波红外谱段，时相特性主要表现为地物反射光谱随时间的变化规律，即伴随着地物组成、状态和环境的变化，其反射光谱特征按小时、天、月、年等不同时间尺度发生变化的规律。这些变化通常受到地物本身属性（如植被的生长、水体的蒸发）以及太阳天顶角等因素动态变化影响。借助时序遥感数据融合方法有利于分析不同地物时序变化规律（Ma等，2018）。下面以植被、水体和冻土3种典型地类为例进行说明。

植被有明显时相特性，图14展示了采集到的多个生长季的生菜和大白菜所反演的多种生化参量和光谱指数，如叶绿素、叶面积指数、氮含量、水分含量、光合有效吸收指数等。当地表植被处

于不同发育阶段时,依据不同波段的反射率不同,可构建各种植被指数,并依据植被指数的变化拐

点来确定表征展叶、叶变色和落叶等物候期。

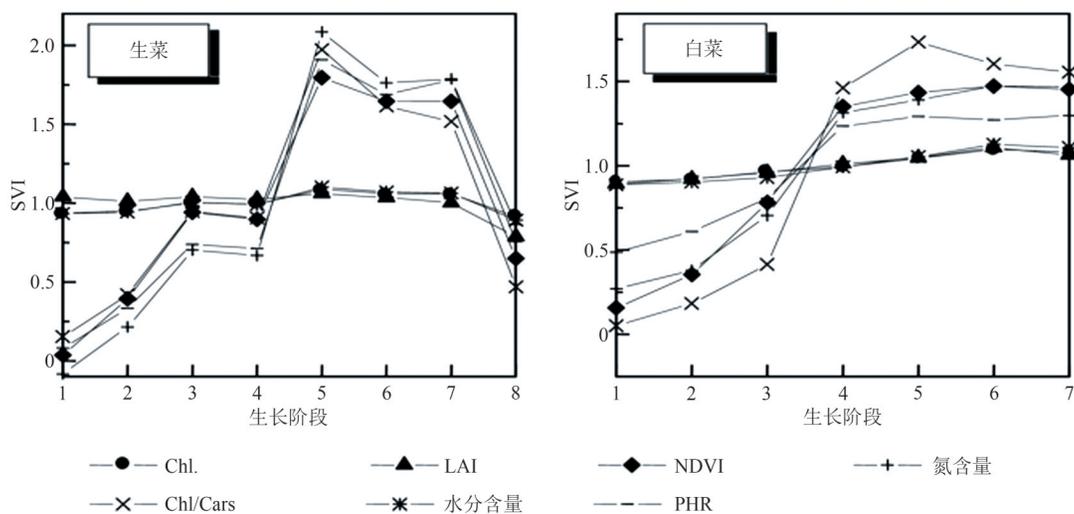


图 14 生菜与中国大白菜的生化参量随生长季的变化

Fig. 14 Changes in biochemical parameters of lettuce and Chinese cabbage throughout the growing season

此外, SIF 时相特性也进一步揭示植被荧光信号随时间的变化规律,即伴随着植被生长状态和环境条件的变化。SIF 信号本身包含辐射、结构和生理信息 (Yang 等, 2023), 其时相特性表现在光照 (PAR) 直接驱动的日变化特性、植被结构 (FAPAR) 直接驱动的季节变化特征以及对环境敏感的荧光生理 ( $\Phi_f$ ) 时相变化特性。

图 15 显示了基于 F-SFM 算法利用 2015 年 4 月 25 日 QEPro 光谱仪观测的北京小汤山冬小麦日变化实验数据反演的全波段 SIF 光谱曲线,结果表明在日尺度上,受到太阳光照变化的影响, SIF 信号表现出午后较高、早晚较低的特点。

图 16 显示了 2022 年张掖大满站春玉米整个生长期近红外 SIF 的变化,在季节尺度上,受到光照和植被冠层结构的影响, SIF 信号呈现出生长高峰期较高、生长前期和末期较低的趋势,与相关文献报道的结果相吻合 (Cogliati 等, 2015; Yang 等, 2015)。

水体的时相特性主要包括水位、水质、水温等要素在不同时间的变化 (Guo 等, 2022)。季节的变化会致使气温、日照时间以及水生动植物的活动发生改变,进而影响到水体的温度、蒸发量和微生物含量,最终使水体的光学特性产生相应变化 (如透明度、浑浊浓度、叶绿素浓度变化等)。例如,太湖梅梁湾夏秋季容易积累大量的藻

类而呈现明显的季节性叶绿素浓度变化规律,即 5—11 月可能出现蓝藻爆发期,而 12 月至次年 4 月蓝藻可能处于休眠期。

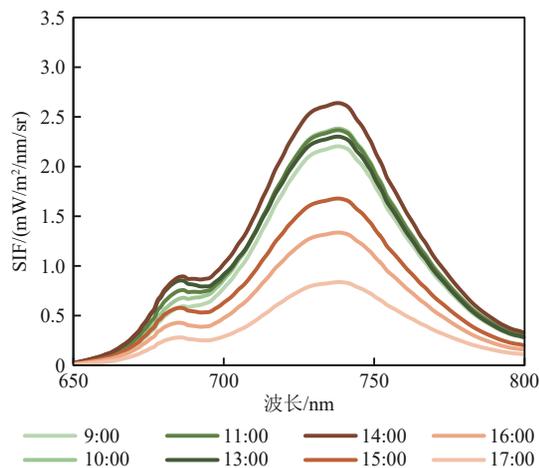


图 15 北京小汤山站 2015 年 4 月 25 日冬小麦日变化全波段 SIF 光谱曲线

Fig. 15 Diurnal variation of SIF spectra of winter wheat at Xiaotangshan site, Beijing, on April 25, 2015

作为冰冻圈的重要组成部分,湖冰是区域乃至全球气候的指示器。湖冰物候,即湖冰冻结/消融的周期性变化,会导致湖面性质的突变,进而影响湖水与大气之间的能量交换。目前全球湖泊整体呈现冻结时间推迟、消融时间提前、冰期缩短、冰厚减薄等趋势性特征。例如,美国中西部、东部和欧洲中部的湖冰受全球变暖的影响,冰期

缩短的趋势显著；青藏高原近160个湖泊的湖冰物候研究显示，气温升高 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 将导致湖泊开始结冰日平均推迟3.9 d，完全融化日平均提前6.9 d，结冰期平均缩短10.8 d（吴艳红等，2022）。

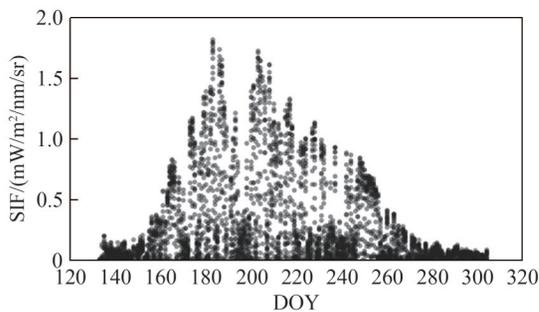


图16 张掖大满站2022年春玉米生长季近红外波段SIF季节变化

Fig. 16 Seasonal variation of NIR SIF of maize in the growing period at Daman site, Zhangye Gansu Province, in 2022

冻土的时相特性主要受到季节变化、气候变化、冻土类型以及土壤成分等因素的影响。随着季节的更替，冻土会经历冻结和融化的过程。冻土在冬季处于冻结状态，由于冰和雪对太阳辐射的反射较强，其反射率通常呈现出较高值。而在夏季，随着气温的升高，冻土部分或全部融化，融化后的液态水和土壤对太阳辐射的吸收作用增强，导致其反射率呈现下降趋势。冻土的反射率还会随太阳高度角的变化表现出日变化特征。因此，冻土的时相变化特征是一个复杂的过程，受到多种因素的共同作用。

### 2.3.2 中长波红外辐射

中长波红外波段时相特性是指在不同时间尺度上，物体红外波段辐射特性随时间的变化规律。这种特性与物体的物理和化学性质、环境条件及时间变化等因素密切相关。红外波段时相特性主要研究物体在特定红外波段内的辐射随时间变化的规律，通常涉及以下几个方面：日变化、季节变化、短期变化和长期变化。日变化是指由于太阳辐射的周期性变化，地表温度在一天内随时间变化，从而导致红外辐射的日变化；季节变化是随着季节的变迁，地表覆盖、土壤湿度等参数发生变化，导致地表温度和红外辐射特性随季节变化；短期变化是指天气变化（如降雨、风速、云层覆盖）等引起的地表温度和红外辐射的快速变化；长期变化则是在长期过程中，由于气候变化、

土地覆盖变化或生态系统演替等长期过程导致的地表温度和红外辐射特性变化。红外波段地物日变化和季节变化的典型表现如下。

在日变化特征方面，例如人工建筑、岩石和裸土等目标由于热惯量小，吸收太阳辐射升温快，日夜温差大，在正午前后相对于其他地物表现为高温目标，热红外辐射最强，而在夜间特别是凌晨时分表现为低温，热红外辐射最弱；水体、湿地等由于热惯量大，日温差小，白天特别是正午前后相对于其他地物表现为低温，热红外辐射最弱，而在夜间特别是凌晨时分表现为相对高温，热红外辐射最强；农田、森林、草地等目标，热惯量居中，加上植被的蒸腾调节作用，日温差居中。总体而言，中午前后的热红外遥感图像地物差异显著，夜间特别是凌晨热红外遥感图像地物差异最小。

在季相变化特征方面，北半球在夏季表现为高温，热红外辐射强，在冬季表现为低温，热红外辐射弱；而南半球则相反。此外，由于四季变化导致全球植被生长具有明显的季相特征，随着植被生长物候的变化，植被覆盖度和植被叶面积指数不断变化，呈现出裸土—稀疏植被—浓密植被的周期性变化，由于植被与土壤热红外特征具有较大的差异，使得热红外遥感图像也表现出不同的时相变化特征。如落叶森林进入秋冬季后，由于太阳辐射减弱，地表温度降低，森林的红外辐射会随之降低；同时由于落叶，发射率高的叶片占比减小，地表发射率也会随之降低，导致落叶森林发出的红外辐射进一步减小（Bian等，2021a）。

热辐射大小主要受温度和发射率影响。在热辐射日变化过程中，由于发射率在短时间内通常变化不大，热辐射主要取决于温度的变化。随着太阳辐射的强度变化，地物的表面温度在一天中呈现周期性变化，物体温度的高低直接决定了热辐射的强弱。在季相变化中，由于太阳入射角度改变辐射强度变化，地表接受能量随之改变，地表平均温度的变化直接影响热辐射大小。因此，在热辐射建模和应用中，不仅仅是辐射传输的研究范畴，还会与能量平衡过程等相结合，需要先后模拟温度的分布和地物温度到卫星传感器接收的过程（Bian等，2017，2018；Van Der Tol等，2009）。正是由于地表温度的时相变化特征，在进

行热辐射观测数据处理时, 需要选择日变化模型或者随时间变化的气象参数来辅助进行连续时间遥感观测的数据融合工作 (Qin 等, 2023)。

同时, 由于地表地物成分和占比 (如叶片多少、叶绿素含量、下垫面类型、土壤水分) 的季节变化, 地表发射率的变化也会对热辐射产生影响。例如温带夏季植被较为茂密, 植被像元在夏季呈现出较大的发射率 (通常叶片发射率高于土壤发射率), 而在冬季叶片凋零, 像元发射率会变小。此外, 在冬季降雪过后, 土壤背景被冰雪背景替代, 发射率也会增加。在卫星尺度上, 像元发射率通常基于分类数据或植被指数确定。分类赋值法通常基于地表分类系统中不同地物类别, 利用实验室实测的发射率波谱, 将不同类别的地表赋予相应的发射率基于植被指数的方法通常利用例如归一化植被指数等参数估算发射率, 建立其与发射率的线性关系 (Li 等, 2014; 2019)。

### 2.2.3 微波辐射与后向散射

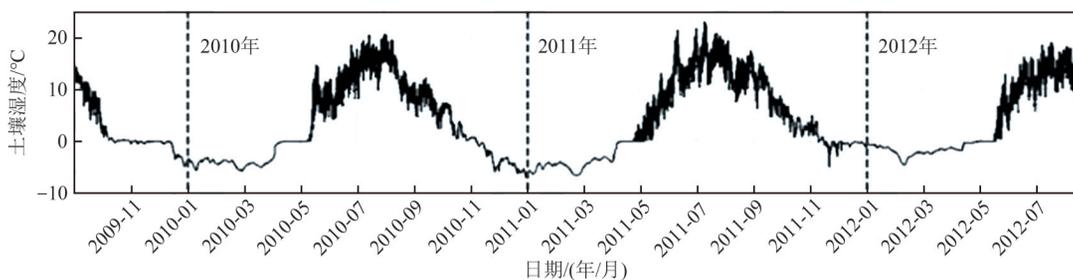
随着时间的变化, 有些地物的温度、介电常数、湿度、几何形态和性质等也会发生改变, 而这种改变会影响微波的反射和辐射特性即微波遥感的时相特征, 从而能被微波遥感手段识别这种变化信息。地物含水量随时间发生自然或者人为变化在微波谱段呈现显著时相特性, 以土壤、作

物、地表冻融为例说明。

土壤湿度水平会随着降水、灌溉和蒸发而变化。湿土壤具有较高的介电常数, 导致微波反射增加和透射减少。当土壤湿度增加时, 反射的微波信号变得更强, 而当土壤变干时, 反射信号减弱。通过定期监测这些变化, 可以绘制出土壤湿度随时间变化, 可以精确跟踪土壤湿度水平, 为农业和水文研究提供关键信息 (Lakhankar 等, 2009)。

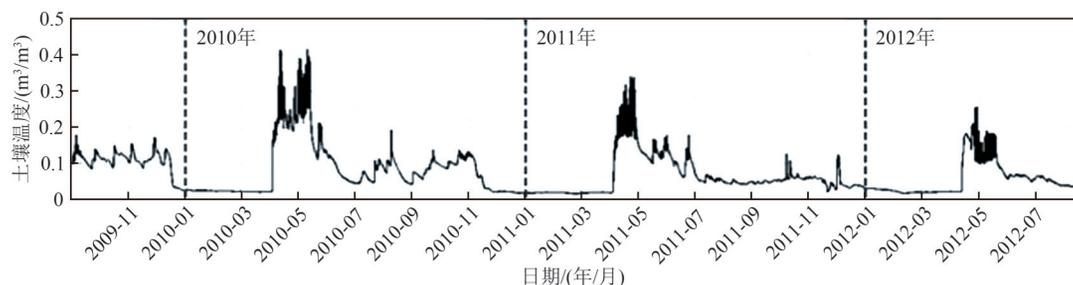
植被的微波反射和发射特性会随生长阶段和季节而变化。年轻作物的反射率较低, 而成熟作物的冠层结构和水分含量增加, 会增强微波的散射和吸收。在不同生长阶段, 微波后向散射特性的变化可以用于评估作物的成熟状态和健康状况 (Lasko 等, 2018)。

在季节性温度变化显著的地区, 地表会经历冻融循环。冻土和融土的微波发射特性有显著差异。由于冰的介电常数低于水, 冻土的发射较低。通过监测这些时间上的变化, 可以绘制冻结和解冻的范围和持续时间, 这对于气候研究、基础设施管理和生态系统动态研究非常有用。如图 17 和图 18, 分别显示了土壤温度, 湿度, 空气温度, 土壤积雪和霜冻深度 3 年的变化以及对应利用 L 波段微波辐射计观测到的亮温和极化差异随时间变化的过程 (Rautiainen 等, 2014)。



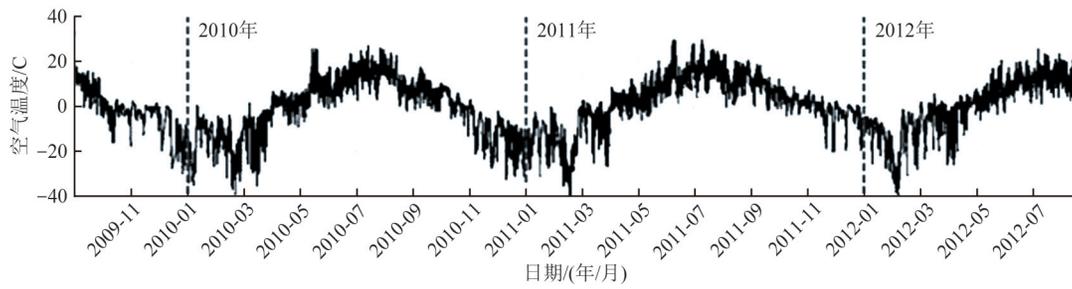
(a) 2 cm 深度处的土壤温度

(a) Soil temperature at 2 cm depth

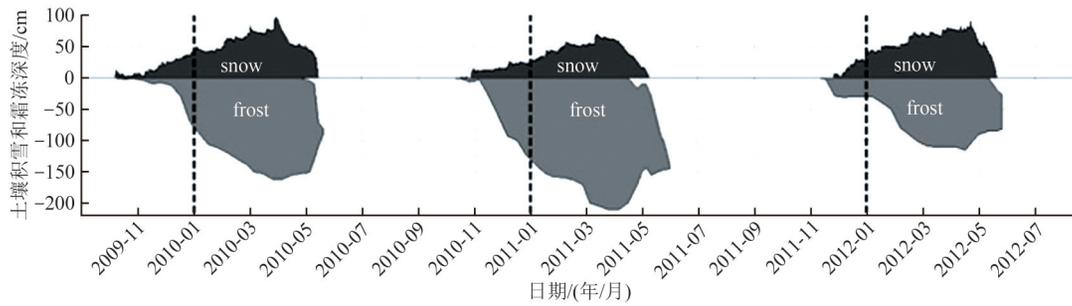


(b) 土壤湿度 (传感器在 2 cm 和 10 cm 深度处的平均值)

(b) Soil moisture (Average of sensors at 2 and 10 cm depths)



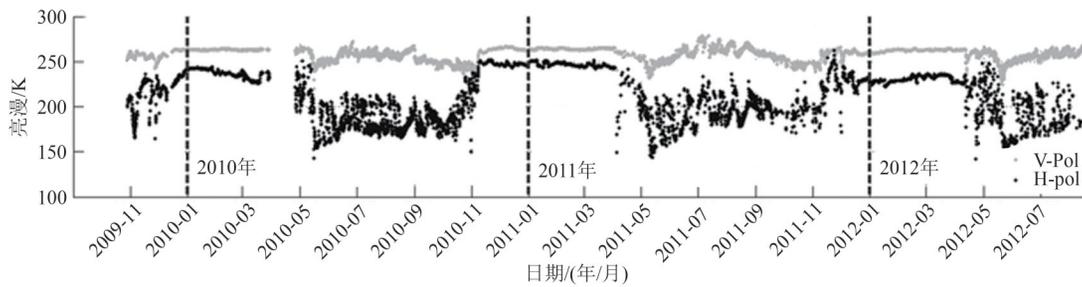
(c) 地面以上 2 m 处的空气温度  
(c) Air temperature 2 m above ground



(d) 露天区域的积雪和土壤霜冻深度  
(d) Snow and soil frost depth in open area

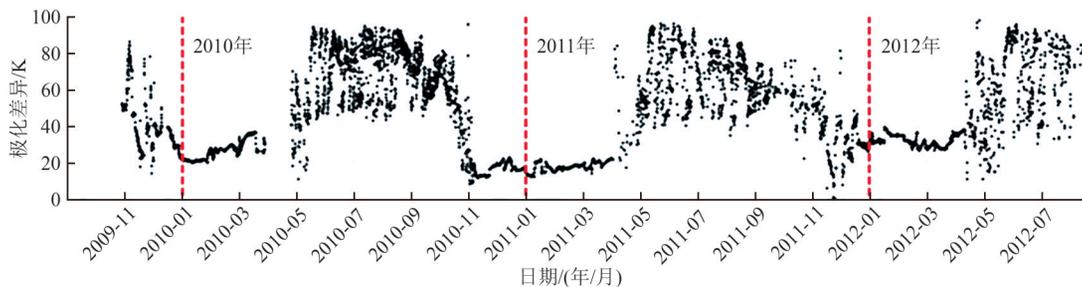
图 17 芬兰 Sodankylä 试验场土壤温度,湿度,空气温度,土壤积雪和霜冻深度 3 年变化

Fig. 17 Three-year changes in soil temperature, humidity, air temperature, soil snow cover and frost depth at the Sodankylä test site in Finland



(a) ELBARA-II 亮度温度 TB (灰色—垂直极化, 黑色—水平极化)

(a) ELBARA-II brightness temperature TB (gray—vertical polarization, black—horizontal polarization)



(b) ELBARA-II 的极化差异 (观测于 2009 年 10 月开始, 于 2012 年 8 月结束, 观测角度为 60°)。

(b) ELBARA-II polarization difference (Observations started in October 2009 and ended in August 2012 with the observation angle of 60°)

图 18 芬兰 Sodankylä 试验场 ELBARA-II 辐射计亮温以及极化差异观测 3 年时间序列

Fig. 18 Three-year time series of brightness temperature and polarization difference observations by the ELBARA-II radiometer at the Sodankylä test site in Finland

结果表明：随着土壤的冻结，观测到的亮温逐渐升高到某个饱和度，保持稳定至融雪开始；水平极化亮温随时间变化比垂直极化大，夏季极化差异明显大于冬季。另外积雪和冰层的密度、温度和含水量会随时间变化，这会影响微波的发射特性。随着时间推移，这些变化可以用于监测季节性积雪覆盖 (Dai 等, 2017)、冰川动态、海冰范围 (Sandven 等, 1993)，对于气候研究和水资源管理至关重要。

### 3 地物的5大遥感效应

#### 3.1 尺度效应

尺度效应一般是指在同等成像条件下由于空间分辨率或点扫描密度不同导致的地物遥感特性

和参量的变化。尺度效应是地理空间数据分析中的重要概念，旨在探究不同尺度下地表特征的变化规律，以及这种变化对遥感信息提取结果的影响。不同地表类型在不同尺度下通常会呈现出多样的空间模式和空间结构。一般来说，由低分辨率到高分辨率的尺度转换为降尺度，由高分辨率到低分辨率的尺度转换称为升尺度 (Liang, 2005)，相关原理如图 19 所示 (Markham 等, 2023)。以水文遥感研究为例，小尺度的水文研究可能主要集中在植被和土壤的尺度上 (Shi 等, 2012; Konings 等, 2019)；中尺度研究可能侧重于水文单元对地表变化的响应 (Zhang 和 Jia, 2013)；而大尺度的研究可能主要是关于大气和地表的相互作用 (Noilhan 等, 1995; Yang 等, 2022)。

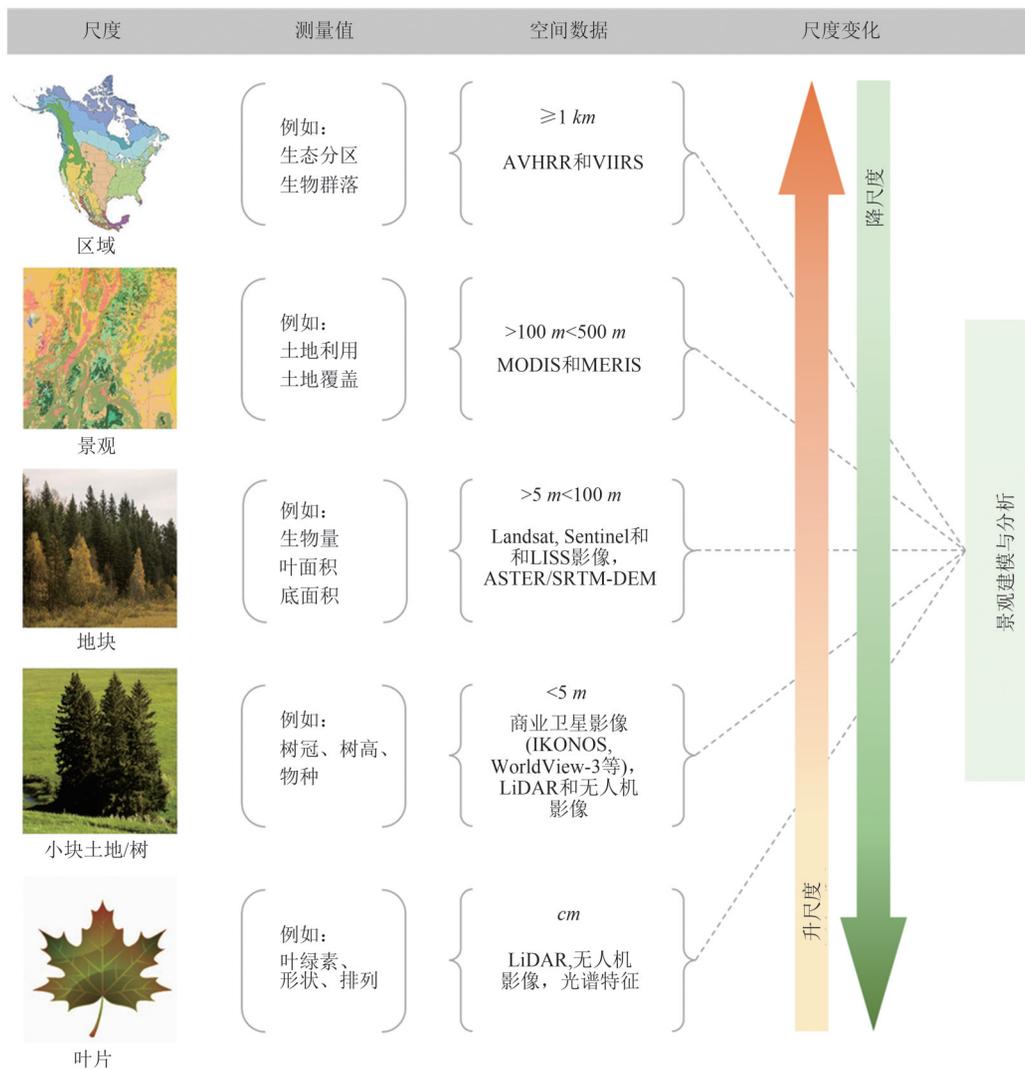


图 19 升尺度和降尺度的原理图

Fig. 19 Schematic diagram for upscaling and downscaling

电磁波受自身特性、地物特性、大气条件等多种因素共同作用, 尺度效应在可见—短波红外波段、热红外波段、激光波段和微波波段通常表现出不同特点。例如, 地表反射率在不同尺度下表现出不同的统计特征, 而热红外波段则在不同尺度下表现为地物温度分布的差异性。

广义上讲, 尺度效应是地理现象或地理实体无法消除、无可避免的本质特征。定量遥感的尺度效应源于地表空间异质性, 主要体现在地物空间结构、地物本身辐射特性、像元内部组分等差异特性。空间异质性可借助高分辨率遥感影像并采用地统计学的理论和方法进行分析。尺度差异的存在会影响真实性检验的结果。当存在尺度效应时, 在不同尺度上获得的数据和观测结果可能会有较大差异。如果在进行真实性检验时没有充分考虑这种尺度差异, 可能会导致对模型、数据或分析结果的错误评估。

因此, 尺度效应在地物遥感的分析、解译和应用中都需要仔细分析。

### 3.1.1 可见—短波红外辐射

在可见—短波红外区间, 尺度效应是指同一地区、同一时间、同一观测几何、同一谱段的遥感数据因传感器成像空间分辨率不同而存在明显的图像结构和辐射信息值差异 (图 20)。地物遥感的尺度效应主要包含分辨率尺度效应、生态尺度效应和信息尺度效应这 3 个方面。

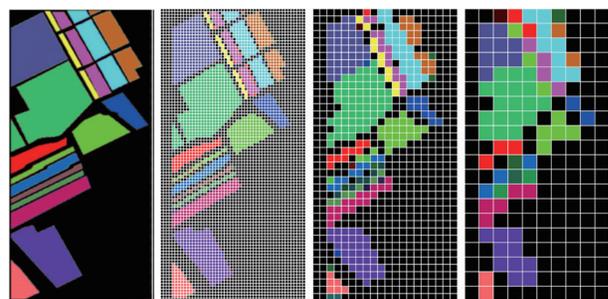


图 20 不同尺度效应下图像纹理细节与辐射信息变化示意图

Fig. 20 Schematic diagram of changes in image texture details and radiometric information under different scale effects

(1) 分辨率尺度效应: 分辨率尺度效应是指不同空间分辨率的遥感影像对同一地物会呈现出不同的细节特征。例如, 高分辨率遥感图像能够清晰显示出小尺度地物的细节, 准确识别不同地物类型的个体形态, 但可能忽略较大尺度的地物

分布模式; 而低分辨率遥感影像恰恰相反, 更适合从宏观上把握地物的整体发展趋势和分布范围。随着分辨率尺度的变化, 同一地物的特征和表现会存在差异。小尺度观测区域能够看到较复杂纹理的地物特征, 而在大尺度观测区域可能表现为该地物呈现较均质的空间分布。从入射光的辐射传输角度来看, 线性混合和非线性混合通常与分辨率尺度效应有关。当具有不同波谱属性的地物出现在同一像元内时, 就会出现混合像元 (韩竹等, 2020; 苏远超等, 2024)。从辐射传输角度, 可以将水平维混合像元划分为线性混合和非线性混合。线性混合表示各亚像元之间不存在交叉辐射或交叉辐射能相互抵消; 非线性混合表示各亚像元之间不存在交叉辐射且不能相互抵消, 如光线相互遮挡现象 (刘良云, 2021)。如图 21 所示, 宏观尺度条件下光谱混合可以被认为是一种线性混合, 而微观尺度条件的混合像元则被认为是一种非线性混合。

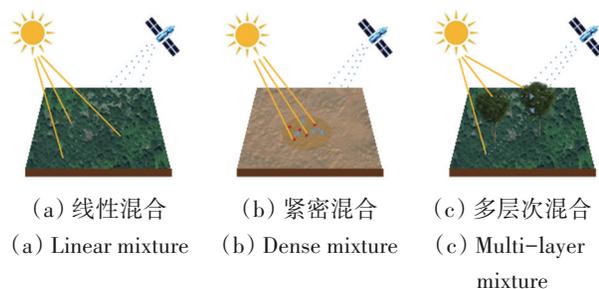


图 21 光谱混合机制示意图

Fig. 21 Schematic diagram of spectral mixing principle

(2) 生态尺度效应: 尺度效应既是遥感科学的关键问题, 也是景观生态学的基础理论与重要指导原则。在不同的生态尺度上, 地物之间的相互关系和生态过程的表现也不同。较小尺度可能更关注个体地物的生态特征, 而较大尺度更侧重于群落或生态系统层面的动态。例如在斑块水平上, 很多研究证实了斑块面积、斑块形状等属性特征对栖息于斑块内的植物和动物多样性有重要影响, 而对边缘物种和内部物种的影响差别显著。在景观水平上, 景观基质、组成和构型异质性对物种多样性的影响具有较强的尺度依赖性, 为今后生态多样性的保护提供理论依据。

(3) 信息尺度效应: 在进行地物信息提取时, 尺度的选择会影响遥感图像信息提取的准确性和完整性。不合适的尺度可能会导致信息缺失或错

误解。由于地表特征在不同尺度下的变异性，需要选择合适的尺度来进行遥感信息提取，以获得准确的结果。此外，尺度效应的研究可以为遥感数据的融合和模拟提供指导。

SIF是一种产生于植被光系统的辐射信号，此时土壤相当于暗背景，因此SIF信号不存在反射信号中线性混合像元的尺度效应。然而，需要特别注意SIF信号在冠层尺度和光系统尺度的差异。在冠层尺度，近红外SIF在总荧光中占比较大；在光系统尺度，红光SIF占据主导地位。SIF是由植被叶绿素分子内的光系统发射的，由于叶片和冠层对荧光信号的散射和再次吸收作用，传感器在冠层尺度观测到的荧光信号只是光系统尺度荧光总量的一部分。因此，为了更好地理解SIF与植被光合生产力之间的关系，需要消除荧光方向球面度 (sr) 量纲，定量估算荧光逃逸概率 ( $f_{esc}$ )，将冠层水平的方向性荧光降尺度到光系统水平的总荧光 (图22)。目前，一些研究已经实现了近红外波段 (Yang等, 2018; Liu等, 2019; Zeng等, 2019; Qi等, 2023; Zhang等, 2023) 和红光波段 (Liu等, 2020; Wu等, 2024) SIF的降尺度工作。

激光雷达的尺度效应是指在不同的空间采样或分辨率下，激光雷达对同一目标的成像存在细节层次上的差异。由于激光雷达的采样密度、分辨率、测量范围等参数的变化，目标的特征信息随着空间尺度的不同而表现出不同的细节层次，

甚至会在不同空间采样下导致对目标解译产生偏差。简而言之，尺度效应反映了随着空间采样的变化，同一对象在激光雷达测量中的表现或被捕捉的信息量也会发生变化。

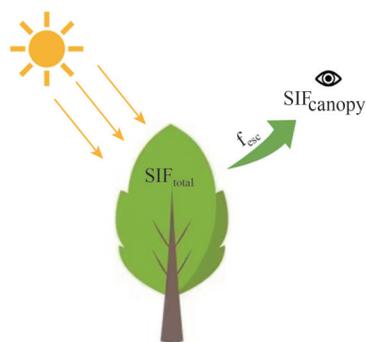


图22 冠层顶部荧光( $SIF_{canopy}$ )与光系统发射总荧光( $SIF_{total}$ )的尺度差异

Fig. 22 Scaling relationship between canopy level SIF ( $SIF_{canopy}$ ) and total photosystem level SIF ( $SIF_{total}$ )

激光雷达常需要与GNSS定位、惯性导航等集成，搭载在一定的运动平台上（如航空平台）可快速获取场景内目标表面的三维密集点云。受激光发射频率、探测方式、探测距离、工作模式（图23）以及载荷平台的运动速度/飞行高度等影响，场景内地物目标表面的点密度、空间分布、点的大小等存在明显不同，进而导致场景内地物目标三维成像的分辨率和精度均存在显著差别。

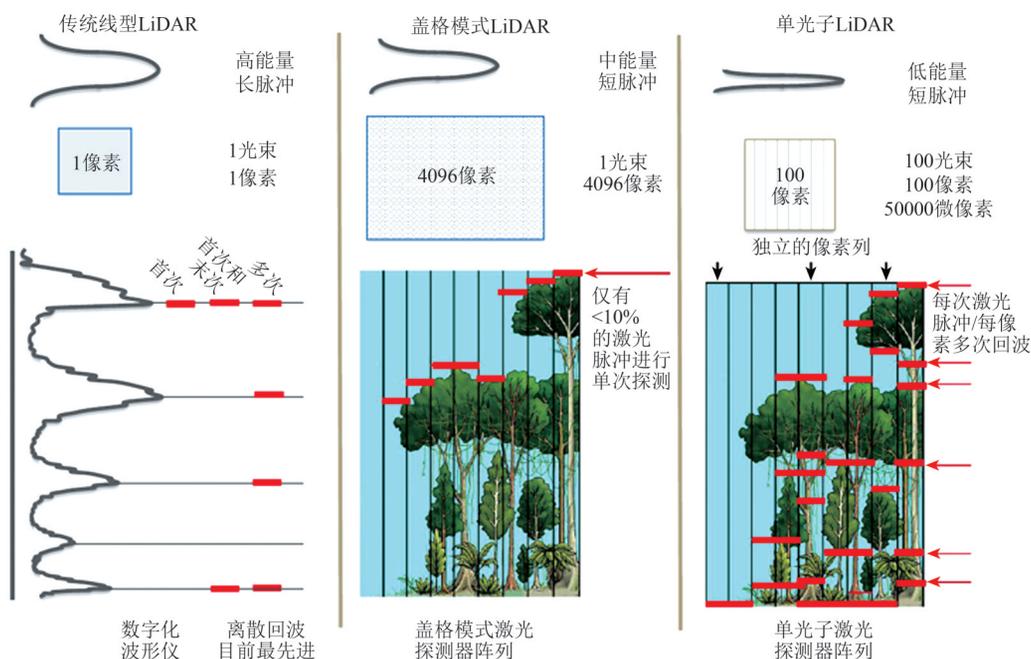


图23 不同激光雷达扫描模式带来的地物观测粒度差异

Fig. 23 Differences in observation granularity of ground features brought by various LiDAR scanning modes

激光雷达的尺度效应主要特点与影响主要有以下几个方面:

(1) 空间分辨率依赖性。激光雷达的尺度效应直接与其空间分辨率相关。不同空间采样下, 目标的实际大小在激光雷达数据中的表现不同。对于小尺度(精细分辨率)目标, 激光雷达可以捕捉到较小的特征, 而在大尺度(粗分辨率)下, 小目标可能无法被清晰检测或甚至被忽略。

(2) 特征信息的变化。不同空间采样下, 激光雷达所捕获的特征信息可能发生变化。例如, 调整不同激光雷达光斑大小, 可以带来不同的地物特征捕获能力, 使用较宽的光斑, 可以获得更多的反射特征, 有利于低空激光数据采集, 增加地上地物覆盖面积且提升对细小结构(如杆、输电导线)的点云采集能力。使用较窄的光斑则可以获得更好的激光植被穿透能力, 有更高的空间分辨率和平面精度(图24)。

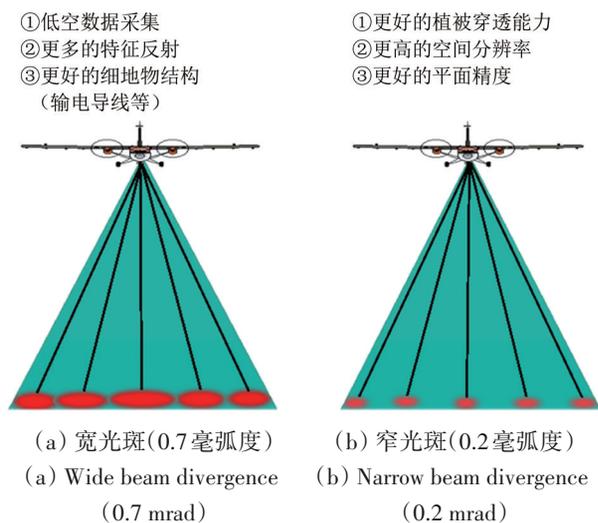


图24 不同激光雷达光斑大小带来的地物特征捕获能力差异

Fig. 24 Differences in ground object feature capture capabilities under varying LiDAR spot sizes

这些特点表明, 激光雷达的尺度效应是一个多维现象, 需要根据应用场景和目标特征选择适当的空间尺度进行测量和分析。由于单一尺度的数据可能无法全面覆盖不同应用场景的需求, 因此在实际应用中, 常常需要融合多尺度的激光雷达数据。例如, 粗尺度数据用于大范围场景的快速重建, 而细尺度数据则用于局部的精细分析或关键区域的高精度建模。

### 3.1.2 中长波红外辐射

中长波红外的尺度效应是指在中长波红外波段中, 由于观测尺度、物体尺寸及其表面结构等因素的变化, 导致红外辐射特性发生变化的现象。尺度效应在传感器空间分辨率、几何关系和温度、发射率关系中具有重要影响, 特别是在多尺度观测时, 对数据解释和应用至关重要。

在不同空间分辨率下, 红外波段的尺度效应会显著影响发射率和温度的观测结果: 高空间分辨率提供了更细致的发射率和温度信息, 可以准确捕捉地物表面的局部异质性和微小变化, 但也对数据处理和分析提出了更高的要求。低空间分辨率下, 地物的细节被混合, 导致发射率和温度的空间分辨率降低, 可能掩盖局部的差异和细节, 对大尺度趋势和区域总体特征的评估更为适合。理解这些尺度效应对于遥感数据分析、环境监测和科学研究具有重要意义。尺度效应可能导致数据误差, 例如, 在低分辨率下, 地物的异质性可能被低估。考虑尺度效应能够帮助识别和校正这些误差, 提升数据的质量。不同的研究目标和应用需求可能需要不同的空间分辨率。理解尺度效应可以帮助选择最合适的分辨率, 以实现最佳的数据处理和数据分析效果。在地球科学、环境科学和遥感领域, 许多问题需要跨尺度的综合分析。尺度效应的研究能够促进不同学科和领域之间的协作, 推动跨学科研究的深入发展(李小文和王祎婷, 2013)。

高空间分辨率使传感器能够捕捉到更加精细的地物温度信息, 从而对地表细节提供更为精确的描绘。例如, 高分辨率观测能够刻画不同类型的植被、建筑物或其他地表元素的红外辐射特性, 呈现更为细致的热辐射分布。然而, 当空间分辨率较低时, 不同地物的红外辐射会在一个像元内混合。由于各地物的热辐射特性不同, 使得低分辨率观测到的是平均化或模糊化的辐射特性, 无法如高分辨率观测那样精确地反映各地物的特征。然而, 低分辨率的优势在于它更适合用于局地或大区域的热环境变化分析。综上, 低分辨率下的红外辐射特性与高分辨率观测结果可能存在显著差异(Savtchenko等, 2004; Yamaguchi等, 1998)。

在较大观测尺度下, 多个不同类型的地物可能被一个像元覆盖, 导致观测到的红外辐射是多

种地物辐射特性的综合表现。这种混合效应使得红外辐射特性不再单纯依赖于单一地物的性质，而是受内在地物比例及其空间分布的影响。对于一般性地表，通常兼具规律性和异质性特征，现有的理论多是在中等分辨率条件下开展，重点考虑地表的规律性特征。忽略异质性的影响，假设地物之间的几何关系遵循某种空间分布规律，通常可以通过几何光学模型进行数学刻画，是目前建模、反演和应用的主流。然而，当分辨率升高或者降低都将导致现有的理论失效或者部分失效：(1) 随着空间分辨率的提升，地表的规律性特征相对减弱，而异质性特征逐渐显现，随着观测的分辨率变小，其可能仅覆盖单个树冠或建筑的一部分，不再满足个体的空间分布规律，在这种情况下，需要三维模型参与考虑复杂结构的影响 (Bian 等, 2021b)。这种几何尺度的变化，通常可以通过半变异函数进行判定；(2) 当空间分辨率降低，混合像元将变得更复杂，特别是由于地形起伏和城市建筑的影响，会出现宏观地表与微观地物共存情况，简单的规律也难以满足模型和应用的需要，在适用性和应用上进行几何重定义，例如利用“分形”的思想，在不同的尺度上分别进行几何光学推定，架设不同尺度地物同步模拟的桥梁 (图 25)。

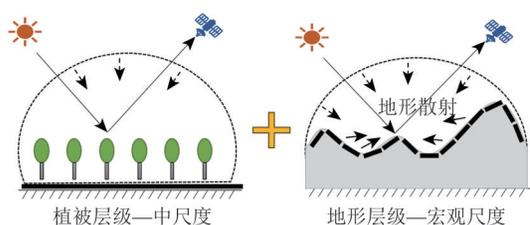


图 25 植被尺度和地形尺度的分形耦合

Fig. 25 Fractal coupling at vegetation and terrain scales

热红外遥感的空间尺度效应主要是由于地表非同温以及三维结构导致的，遥感像元的等效温度和等效发射率不能简单定义像元内各组分温度和各组分发射率的面积加权和。

地表温度由热辐射作用决定，在进行尺度转换时，直接对温度升降尺度忽视了辐射传输过程的非线性关系，而从能量角度处理则能更准确表征地物和环境之间的辐射传输过程。升尺度时，需要将高分辨率下的地物能量分布进行空间整合，加权不同地物的能量贡献来估算较大尺度下的综

合辐射能量。而降尺度则要求将低分辨率的能量分布合理拆分成细粒度的能量贡献，这可以结合植被指数等辅助信息来推断不同高分辨率像元的能量分配情况。能量闭合问题是尺度转换中的关键问题，不同尺度下能量传输路径和比例可能不同，导致尺度转换时能量平衡难以完全闭合。因此，模型中需要引入能量闭合修正机制，确保不同尺度下辐射总量保持一致 (Kustas 等, 2003)。

由于普朗克公式的非线性特征，如果把非同温混合像元的等效发射率定义为像元内各组分发射率的面积加权和，仅仅由各组分的发射率决定，而与温差分布无关，则会出现非同温像元等效温度与波长和观测方向有关的悖论。李小文等重新定义了地表非同温混合像元的发射率，引入由于温差引起的“发射率视在增量”的概念，提出了非同温地表发射率的概念模型，对非同温地表热辐射进行了尺度效应纠正 (Li 等, 1999)。更一般而言，对于具有地表三维结构的非同温像元，如果忽略像元内表面温差及其分布，将其视作同温像元，把等效发射率定义为组分发射率的面积加权和，则不能解释非同温像元由于温差产生的热红外辐射波谱变化和方向性，以至于出现普朗克函数中的真实温度是一个随方向和波长变化的变量。李小文等将非同温三维结构像元的热辐射分解为同温同结构的多次散射方向性与温度差异导致的增量辐射的叠加，进一步解释了非同温三维结构像元的尺度效应，并提出了非同温三维结构地表热辐射公式的尺度效应纠正方法。

### 3.1.3 微波辐射与后向散射

在微波遥感中，尺度效应涉及到传感器如何根据空间分辨率和所观测地表特征的空间变异性来捕捉地表信息 (Marceau 和 Hay, 1999)。空间分辨率决定了微波传感器能够区分的最小地表单元尺寸，直接影响对地表特征的认识，这对于解释地表特征 (如土壤湿度、植被类型和地形等) 至关重要。

一般情况下，被动微波遥感空间分辨率较低，而主动微波遥感如合成孔径雷达 (SAR) 利用雷达信号的相位信息来产生高分辨率的图像，其空间分辨率取决于天线的长度和雷达波束的宽度，可以通过以下公式近似计算：

$$R_{\text{range}} = \frac{c}{2B} \quad (6)$$

$$R_{\text{azimuth}} = \frac{\lambda R}{2L} \quad (7)$$

式中,  $R_{\text{range}}$  是距离向分辨率,  $R_{\text{azimuth}}$  是方位向分辨率,  $c$  是光速,  $B$  是雷达系统的带宽,  $\lambda$  是雷达波长,  $R$  是雷达到目标地物的距离,  $L$  是合成孔径的长度。

低分辨率微波数据通常覆盖范围较大, 数据简单易获取, 而高分辨率微波数据覆盖范围相对较小, 且数据量大, 处理复杂, 大尺度和小尺度研究同样重要, 选择与环境分析的具体目标和方法相符的微波遥感数据十分必要 (Woodcock 等, 1987)。

微波遥感的尺度效应直接影响对地物目标的探测。低分辨率的微波数据通常描述抽象特征或宏观结构, 可用于了解宏观变化, 但可能导致小尺度地表特征的细节信息丢失; 高分辨率的微波数据能够在地表连续覆盖信息中提供更精细的地物特征信息和空间分布特征, 从而捕获其异质性 (Wu 等, 2019), 进而用于研究宏观变化过程发展的机制并给出合理的解释。例如: 在海洋观测中, SAR 能够识别出小尺度的海洋现象 (如亚中尺度涡流 (Zi 等, 2024) 或海浪), 提供丰富的几何和形态信息 (如洋流和波浪结构), 而低分辨率图像只能提供大尺度现象的平均值, 可能会掩盖掉一些细节。

### 3.2 大气效应

大气效应是指遥感成像过程中电磁波受到各类大气粒子吸收、散射和发射的影响, 造成图像信息发生辐射畸变的现象。大气粒子涵盖不同尺度的粒子类型, 包括大气分子、气溶胶、云粒子、冰雹等。它们在大气中分布广泛, 并通过各种物理和化学过程影响气候、天气和空气质量。大气中的不同粒子在不同波段上对光的吸收和散射特性各不相同, 对于遥感探测和分析大气组成及其变化具有重要意义。对于大气分子而言, 在紫外波段氧气和臭氧表现出强吸收能力; 在可见光波段对不同波长散射能力不同, 可用于推测颗粒物浓度和大小; 在红外波段水汽和二氧化碳具有强吸收能力, 可用于监测其分布和浓度, 图 26 展示了从紫外到热红外波段大气分子对太阳辐射以及地表自身红外发射的吸收情况 (张兵等, 2020b); 对于气溶胶而言, 在紫外和可见光波段具有较强

的散射能力, 在近红外波段的散射能力通常较低。通过测量气溶胶在不同波长下的散射或吸收特性, 可以更准确地反演其物理化学特性 (Zhang 等, 2013); 对于降水粒子而言, 其探测依赖于电磁波在不同波段上的散射和吸收特性, 包括微波、红外和可见光波段。其中, 微波波段适用于探测不同尺度的降水粒子, 红外波段云顶温度推断降水可能性, 可见光波段观察云结构和运动, 分析反反射率识别降水云团。

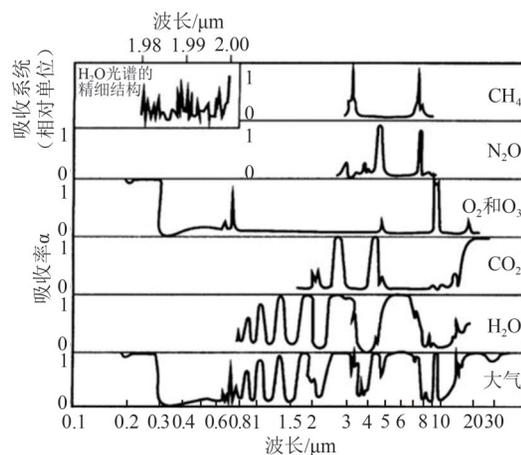


图 26 紫外—热红外波段主要大气分子吸收情况  
Fig. 26 Absorption of major atmospheric molecules in UV-thermal infrared bands

无论是主动遥感还是被动遥感, 大气中的气溶胶、水汽、臭氧、二氧化碳、云等都对辐射信号产生散射和吸收效应, 一方面可以利用这些效应本身反演对应大气成分, 另一方面需要通过辐射传输计算来消除这些效应的影响恢复地表真实辐射信号。由于光谱波段不同, 不同大气成分产生的大气效应也表现出不同特征。其中, 激光遥感进行远距离探测目标时大气效应会影响地物目标三维成像的质量和精度, 但在机载激光雷达扫描方面, 大气因素对地物目标几何特性的获取方面几乎没有影响。因此, 以下重点论述大气效应在可见—短波红外、中长波红外以及微波区域的特点。

#### 3.2.1 可见—短波红外辐射

可见—短波红外光谱区间, 大气对地物的反射辐射信号产生显著影响, 表现为云粒子散射与吸收效应、气溶胶散射与吸收效应、水汽、臭氧等气体分子的散射和吸收效应等, 总体效应取决

于大气传输路径长度、电磁辐射能量强弱、大气条件以及波长等(赵英时, 2003)。

气体分子吸收效应主要是臭氧和水汽在某些波长的选择性吸收, 气溶胶吸收效应没有明显的波长选择性, 多光谱传感器设计时往往会避开明显的大气吸收波长区域, 在吸收较弱的波段区间(称为“大气窗口”)设置若干波段; 在散射效应方面, 气体分子直径远小于电磁波波长, 表现为近似各向同性的瑞利散射(散射强度随波长的负四次方变化), 气溶胶粒子大小接近入射波长(散射强度随波长变化但大于负四次方), 表现为前向散射主导的米散射, 云、雾、水滴等大粒子尺寸远超过入射波长, 表现为与波长无关的无选择性散射。

从应用角度看, 大气吸收和散射效应在遥感图像不同波段的差异性能用于反演大气各类组分, 比如气溶胶反演、痕迹气体反演、云特性反演等, 这些属于大气遥感重点关注的研究领域。在此基础上, 消除大气吸收和散射效应得到地表真实反射率的过程属于陆表遥感重点关注的研究方向。尽管这两个研究领域均涉及辐射传输过程, 但关注对象不同, 在传感器成像特性设计和数据处理方法上也呈现不同特点。

大气吸收和散射效应在不同波段的差异性为反演大气各类组分提供了重要依据。通过分析不同波长的电磁辐射在大气中的强度变化, 可以有效提取气溶胶、痕迹气体和云特性等信息。首先, 气溶胶粒子的敏感波段通常在深蓝至可见光波段, 可用于反演气溶胶特性参数, 如光学厚度、粒径分布和浓度等特性; 其次, 痕迹气体的反演主要依赖于其在红外波段的吸收特性, 水汽、二氧化碳等气体在特定波长范围内对红外光有显著吸收, 可用于监测大气中水汽和温室气体的分布和浓度; 最后, 云特性反演则涉及到云粒子的散射和吸收特性, 对理解大气物理过程和改善天气预报、气候模型至关重要。以水云和冰云为例, 前者对不同波长电磁辐射的散射和吸收特性与云中液态水滴的粒径分布、粒子数浓度和空间分布密切相关, 可采用近红外波段(0.7—3.0  $\mu\text{m}$ )对云粒子大小和相态(液态或冰态)的高敏感性特性进行参数反演; 后者倾向于散射较短波长的光(如蓝光)而吸收较长波长的光(如红光和红外光), 其形状

和结构(如柱状、板状或复杂形状的聚合物)影响其散射和吸收特性。目前关于冰晶散射研究已经从早期的球形散射模型走向了不同尺度参数非球形冰晶散射模型, 例如, 新构建的Voronoi冰晶散射模型已经应用于POLDER数据, 并被Himawari-8(葵花-8)、GCOM-C及预计2024年发射的欧空局EarthCARE卫星官方云产品采纳(Letu等, 2022, 2023)。利用可见光至短波红外波段进行大气成分反演是一个具有广阔前景的研究领域, 未来随着技术的进步和数据融合方法的改进, 将能够更好地理解大气成分的变化及其对气候系统的影响。

在地表反射率反演方面, 需要研究大气吸收和散射对地面反射辐射的影响。从对地面反射辐射强弱影响方面来看, 无论是气体分子还是气溶胶的吸收, 都对辐射信号产生削弱效应; 大气散射效应一方面将地面反射辐射散射到其他方向导致到达传感器信号减少, 另一方面也会由于其他方向散射的信号(尤其是程辐射)使得原有路径上辐射信号增加, 其总体效应与大气状况、地面反射特性、成像几何等存在复杂耦合关系。图27展示了利用6S大陆型气溶胶类型模拟MODIS第一波段表观反射率随着气溶胶光学厚度和地表反射率变化的情况(胡方超, 2007)。

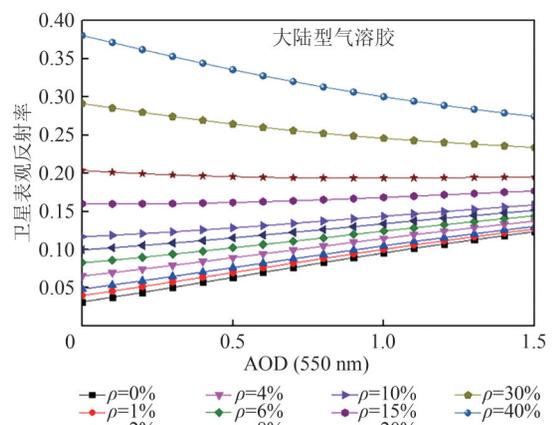


图27 MODIS红光波段表观反射率随气溶胶光学厚度的变化

Fig. 27 Varying of the apparent reflectance in the red band of MODIS with the AOD

总体上看, 地表反射率为30%左右时, MODIS红光波段表观反射率不随气溶胶光学厚度而变化, 说明程辐射项的增加效应和大气散射对辐射的减

少效应达到了平衡, 而地表反射率小于 30% 时, 气溶胶散射的增强效应更加明显, 反之亦然。

尽管大气各种组分的吸收和散射效应相互叠加, 需要通过精确的辐射传输模拟才能准确计算对辐射信号的影响程度, 但对于一般多光谱遥感而言, 可以将散射过程和吸收过程分开计算, 以便在满足精度前提下简化整个辐射模拟过程, 公式表达如下:

$$\rho^*(\theta_s, \theta_v, \varphi, P, Aer, U_{H_2O}, U_{O_3}) = \left[ \begin{array}{l} T_{g_{OC}}(m, P) T_{g_{O_3}}(m, U_{O_3}) \cdot \\ \rho_{atm}(\theta_s, \theta_v, \varphi, P, Aer, U_{H_2O}) + Tr_{atm}(\theta_s, \theta_v, P, Aer) \\ \frac{\rho_t}{1 - S_{atm}(P, Aer) \cdot \rho_t} T_{g_{H_2O}}(m, U_{H_2O}) \end{array} \right] \quad (8)$$

式中,  $\rho^*$  为表观反射率,  $\rho_t$  为地表反射率,  $T_{g_{OC}}$  为除臭氧和水汽之外其他气体透过率,  $T_{g_{O_3}}$  为臭氧透过率,  $T_{g_{H_2O}}$  为水汽透过率,  $\rho_{atm}$  为程辐射反射率,  $Tr_{atm}$  为大气上下行散射透过率,  $S_{atm}$  是大气半球反照率,  $\theta_s$ ,  $\theta_v$ ,  $\varphi$ ,  $P$ ,  $Aer$ ,  $U_{H_2O}$ ,  $U_{O_3}$ ,  $m$  分别为太阳天顶角、观测天顶角、相对方位角、大气压、气溶胶类型、水汽含量、臭氧含量和大气相对质量数。

对于细分波段的高光谱而言, 上述将吸收和散射效应分开对待的简化方式在一些气体吸收较为明显的波段可能引起较大误差, 建议采用更为严格的计算方式或者提前利用 MODTRAN 等辐射传输模型构建查找表实现更高精度的计算。例如, MODIS 地表反射率产品官方算法 (Vermette 和 Saleous, 2006)、Landsat 8-9 卫星数据的地表反射率产品官方算法 (Vermette 等, 2016)、用于解决国产主流中高分辨率卫星数据的大气校正算法框架 ACFrC (Zhang 等, 2022b) 等均采用了吸收和散射分开计算的简化方式, 而 ATCOR、FLAASH 等基于 MODTRAN 模型的软件则采用吸收和散射耦合计算的思路。对水色遥感而言, 水体遥感大气校正需要进一步扣除由于水体镜面反射部分的信号, 甚至要结合水质反演将传感器光谱辐射误差与大气校正模型误差统一再次消除 (Wang 等, 2016; Li 等, 2017)。

荧光光谱范围在 0.65—0.85  $\mu\text{m}$ , 大气对 SIF 信号的影响与对可见—短波红外区间的反射辐射的影响相似, 唯一区别在于准确捕获反射率信号需要同时校正上行路径和下行路径的大气效应,

而 SIF 是植被发射的光信号, 探测 SIF 只需要校正上行路径中的大气效应即可。但需要注意, SIF 信号微弱, 且依赖大气吸收通道才能分离 SIF 与反射光的贡献, 因此大气辐射传输影响对 SIF 定量遥感影响更为突出, 如何准确校正大气效应是 SIF 遥感反演算法中的关键所在。

当前大气辐射传输定量校正误差相当于 SIF 信号的 10 倍以上, 基于传统大气辐射传输定量校正的 SIF 卫星遥感仅在少数太阳夫琅禾费暗线才能取得较好效果, 如 KI、Fe 太阳夫琅禾费暗线, 且需要 0.04 nm 极高光谱分辨率 (Liu 和 Liu, 2014; Zou 等, 2022)。因此, 为了解决传统 SIF 遥感反演算法存在的问题, Joiner 等 (2013)、Guanter 等 (2015) 提出了基于主成分分析、奇异值分解等原理的数据驱动的 SIF 卫星遥感反演方法。数据驱动算法基于非植被像元训练样本进行主成分分析或奇异值分解来提取大气辐射传输特征, 然后将这些特征应用于植被像元, 实现对大气辐射传输特征、地表反射特征和 SIF 发射特征的分离。数据驱动算法不需要同步的大气参数数据, 避免了误差累积, 同时将非线性的大气辐射传输方程解算问题转换为若干个不同特征光谱的线性拟合问题, 降低了算法的复杂度。数据驱动算法通常利用一个较宽的波段范围进行光谱拟合, 可以综合利用太阳夫琅禾费谱线和地球氧吸收波段的信息, 并降低对噪声的敏感性。因此, 数据驱动算法可以很好地规避 SIF 卫星反演中的大气效应问题, 已被成功用于多种卫星数据的 SIF 遥感产品生产 (Du 等, 2018; Köhler 等, 2018)。

### 3.2.2 中长波红外辐射

中长波红外谱段的大气效应, 不仅要考虑大气对红外辐射的吸收和散射作用, 还要考虑大气自身的红外辐射。由于大气对中长波红外辐射的影响显著, 在进行地表温度和发射率的遥感测量时, 大气校正是不可或缺步骤。通过大气校正, 可以消除大气吸收和散射对测量数据的影响, 提高地表辐射特性的反演精度。常用的大气校正方法包括辐射传输模型 (如 MODTRAN)、实测大气参数校正和基于场景的校正技术。大气校正需要考虑测量时的大气状况, 包括气温、湿度、气压、气溶胶含量等 (Li 等, 2019)。

大气对热红外谱段的吸收不仅与大气成分

(H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>和O<sub>3</sub>等)分布有关,也与大气温度、压力有关。从整层大气的热红外吸收谱来看,3—5 μm和8—12 μm两个谱段,大气吸收率小、透过率高,被称为“大气窗口”,其余谱段吸收率都近于1。另外,大气在14 μm以上,可以看成是近于黑体。水汽与CO<sub>2</sub>是决定大气辐射性质的主要成份(Zhang等,2014),水汽的最强和最宽的振转吸收带为以6.3 μm为中心的吸收带,在8—14 μm谱段仍然有较弱的连续吸收;CO<sub>2</sub>主要有13.5—16.5 μm的强吸收带,以及4.3 μm为中心的吸收带;O<sub>3</sub>以9.6 μm为中心有一个较强的吸收带,其次在4.75 μm有一个较显著的吸收带,在14 μm附近的吸收带与CO<sub>2</sub>的强吸收带重叠。其他气体特别是大气痕量气体在某些特征谱段也具有红外吸收特性。

中长波红外辐射在大气中的散射主要包括瑞利散射和米氏散射。与可见光相比,大气分子对热红外谱段的散射作用较弱,一般可以不考虑。不过,沙尘天气、云雨天气由于气溶胶粒径较大,对热红外谱段的效应也不能完全忽略。大气自身的热红外辐射主要由大气温度、湿度和压强等因素决定。遥感器观测的大气层顶红外辐射包括大气上行路径辐射,以及大气下行辐射被地表反射再经过大气吸收和散射衰减到达遥感器的贡献。散射效应也会导致辐射能量的偏移或扩散,使得探测器接收到的辐射能量可能包含来自非目标区域的辐射。这种效应在高精度遥感测量中需要被考虑和校正。

大气效应是地表温度反演的重要影响因素。劈窗算法和温度发射率分离算法是热红外波段最经典的两个反演方法。热红外遥感的分裂窗算法利用大气窗口10—13 μm内,两个相邻通道(一个在11 μm附近,另一个在12 μm附近)上大气吸收作用差异的来去除大气影响,通过两个通道测量值的线性组合来反演地表温度。因为分裂窗算法可以比较有效地规避大气效应影响,在所有的地面温度反演算法中,得到了最广泛的应用(Li等,2013)。另一种广泛使用的地表温度反演算法是温度发射率分离方法,大气效应对此有较大的影响,水汽的吸收效应尤为显著,在温度和发射率解耦过程中,吸收效应会影响各波段的亮度温度,进而影响发射率和温度的反演结果,因此该方法比较依赖大气廓线的精度。

热红外波段的辐射特性与云的物理特性紧密

相关,例如中波红外辐射率与云粒子尺度间存在明显的函数关系,粒子有效半径越大,辐射率越小;长波红外辐射率对云顶温度较敏感,云顶温度越高,辐射率越大。因此,利用中长波红外可有效反演云特性参数。近年来,国内外不少学者利用热红外波段开展了相关研究,主要包括云相态识别和云顶参数反演。

早期的云相态识别以三光谱反演算法最具代表性,该方法以11 μm、12 μm亮温差为横坐标8 μm、11 μm亮温差为纵坐标做出亮温差的散点图用以区分冰云和水云(Ackerman等,1990)。但该方法对于光学厚度较薄的水云和冰云经常会出现误判,需要对大气中水汽含量的变化情况进行校正。除了三波段反演算法,热红外光谱阈值法也能有效识别云相态(Rossow和Schiffer,1999)。此外,单独使用热红外波段或联合可见光及近红外波段识别云相态都有一些局限性,经典的基于阈值的方法和机器学习方法都不能在不牺牲可见光波段有价值测量值的情况下提供一致的全天云检测(Nakajima等,2019)。为了在全天云检测中充分利用可见光波段,保证算法性能的一致性,Shang等(2024)提出了将经典的基于阈值的方法与机器学习模型相结合的CARE算法,该模型在新一代静止气象卫星Himawari-8(葵花-8)应用中取得明显效果,并且可扩展至FY-4卫星类似的AGRI传感器。

确定云相态后可以更好地进行云的光学和微物理参数的反演。周青等(2010)基于FY-2C可见光、中红外(3.75 μm)与热红外(11 μm)通道辐射率对云光学厚度、云滴有效半径、云顶温度辐射参数的敏感性分析,创新性地提出三通道同时反演云的光学厚度、云滴有效半径及云顶温度的迭代方案,并通过与MODIS产品的比较证明了其精度。目前从卫星遥感反演云顶温度的算法主要有两类,一是基于辐射传输方程直接反演云顶温度,包括适用于光学厚云的11 μm通道亮温方法和适用于光学薄卷云的双通道发射率方法;二是由反演出的云顶高度利用大气温—压廓线数据得到云顶温度。有效的云顶高度反演方法包括地基观测、极轨观测和地球静止卫星观测。其中,极轨观测分为主动观测和被动观测两种。被动观测反演方法主要包括以红外窗区和CO<sub>2</sub>吸收技术为主的红外波段反演算法。前者有单红外窗区法

(Schmetz等, 1993)、太阳光反射率—红外窗区法(Reynolds和Vonder Haar, 1977)、H<sub>2</sub>O—红外窗区法(Szejwach, 1982)、红外分裂窗查算表算法(Derrien等, 1988)等, 后者有辐射比值法(Smith和Frey, 1990)和辐射余差法(包括均方根值法、Chahine辐射余差法和MLEV法), 但由于大气廓线数据和云顶亮温的准确性难以把握, 以及一些算法的假设存在局限性, 使得以上方法在进行反演时结果会存在一定误差。并且由于极轨的原因, 不能用于连续识别静止区域。随着气象卫星数量的增多和探测通道的拓宽, 结合其他波段以及极轨卫星资料共同提升云顶高度的反演准确性已经成为新的发展方向(Shao等, 2023)。

### 3.2.3 微波辐射与后向散射

微波信号在通过大气层时受到的影响被称为微波遥感的大气效应, 大气对被动地物微波遥感的影响主要包括吸收、散射、衰减和辐射。主要包括由大气中的水汽、云雾和其他悬浮粒子引起的大气吸收、大气散射和大气延迟, 这些影响可能改变信号的强度和相位, 从而影响微波数据的质量和解释。但微波的衰减也是研究大气气体(如水汽、氧气、臭氧等)的一个重要因素, 记录的衰减量因微波的频率(波长)而异, 可以用于研究云层高度、水含量和降雨等(Awange等, 2013)。

大气对微波的吸收主要受水汽(吸收中心位于20 GHz附近)和氧气(吸收中心位于60 GHz附近)的影响(图28), 并依赖于微波的频率, 不同频率的微波对大气吸收的敏感程度不同, 例如K波段(18—26.5 GHz)的微波在湿润大气中会遭受显著的吸收。

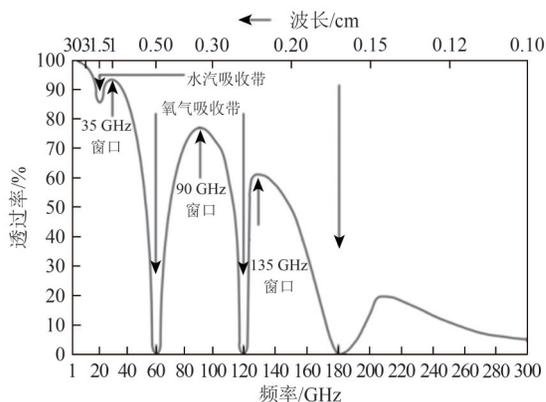


图28 微波的大气透过率

Fig. 28 Atmospheric transmittance in the microwave bands

当大气中存在的粒子或大气分子与电磁辐射相互作用并导致电磁辐射从其原始路径重定向时, 就会发生散射, 导致电磁辐射衰减。大气散射主要受氮气、氧气分子、气溶胶、雾颗粒、云滴和雨滴等的影响, 通常与微波波长和大气颗粒的尺寸相关。较长波长的微波(如L波段)通常受散射的影响较小, 而较短波长的微波(如X波段)则更容易受到影响。尽管如此, 相比光学波段和红外波段, 微波的波长长的多, 大气对微波的散射作用很小, 其影响忽略不计, 因而微波通常能够穿透云层和雨雪, 在恶劣气候条件下全天候工作。

此外, 微波信号在穿过大气层时受到折射的影响称为大气延迟, 包括对流层延迟和电离层延迟。对流层延迟是信号穿过对流层时, 由于空气密度、温度、水汽和压力的变化引起的, 可以进一步分为湿延迟和干延迟。干延迟与大气中的气体组成有关, 通常比较稳定。湿延迟则与大气中的水汽含量相关, 变化剧烈且难以准确预测。电离层延迟是指信号穿过电离层时, 太阳辐射使电离层中的电子密度发生变化从而影响穿过该层的微波信号。电离层延迟与微波信号的频率有关, 高频信号如C波段、X波段、Ku波段受其影响较小, 而低频信号如L波段和S波段会受到更显著的影响。

微波信号在消除大气效应时通常有以下方法: (1) 利用大气辐射传输模型校正。大气辐射传输模型是通过对大气中微波的吸收、散射和发射过程进行数学描述, 进而推算出大气对微波信号的影响。这些模型能够模拟大气层对不同频率的微波信号的影响, 从而帮助校正大气对微波信号的吸收和散射。此方法广泛应用于反演海面温度、地表温度、海面风速等参数。(2) 采用双频或多频段观测。大气对不同频率的微波信号影响不同, 通过比较多个频段的微波信号, 可以有效校正大气吸收的影响。例如, 微波辐射计可以同时使用多个频段的观测数据, 通过分析大气对不同频率的吸收差异, 推导出大气的影响, 并消除这种影响。此方法广泛应用于反演海表温度、海表盐度和海面风速等参数。(3) 利用大气廓线数据校正。大气廓线是对大气成分(如温度、湿度、水汽含量等)的垂直剖面观测数据。通过结合地面站点或卫星提供的实时大气廓线数据, 可以在微波遥感数据处理时进行针对性的大气修正。(4) 采用

云检测与去除。在某些情况下，直接检测并剔除受大气影响严重的像元，保证反演结果的准确性。例如，当观测区域内存在厚云或降雨时，可以通过算法检测出这些像元并将其屏蔽或剔除，避免影响到整体的观测数据，此过程通常依赖于辐射计自身的云检测通道或其他传感器提供的辅助信息。此方法常用于海洋观测和气象预报中。

微波在穿过大气层时会与不同的大气成分发生相互作用，且不同波段的微波对不同的成分（如水汽、云、气溶胶等）具有不同的敏感性。通过分析微波信号的衰减、频移和散射等信息，应用经验方法和物理方法等反演算法可以提取大气成分信息。经验方法是基于大量的观测数据和经验公式来估算大气成分，例如通过微波亮温数据与大气水汽含量的经验关系反演水汽含量。物理方法是基于辐射传输方程，结合大气物理特性进行反演，例如利用微波吸收谱线反演大气中的水汽、氧气含量等。

### 3.3 角度效应

角度效应是指地物与电磁波的作用时具有明显方向性，是地表与光线作用的基本宏观现象，使得地表散射辐射具有明显的各向异性特征，辐射值随入射辐射角度、遥感器观测角度、电磁波波长不同而存在差异。各向异性的内在原因主要是地物内在成分及表面粗糙度与三维结构（Nicodemus, 1965; 李小文, 2005）和地形起伏的影响（Soenen 等, 2005）。

#### 3.3.1 可见—短波红外辐射

在可见短波红外谱段，角度效应表现为地球表面的反射在不同的太阳入射与遥感器观测角度存在差异，呈现方向性。双向反射分布函数BRDF（Bidirectional Reflectance Distribution Function）是描述方向反射特征的基本物理量（图29），具体为反射方向辐亮度微增量与入射方向辐照度微增量的比值（Nicodemus 等, 1977），单位为  $\text{Sr}^{-1}$ ，计算公式如下：

$$\text{BRDF}(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda) = \frac{dL(\theta_r, \varphi_r, \lambda)}{dE(\theta_i, \varphi_i, \lambda)} = \frac{\rho(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda)}{d\Omega'_r} \quad (9)$$

式中， $\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r$  分别为入射方向的天顶角与方位角、反射方向的天顶角与方位角， $\lambda$  为波长，

$\rho(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda)$  为方向反射率， $d\Omega'_r = \cos \theta_r d\Omega_r$  为投影立体角， $dE(\theta_i, \varphi_i, \lambda)$  表示在  $\theta_i, \varphi_i$  方向上入射到地物的辐照度， $dL(\theta_r, \varphi_r, \lambda)$  表示在  $\theta_r, \varphi_r$  方向上地物反射的辐亮度，对于理想的朗伯体表面BRDF值为  $1/\pi$ 。

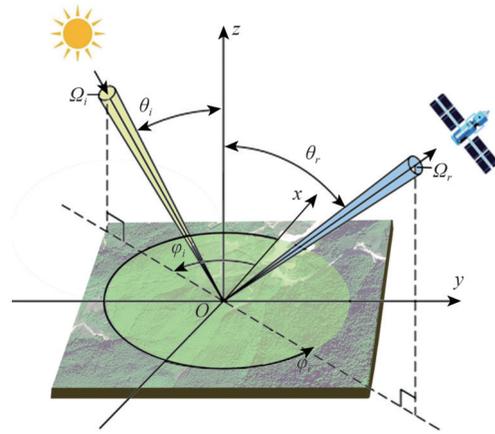


图29 BRDF中参量示意图

Fig. 29 Schematic diagram of parameters in BRDF

由于遥感器的成像方式、数据获取时间等不同，导致即使在同一地理位置，不同时间和不同遥感器之间的观测几何条件也可能存在显著差异，同一副图像上不同空间位置也会观测几何有较大差异。因此，当在全球大区域、长时间序列研究时一般需要进行角度一致化处理以消除角度差异的影响。地物方向特性认知与BRDF模型构建是研究的理论前提，BRDF模型可分为物理模型、经验及半经验模型、计算机模拟模型（韩源等, 2023）。物理模型一般是依据角度效应的驱动因子，围绕特定地物类型基于辐射传输或几何光学理论开展研究。引起方向辐射的主要因素有地物理化成分、微观粗糙度、三维结构等，其中成分影响由组分的光学特性及含量决定，微观结构粗糙度影响了光的散射方式，粗糙地表会使反射更加无序趋于朗伯体。三维结构主要体现为内部多次反射和吸收特性，其中植被最为明显；陡峭崎岖的地形由于坡面法线与垂直方向不一致而改变了植被和地形的三维结构关系，使得相同观测时平地与山区观测几何存在差异（Soenen等, 2005; Wen等, 2018）。

获得高精度多角度反射数据是角度效应研究的重要基础，但BRDF难以野外测量，结合观测特点方向反射可被细化为图30中的9种形式，分别对应二向反射因子BRF（Bidirectional Reflectance

Factor)、半球方向反射因子HDRF (Hemispherical-Directional Reflectance factor)、半球锥反射因子HCRF (Hemispherical-Conical Reflectance Factor)、双锥角反射因子BCRF (Biconical Reflectance Factor)、方向锥反射因子DCRF (Directional-Conical Reflectance Factor)、锥方向反射因子CDRF (Conical-Directional Reflectance factor)。卫星、机载和地面测量获取的是在一定角度范围内的反射辐射,因此遥感获取的反射信号通常是HCRF,当瞬时视场角较小时,假定瞬时视场角为微增量,则方向反射率为HDRF,MODIS遥感器瞬时视场角小于 $0.1^\circ$  (Che等,2008)。而对于类似ASD的地物光谱仪,其视场角可以达到 $25^\circ$ ,这时就需要考虑视场角内的辐射变化,测量的方向反射为HCRF。

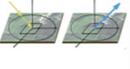
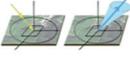
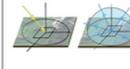
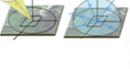
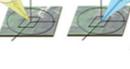
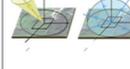
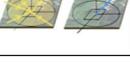
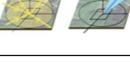
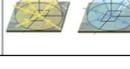
入射 \ 反射	方向	锥	半球
方向	方向—方向	方向—锥	方向—半球
			
锥	锥—方向	锥—锥	锥—半球
			
半球	半球—方向	半球—锥	半球—半球
			

图30 不同观测方式下角度效应形式

Fig. 30 Forms of angular effects under different observation methods

多角度实测数据主要依赖于航空航天平台与地面实验获得,航空航天平台是通过多角度遥感器或不同角度下多时相观测获取,目前MODIS、POLDER以及MISR等多颗卫星具备多角度观测能力并发布BRDF产品,中国2022年发射的句芒号卫星上也首次搭载了多角度多光谱相机。在地面测量方面,BRDF观测设备研制与试验设计、典型地物方向反射测量与时空谱演化规律分析都是研究热点,这也是BRDF模型发展的重要基础,目前以单一地物的微观尺度研究为主,亟需开展顾及多尺度平台、多类型地物交错分布的角度效应研究。

与地物方向反射率的特征相似,SIF信号也具有方向性。然而,SIF作为受激发光的辐射信号,

SIF强度与太阳光照强度基本线性相关。由于晴空条件下太阳天顶角变化基本决定了太阳光照强度变化,SIF也会随着太阳光照强度和天顶角变化 (Fournier等,2012; Guanter等,2012; Zhang等,2020)。

因此,SIF方向性主要研究观测方向的各向异性,主要可以归因于结构因素及辐射在传输中的吸收和散射等物理过程因素。在叶片尺度上,除了光的散射外,影响SIF方向性的因素主要是荧光在叶片内部的吸收现象。叶片内部的叶绿素荧光(尤其是红光波段)的再次吸收作用导致了叶片水平荧光在前向和后向上出现差异 (Miller等,2005; Pedrós等,2010),从而导致叶片尺度SIF的方向性。在冠层尺度上,冠层结构对SIF方向性的影响包括它对冠层内部叶片接收到的入射光的遮挡效应以及它对冠层内部叶片发射的SIF逸出的阻碍效应。冠层SIF只有上行辐射传输过程,其辐射传输过程与冠层反射光辐射传输过程基本一致;冠层SIF虽然没有冠层反射光的太阳下行辐射传输过程,但叶片SIF与到达叶片表面的光强线性相关,故影响反射光下行辐射传输路径过程,也会同样影响SIF。众多观测和模型研究也已证实了冠层SIF存在与反射光谱基本一致的各向异性特征,并可以利用反射光BRDF模型模拟和校正冠层SIF的方向性 (Liu等,2016)。

角度效应在激光雷达领域是指激光雷达测量时,激光束与目标物体表面法线的夹角(入射角)或与激光接收器之间的夹角(接收角)变化,导致测量数据(例如回波强度、点云密度、精度等)发生变化的现象。激光束与被测物体表面之间的入射角或接收角的变化对激光雷达测量结果产生影响。激光束从发射器发射,遇到目标物体后被反射回接收器,不同的入射角度会影响激光的回波强度、点云数据的精度和完整性。这种效应广泛存在于LiDAR系统的测量过程中,尤其是在复杂的地形或物体表面存在多种倾斜角的情况下。由于激光雷达在测绘遥感领域是通过测距和测角获取地物目标的几何特性。因此,激光的入射角对地物目标的几何特性获取不构成影响。

角度效应对测得的点云数据影响主要包含以下几个方面:

(1) 反射强度的变化。激光遥感主动探测时激光光速与地物表面形成漫反射,因此激光入射

角的不同会导致地物目标反射强度存在一定的差异。激光雷达的测量依赖于激光束从物体表面的反射强度。当激光束以垂直角度入射时（即与表面法线平行），反射的强度通常最大，返回接收器的信号最强。而当入射角度增大（即接近水平），反射强度减弱，可能导致信号丢失或反射减弱，影响测量的精度。在利用反射强度进行地物分类时要对反射强度进行校正，消除激光入射角和探测距离对反射强度的影响（Shi等，2015）。

(2) 点云数据的分布和质量。角度效应会对点云数据的分布和密度产生直接影响。例如，当激光束与目标物体表面接近垂直时，点云数据较为密集且精确；而当角度偏大时，测量点可能分布较为稀疏，某些区域甚至可能无法捕捉到点云。这在建筑物、植被等具有倾斜表面的物体上表现尤为明显。

(3) 测量误差的增加。当入射角偏大时，激光雷达的测量误差也会增大。尤其是在非平坦表面（如树木、岩石、坡地等），入射角大幅变化时，会造成激光雷达测距精度下降，从而影响点云数据的质量，如图31（Chen和Yang，2016）。

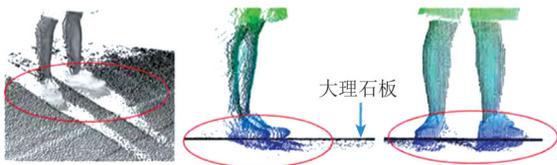


图31 激光雷达点云质量劣化

Fig. 31 Degradation of LiDAR point cloud quality

(4) 多路径效应和散射。激光束入射角度较大时，可能会发生多路径效应，即激光束从多个方向被反射并到达接收器，导致测量结果的模糊或失真（图32）。此外，在粗糙或不规则表面上，大角度入射的激光束更容易发生散射，进而影响反射信号的强度和测量精度（Chen和Yang，2016）。

在地形测绘等应用中的角度效应影响主要在以下几个方面：

(1) 地形测绘：在地形测绘中，角度效应可能导致陡峭山坡或悬崖的点云数据不完整，因为激光束以较大角度入射时，回波强度减弱。

(2) 建筑物建模：在建筑物三维建模中，角度效应会影响建筑物的墙面或屋顶的精确重建，尤其是在倾斜或复杂的结构上。

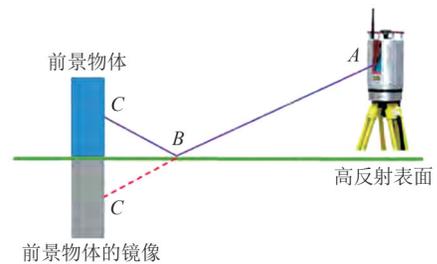


图32 激光雷达扫描多路径效应

Fig. 32 LiDAR scanning multipath effect

(3) 自动驾驶与环境感知：在无人驾驶领域，角度效应会影响车辆激光雷达对周围环境的感知，尤其是当车辆需要感知远距离或有较大角度倾斜的物体时，测量精度可能降低，影响导航决策。

(4) 林业激光遥感：激光扫描估计冠层覆盖度等森林属性已经被广泛研究。对于机载激光点云，从中估计冠层覆盖度简易方法是计算超过指定高度阈值的冠层点的比例。然而，这种方法有轻微的偏差，因为机载激光雷达脉冲的特点是斜观测，而不是精确的垂直。此外，在一定的扫描角度下也可以观察到树冠的侧面，并且这种偏差随着扫描角度的增加而增加，在大约 $40^\circ$ （距天顶 $20^\circ$ ）处变得显著（图33）。由于激光雷达的角特性，单源，单平台采集的激光点云数据无法做到林木三维结构的全覆盖，在计算林冠郁闭度等森林属性时，多采用空地数据融合（例如，机载ALS、地面站TLS激光扫描融合）的点云数据作为基础进行解算（Korhonen等，2011）。

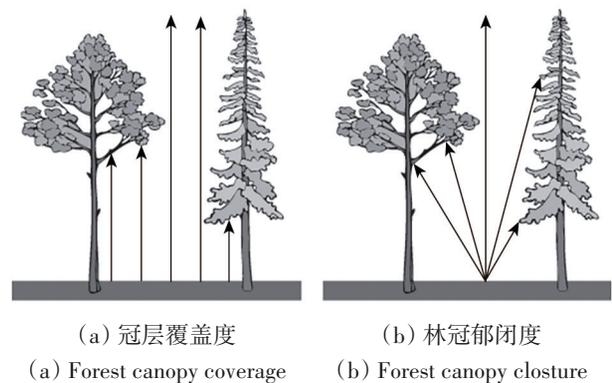


图33 冠层覆盖度与林冠郁闭度

Fig. 33 Forest canopy coverage and closure

激光雷达的角度特性测量、分析与建模，涉及对激光束入射角和接收角的影响进行定量评估，可以通过实验和仿真建模来描述这些特性对测量

精度、回波强度和点云数据质量的影响。通过收集大量不同入射角下的激光雷达点云数据,使用机器学习方法(如神经网络或决策树)或者深度学习方法(如卷积神经网络)建立复杂的角度效应模型。这类模型可以学习入射角、目标材质、环境条件等对激光雷达数据的影响,从而实现未知场景中角度效应的预测和补偿。仿真则通过光线追踪(Ray Tracing)等仿真建模技术,模拟激光雷达光束在不同角度、材质表面上的反射路径。此类实验可以评估角度效应对测量结果的影响,并为设计激光雷达测量方案提供依据。通过实验测量、数据分析和建模,研究激光雷达的角度特性有助于了解入射角对测量精度、回波强度和点云数据质量的影响。采用几何光学模型、经验回归模型、机器学习和深度学习等方法,可以有效预测并补偿角度效应,提高激光雷达系统的测量精度和应用效果。

### 3.3.2 中长波红外辐射

由于地表的非均质性、三维结构和地形变化,地表热红外辐射表现出显著的方向性特征。热辐射方向性指观测到的离地辐射会随太阳和观测角度变化而变化。卫星观测的热辐射同样显现出明显的方向性,这可以视为离地辐射方向性与不同角度下不同大气路径之间的耦合结果。热红外波段的方向性主要由地表属性决定,而在中红外波段则还受到太阳反射的影响。一般情况下,地表热辐射呈现出随观测角度增大而变小、观测与热点之间角度距离增大而变小的变化趋势。对于垄行作物,还会出现沿垄行方向热辐射增大的现象(Cao等, 2021)。

导致地物热红外辐射角度效应的原因可以归结为3个方面:不同角度观测到像元内各组分的比例不同、像元内光照和阴影部分具有不同的组分温度、像元内多次散射作用造成不同角度观测的等效比辐射率不同。在热红外遥感建模中,热红外离地辐射主要分为两个部分:地表地物的直接发射部分和大气发射被地表反射的部分,由此冠层顶的辐射可以表示为(Bian等, 2018):

$$L(\theta_s, \theta_v, \varphi) = \sum_j (\varepsilon_j f_j(\theta_s, \theta_v, \varphi) + \varepsilon_{m,j}) \cdot B_\lambda(T_j) + (1 - \varepsilon_c) L_a^\downarrow \quad (10)$$

式中,  $\theta_s$  和  $\theta_v$  分别是太阳天顶角和观测天顶角;  $\varphi$  是传感器与太阳之间的相对方位角;  $T_j$  和  $\varepsilon_j$  分别是

地表某个组分的温度和材料发射率;  $\varepsilon_{m,j}$  是指由于多次散射效应引起的发射率增量,即组分  $j$  发出的、被其他组分散射或反射到传感器的贡献;  $\varepsilon_c$  是整个冠层的有效发射率,可以通过对所有组分有效发射率累计得到;随后,根据基尔霍夫定律,  $(1 - \varepsilon_c)$  代表整个冠层的反射率;  $L_a^\downarrow$  是来自大气的下行有效辐射,  $B_\lambda$  是普朗克函数,将温度转换为波长  $\lambda$  的热辐射。由于不同的太阳照射角度和不同的气象条件下,像元内组分温度分布动态变化。

热辐射方向性的测量包括地面多角度观测架、塔基、有人机和卫星遥感等方式。多角度观测架可以较为完全的测量地表半球空间的方向热辐射,但是存在观测区域小的问题;塔基可以获得较大范围热辐射方向性观测,但是局限于塔吊的观测样地,如怀来遥感观测实验场和法国农科院阿维尼翁实验场;有人机遥感可以测量较大的研究区域,但是观测角度,尤其是观测方位角受限,一般会选择太阳主平面和垂直太阳主平面的观测结果,如黑河遥感观测实验和法国马赛和图卢兹的城区观测实验(Bian等, 2020; Lagouarde等, 2008)。图34展示了有人机飞行常用的交叉和平行航线的示意。卫星遥感观测主要通过ATSR系列及其后续的SLSTR系列卫星实现,其搭载星下点和倾斜观测两个方向观测相机,可以获得准实时的方向观测结果(Coll等, 2019)。大量的地面、航空和卫星遥感测量发现了地物热红外辐射亮度随观测角度而变化的现象,如观测角度可以引起森林辐射温度差异高达7 K,农作物冠层顶层与底层温差4 K,可导致水平和垂直观测的有效辐射温度差异达到2 K以上,雪方向发射率的差异可以导致方向亮温差达3 K以上。

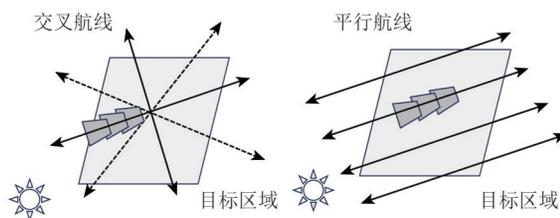


图34 交叉和平行航线示意图

Fig. 34 Schematic diagram of crossing and parallel flights

地表热辐射方向性模型发展充分借鉴了可见—短波红外谱段的双向反射率分布(BRDF)建模,针对典型植被场景建模,可分为辐射传输、几何光学、混合模型和计算机模拟模型(柳钦火等,

2019)。辐射传输模型考虑冠层内的辐射交互作用，通常将植被冠层假设为均质的混沌介质，因此广泛应用于浓密或均质植被类型，其优势在于能够准确计算组分间的多次散射。与可见光模型不同，由于中长波红外多次散射较弱，通常选择简化的解析模型、仅考虑一次散射就能满足大多数研究和应用需要。几何光学模型则关注地物冠层的几何结构，基于地表的几何特征估算各分组的可视比例，常用于行播作物和离散森林冠层。由于几何光学模型能直接计算光照与阴影比例，能够有效解释亮温的热点效应。混合模型结合了辐射传输和几何光学模型的优势，更好地模拟了地表热辐射的方向性特性。混合模型是目前植被体系研究的重点，针对植被的水平聚集效应和垂直分层等都开展了相应的建模工作（Bian等，2022）。计算机模拟模型则能在真实植被结构下模拟辐射传输过程（Liu等，2002），适用于复杂场景的分析，但其三维计算耗时较长，难以应用于大范围的反演任务。这些物理模型的实际应用，尤其在卫星遥感中，往往因参数输入过多而受到限制。从应用角度出发，核驱动方法在物理精度与应用性之间实现了良好的平衡，是开展地表温度角度归一化和上行长波辐射的重要工具。以往的研究更多关注平坦地表的植被体系，目前由于地球能量平衡和生态环保等的应用需要，在地形场景和城市场景的模拟也发展迅速（Bian等，2024；Fan等，2024）。

地表温度反演需要发射率作为输入，因此除了热辐射方向性模型外，针对不同地物也发展了土壤、冰雪和植被等典型地物发射率模型。自然条件下土壤通常是不同粒径的颗粒集合体。土壤的热红外辐射传输模型以Conel（Conel，1969）和Hapke（Hapke，2012）的研究最有代表性，充分考虑了密实颗粒间的多次散射。同为密实散射体，冰雪的辐射传输机理与土壤具有很大的相似之处，Cheng等（2010）对现有解析模型（Hapke模型和Conel模型）、数值解模型（DISORT模型）和半经验模型进行了比较，结果表明，这些模型可以很好模拟出雪的发射率的形状和角度依赖性，但仍没有一个模型具有全面的模拟能力。近几年植被冠层尺度的建模一直是研究的热点，也建立了不同形式的冠层发射率模型，这些模型往往假设植被和土壤都是朗伯体，发射率随角度的变化是由

视场内植被与土壤的比例变化造成。另外，城市场景也进行了一些建模工作，通常是将建筑进行几何体抽象，利用天空可视因子或者几何光学方法进行计算。

### 3.3.3 微波辐射与后向散射

在微波波段，角度效应指的是在微波遥感过程中，由于不同的入射角度和观测方向，会对微波信号的反射强度、极化特性、以及目标物的散射特性产生显著影响。如图35所示，入射角（incident angle） $\theta$ 是雷达波束与水平地面法线的夹角。

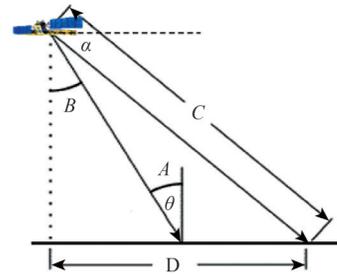


图35 入射角示意图

Fig. 35 Schematic diagram of incident angle

角度效应的影响体现在对反射强度、后向散射、极化特性响应、几何畸变、观测方向等方面：

(1) 入射角对雷达后向散射强度的影响。入射角决定了入射微波与地表之间的相对几何关系，这直接影响到地表对微波的后向散射强度。如图36所示，当入射角较小时（约 $<15^\circ$ ），雷达回波以镜面反射或者接近镜面反射为主，且随着入射角的增大，反射强度减小。当入射角超过这个范围时，雷达回波以后向散射为主，且随着入射角的增大，雷达后向散射强度减小。

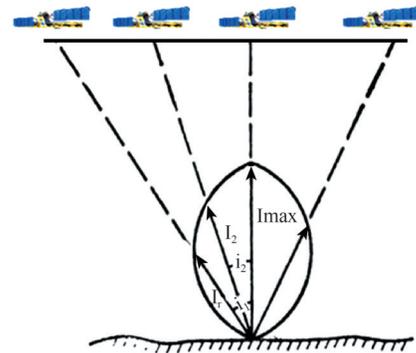


图36 后向散射强度与入射角的关系

Fig. 36 Schematic diagram of relationship between backscattering intensity and incident angle

局地入射角 (local incident angle) 是雷达波束与实际地面法线间的夹角, 地形坡度可以影响雷达波束的局地入射角, 进而影响到后向散射强度。图 37 说明了局地入射角受地形坡度的影响, 通常情况下, 斜坡会导致局地入射角比平地小, 后向散射强度更大。

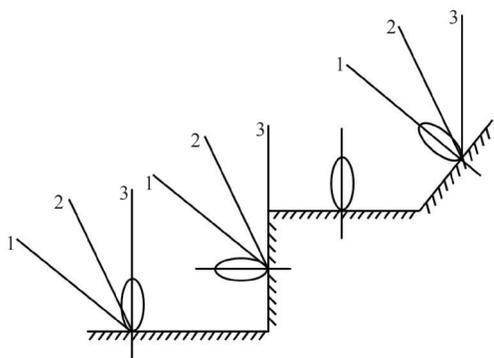


图 37 后向散射强度与坡度的关系

Fig. 37 Schematic diagram of relationship between backscattering intensity and slope

此外, 地物表面粗糙度和入射角之间存在相互作用, 根据地物表面类别的判别式 (Peake 和 Oliver, 1971):

光滑表面为

$$h \leq \frac{\lambda}{25 \cos \theta} \quad (11)$$

粗糙表面为

$$h \geq \frac{\lambda}{4.4 \cos \theta} \quad (12)$$

式中,  $h$  为表面粗糙度,  $\theta$  为入射角,  $\lambda$  为波长。

判别式表明, 地物表面粗糙度不是绝对的, 既受地表物质微小起伏的影响, 也与雷达系统入射角和波长有关。对于光滑表面 (如平静的水面), 入射角对后向散射的影响尤其显著。较小的入射角通常导致镜面反射, 雷达接收的后向散射较强; 而较大的入射角通常导致漫反射, 减弱了雷达后向散射。对于粗糙表面 (如植被或崎岖的地表), 由于存在多次散射或者体散射, 会产生更高的后向散射强度。在实际的遥感应用中, 理解入射角的影响是提高雷达数据解译精度的关键。

(2) 极化特性对入射角变化的响应。对于同极化数据, 当入射角较大时, 反射效应增强, 此时水平极化的后向散射通常较强, 而垂直极化在某些情况下表现出较弱的散射。这是因为入射角增加后, 电磁波更多地在地面传播, 极化波的反射

方向受到显著影响, 特别是在粗糙表面或水体中, 水平极化和垂直极化的极化差异更加明显。在较小的入射角下 (接近垂直), 意味着电磁波大部分能量在垂直方向传播, 极化特性不明显, 水平极化和垂直极化的散射差异相对较小。

交叉极化数据的后向散射强度随入射角的变化通常较小, 尤其在复杂的地表 (如森林或粗糙地表) 中。交叉极化的反射和散射主要受目标物的几何结构和内部多次散射影响, 入射角变化在一定范围内对其影响较小。因此交叉极化经常用于植被监测等应用中。

(3) 几何畸变与阴影效应。在合成孔径雷达 (SAR) 中, 由于测量的是倾斜范围内的特征距离, 而不是沿地面的真实水平距离, 随着入射角变化, 山脊、建筑物等立体目标在雷达图像中的形态会产生畸变, 这种变化在崎岖的地形上尤为明显, 通常分为透视收缩、叠掩和阴影 3 种类型。这种几何畸变在 SAR 成像中表现为前方倒影和后方阴影 (Van Zyl 和 Kim, 2011)。

如图 38 所示, 透视收缩指在雷达波束到达向雷达倾斜的高大特征 (例如山) 顶部前, 由于雷达测量的是倾斜距离, 斜率 (从  $a$  点到  $b$  点) 被压缩, 在图像平面上错误地被表示 ( $a'$  点到  $b'$  点)。当局地入射角为零时出现最大的透视收缩 (收缩为一个点)。叠掩是指雷达脉冲的曲率使近目标回波先到达, 远目标回波后到达, 从而使顶部 ( $e$  点) 先成像, 底部 ( $d$  点) 后成像。只有当 (俯角+坡度)  $> 90^\circ$  时才产生叠掩现象, 由于近距离点的俯角大, 因此叠掩多在近距离点发生。此外, 当背向雷达的斜坡足够陡峭, 雷达波束无法照射到它时, 就会出现阴影, 该斜坡上的区域就不会成像。在雷达图像中, 阴影总是远离遥感器的方位向, 并随入射角的增大而增加。几何畸变与阴影效应是合成孔径雷达成像中常见的现象, 尤其在复杂地形或高建筑物区更为明显。这些效应会导致图像中的地物形态失真或信息缺失, 并产生测量误差。通过多角度观测、数字高程模型校正等技术手段, 可以在一定程度上减小其影响, 提高合成孔径雷达数据的准确性和解译效果。

(4) 观测方向对后向散射的影响。同一目标从不同方向进行观测时, 雷达图像会存在差异。以 SAR 或散射计观测海面风场为例, 在入射角和风速保持不变的条件下, 雷达的视线方向 (radar

looking direction) 与海面风向的差异会影响海面雷达后向散射强度 (图 39)。

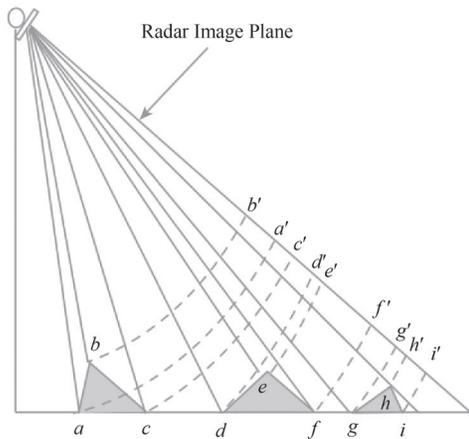


图 38 雷达图像上的几何畸变

Fig. 38 Geometric distortion in radar image

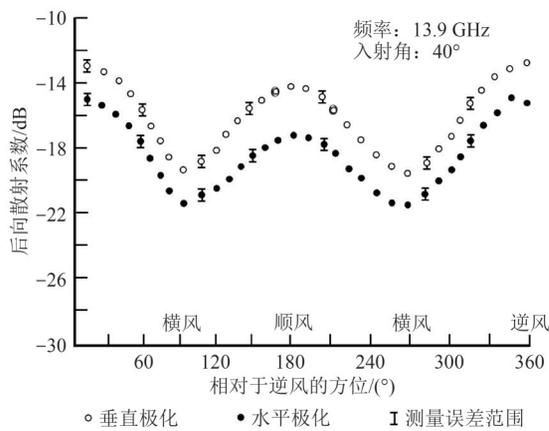


图 39 后向散射系数随雷达视线方向与风向差异的变化  
Fig. 39 Variation of backscatter coefficient with the difference between radar looking direction and wind direction

当雷达观察方向与风向一致时 (顺风), 风速会增强海面小尺度波浪的形成, 这些波浪通常与雷达波长相匹配, 通过布拉格散射机制反射雷达波, 产生较强的后向散射信号, 尤其是当雷达的入射角较小时, 回波强度增加更显著。

当雷达观察方向与风向相反时 (逆风), 散射情况与顺风类似, 因为逆风也会增强与雷达波相匹配的海面波浪形成, 同样会导致较强的后向散射信号。

当雷达观察方向与风向垂直时 (横风), 海面散射的特征与顺风或逆风情况相比明显不同, 横向风生成的海面波浪无法与雷达波相位匹配, 难以引起有效的布拉格散射, 从而减弱了后向散射强度。

通过理解、分析和校正角度效应, 可以提高微波遥感数据的应用范围和反演精度, 在海洋、植被和地形监测中发挥重要作用。

### 3.4 邻近效应

邻近效应是指在一定遥感成像模式下地物间空间结构的异质性分布, 使得不同地物间形成入瞳交叉辐射, 即非目标像元对目标像元辐射贡献, 它受地物间空间分布和遥感观测模式的双重影响。荧光与可见短波红外谱段的辐射传输路径与成像机制基本一致, 因此邻近效应类似, 而激光雷达的成像机制决定了邻近效应很弱, 下面主要针对可见短波红外、中长波红外、微波开展邻近效应研究分析。

#### 3.4.1 可见—短波红外辐射

邻近效应是指遥感中非目标像元对目标像元辐射量的贡献, 又称大气的交叉辐射效应, 主要源于大气分子和气溶胶的多次散射效应。图 40 展示了因大气散射引起的邻近效应。

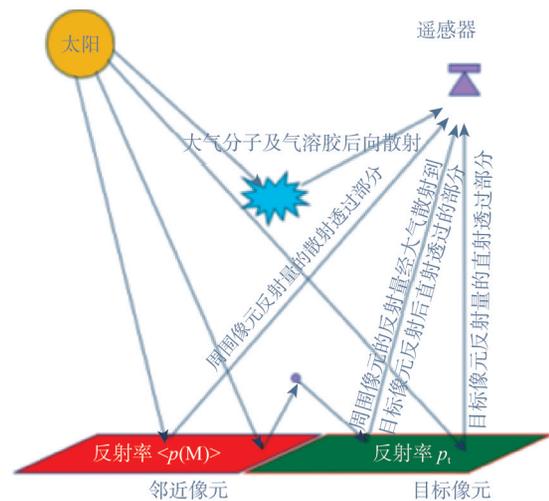


图 40 可见—短波红外因大气散射引起的邻近效应  
Fig. 40 The adjacent effect due to atmospheric scattering in the VIS-NIR bands

早在遥感发展的早期, 因大气散射造成的邻近像元效应就开始受到关注, Otterman 和 Fraser (1979) 利用单次散射方法发展了卫星垂直观测条件下邻近效应的解析解, Kaufman (1984) 利用三维 Monte Carlo 方法评估邻近效应对 MTF 的影响以及图像实际分辨率退化效果, 当图像分辨率高于 1 km 时必须充分考虑邻近效应在大气校正中的影

响 (Lyapustin 和 Kaufman, 2001), 并且分辨率越高效应越显著。

图 41 展示了 1 m 分辨率航空高光谱数据经过邻近效应校正前后, 灰色和白色靶标地表反射率的差异, 未经邻近效应校正的反射率出现了明显偏差。

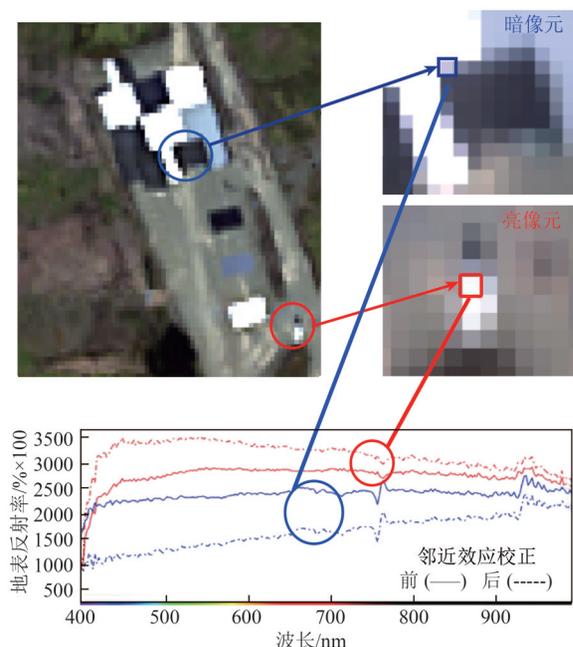


图 41 航空高光谱图像邻近效应校正前后的地表反射率对比

Fig. 41 Comparison of surface reflectance in the airborne hyperspectral remote sensing image before and after adjacent effect correction

因此, 邻近效应会造成图像模糊, 降低图像对比度和信噪比。在可见—短波红外区间, 由于大气造成的邻近像元效应随波长增加而减小, 这也是人们从近红外或者短波红外波段图像中观测到不同类型地物分界线更加清晰的原因之一。

包含邻近效应的环境反射率  $\langle \rho_s \rangle$  常常形式化表达如下:

$$\langle \rho_s \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} F(r(x, y)) \rho(x, y) dx dy \quad (13)$$

式中,  $x, y$  分别是以目标位置为中心的坐标值,  $F(r)$  是大气点扩散函数, 也即位置  $(x, y)$  处像元反射率的权重值, 通常与距离目标的距离成反比。

无论从辐射信息模拟, 还是大气校正或者遥感器在轨 MTF 传递函数评估, 准确计算邻近像元效应十分关键。尽管三维辐射传输模拟能够准确邻近效应, 但解算过程极其耗时, 常常采用经验公式或者近似过程来表达。

在 MTF 计算方面, Liang 等 (2001) 利用 SHDOM (Spectral Harmonics Discrete Ordinary Method) 辐射传输模型建立的用于邻近效应计算的方程, 通过分析目标像元反射率、气溶胶和背景像元至目标像元距离三者的定量化关系, 得出经验方程。采用刃边法进行 MTF 计算时, 需要考虑邻近效应造成的图像模糊, 直接采用原始图像或者未考虑邻近效应的大气校正后图像进行 MTF 评估将明显低估遥感器真实 MTF 值。图 42 表明, 气溶胶光学厚度从 0.1 变化到 0.6 时, 未考虑邻近效应时计算的遥感图像 MTF 数值由 0.35 降低到约 0.2, 呈现明显线性变化 (李海巍等, 2015)。

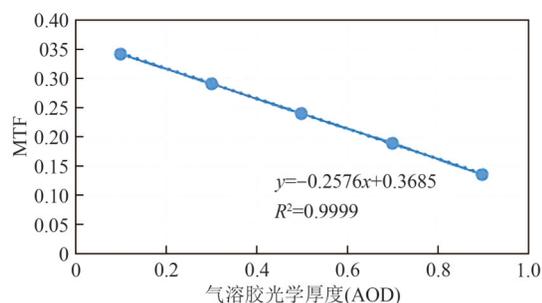


图 42 Nyquist 处 MTF 随气溶胶光学厚度的变化  
Fig. 42 Variation of MTF with AOD at Nyquist

在大气校正方面, 大部分算法假定地表为朗伯体条件, 通过迭代 1—2 次实现邻近效应校正, 但不同算法在实现时略有差异。以下举例对比 FLAASH 和 ATCOR 大气校正算法处理邻近效应的不同策略:

(1) FLAASH 软件进行大气校正时采用与 MODIS 邻近像元相似的校正过程 (Perkins 等, 2012; Vermote 等, 1997; Matthew 等, 2000), 首先按照朗伯体条件假定计算得到地表反射率  $\rho_s^{ae}$ , 然后按照 21 个像元窗口大小的低通滤波计算得到环境反射率  $\langle \rho_s \rangle$ , 进而得到目标像元反射率  $\rho_s$ :

$$\rho_s = \frac{\rho_s^{ae} T(\mu_v) - \langle \rho_s \rangle t_d(\mu_v)}{e^{-\tau \mu_v}} \quad (14)$$

$$\langle \rho_s \rangle = \sum_{j=-10}^{10} \sum_{i=-10}^{10} F(r(i, j)) \rho_s^{ae}(i, j) \quad (15)$$

式中,  $T, t_d, \tau$  分别为上行总透过率、上行散射透过率和总光学厚度。

这个过程仅仅迭代 1 次计算得到目标像元反射率, 为进一步加快整体处理效率, 点扩散函数以查找表形式实现存储下来, 减少上述公式中复杂的浮点运算。

(2) ATCOR 软件将上述点扩散函数表达为与目标像元距离  $r$  呈负指数衰减的形式, 并在通常情况下将影响范围  $r$  设定在 0.5—1 Km:

$$\rho_s = \rho_s^{ac} + q(\rho_s^{ac} - \sum_{i=1}^{n_g} \overline{\rho_s^{ac}(\tau)} w(i)) \quad (16)$$

$$w(i) = W(i) / \sum_{i=1}^{n_g} W(i) \quad (17)$$

$$W(i) \approx \int_{r_{i-1}}^{r_i} (2r)^2 e^{-r} dr \quad (18)$$

式中,  $\overline{\rho_s^{ac}(\tau)}$  是指在距离目标像元某个同心环上的平均反射率,  $n_g$  通常最大值为 5,  $q$  是散射透过率与直射透过率比值。

尽管上述权重函数与距离呈指数衰减关系, 由于邻近效应在整个辐射量中属于次要影响, 在实际中采用与距离无关的算术平均方式, 在大多数情况下两种方式的误差很小 (Richter, 1997)。

严格意义上讲, 从包含邻近效应的卫星表观反射率得到未知像元自身反射率的过程属于第二类积分方程求解问题, 大多数遥感领域的研究人员往往采用以上处理思路, 未从数学角度考虑这类问题的严格求解和收敛问题。对此, Sei (2015) 分析了该问题在高分辨率应用中的 Neumann 序列的解析解和 Padé 近似解, 发现 Padé 近似解方法能够在各类大气条件下 (高到低能见度) 高度接近解析解, 通过引入 FFT 策略能够进一步提升 5—6 倍计算效率。

### 3.4.2 中长波红外辐射

热红外辐射的邻近效应表现为大气和地物三维结构两个方面。大气的散射作用导致相邻像元的交叉辐射项贡献, 可以通过大气点扩散函数来描述, 对于 3—5  $\mu\text{m}$  的中波热红外辐射而言比较显著 (Yang 等, 2009), 对于大于 5  $\mu\text{m}$  的长波热红外辐射而言, 大气散射作用较弱, 一般可以忽略不计。

从辐射传输的角度分析, 传感器在地物反照率不均匀的朗伯表面上方接收到辐射时, 接收到的辐射除了目标像元的原有影响, 包括目标像元发射、反射大气下行辐射以及大气上行辐射直接到达传感器, 还包括邻近像元的影响有: (1) 背景像元发射的辐射及其与大气多次辐射相互作用通过大气的漫射透射减弱后到达传感器, (2) 背景像元发射的辐射及其多次相互作用被目标像元反射

后通过大气的直接透射减弱到达传感器, (3) 大气下行辐射被背景像元反射及其多次相互作用后通过大气的漫射透射减弱到达传感器, (4) 大气下行辐射被背景像元反射及其多次相互作用后再被目标像元反射通过大气的直接透射减弱到达传感器。这些辐射分量共同构成了传感器接收到的总辐射信号。对于高分辨率经过合并, 非均匀朗伯表面的热红外辐射传输方程可以表示为 (Duan 等, 2020; Sanders 等, 2001)。

$$L_{\text{TOA}} = \varepsilon_s B(T_s) \tau_{\text{dir}} + \varepsilon_b B(T_{bs}) \tau_{\text{dir}} + ((1 - \varepsilon_s) \tau_{\text{dir}} + (1 - \varepsilon_b) \tau_{\text{dir}}) L_{\text{ad}} + L_{\text{au}} \quad (19)$$

$$\varepsilon_b = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \varepsilon_{bg}(x, y) \text{PSF}(x, y) dx dy \quad (20)$$

$$B(T_{bs}) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} B(T_{bg}, x, y) \text{PSE}(x, y) dx dy \quad (21)$$

式中,  $L_{\text{TOA}}$  表示卫星接收到的辐亮度;  $\varepsilon_s$  和  $T_s$  分别表示目标像元的地表发射率和地表温度,  $B(T_s)$  是目标像元在温度  $T_s$  下的黑体辐射;  $\tau_{\text{dir}}$  和  $\tau_{\text{dir}}$  分别是地面到传感器路径上的大气直接透射率和漫射透射率;  $L_{\text{ad}}$  和  $L_{\text{au}}$  分别是大气下行辐射和上行辐射;  $\varepsilon_b$  和  $B(T_{bs})$  分别是背景像元的有效地表发射率和黑体辐射, 它们被定义为背景像元的地表发射率/黑体辐射与大气点扩散函数 (PSF) 的卷积。

另一方面, 对具有三维结构和复杂地形的遥感像元而言, 随着空间分辨率的提高, 相邻像元红外辐射会直接作用到目标像元, 引起显著的邻近像元效应。这是由于地物的出射辐射是地物的自身发射特性, 在复杂的场景, 特别是在城市区域, 邻近建筑由于自身温度高、发射辐射强, 且目标像元的发射率低, 造成传感器观测辐射受到邻近像元的影响较大。

### 3.4.3 微波辐射与后向散射

在自然场景中, 许多散射体 (如森林、粗糙表面) 的集合比离散点状物体更常见。在这种情况下, 雷达信号是发射脉冲与场景微波反射率的距离分布的卷积, 表现为显著的邻近效应。因此, 理解所有散射体的贡献如何叠加非常重要。电磁波是根据它们的振幅和相对相位叠加, 而不是脉冲的包络。不相干模型基础分解的一般原理是将一个极化矩阵分解为一组基本散射模型的总和。以相干矩阵为例, 基本散射模型包括体散射 ( $T_{\text{vol}}$ )、双反射散射 ( $T_{\text{dbl}}$ )、奇次反射散射 ( $T_{\text{odd}}$ ) 和螺旋

散射 ( $T_{hel}$ )。在实践中, 体散射可以代表来自内部含有许多基本散射体的区域 (如植被冠层和冰) 的散射机制。双反射散射表示由地面—墙结构和地面—树干互动形成的二面角反射。奇次反射散射可以描述来自粗糙表面 (如草地和海洋) 的单次散射, 以及来自地面—墙—地面和地面—树干—地面结构的三次反射。螺旋散射适用于反射不对称条件, 在复杂形状目标和建筑区域等异质区域中有效 (Chen 等, 2014)。分解框架可以表示为

$$T = f_v T_{vol} + f_d T_{dbl} + f_s T_{odd} + f_c T_{hel} + \dots, \quad (22)$$

式中,  $f_v$ 、 $f_d$ 、 $f_s$ 、 $f_c$  均为模型系数。

对于某些分解, 模型组件的数量是可调的。通过确定每个组件的功率, 可以了解散射机理, 从而进一步探索应用。

体散射通常由一群具有特定方向角  $\theta$  定义的基本散射体模型化。体散射的相干矩阵是通过与概率密度函数 (PDF)  $p(\theta)$  积分获得的, 通常可以表达为:

$$T_{vol} = \int_0^{2\pi} T(\theta) p(\theta) d\theta = \begin{bmatrix} a & d & e \\ d^* & b & f \\ e^* & f^* & c \end{bmatrix} \quad (23)$$

双反射散射基本上是通过二面角角反射器的散射来模型化的, 例如地面—墙结构和地面—树干互动, 其中反射器表面可以由不同的介电材料制成。对应的相干矩阵为 (Lee 等, 2017)

$$T_{dbl} = \begin{bmatrix} |\alpha|^2 & \alpha & 0 \\ \alpha^* & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (24)$$

式中,  $\alpha$  是复数值且  $|\alpha| < 1$ 。

奇次反射散射通过布拉格表面散射模型来表示, 适用于去极化效应和交叉极化分量可以忽略不计的稍粗糙表面。对应的相干矩阵为

$$T_{odd} = \begin{bmatrix} 1 & \beta^* & 0 \\ \beta & |\beta|^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (25)$$

式中,  $|\beta| < 1$  且  $\beta$  在大多数自然表面上是实数值。

螺旋散射 (Yamaguchi 等, 2005) 用于适应反射不对称条件, 如在建筑密集区域。对应的相干矩阵为

$$T_{hel} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \pm j \\ 0 & \mp i & 1 \end{bmatrix} \quad (26)$$

总之, 理解不同散射机制对雷达信号的贡献, 可以更准确识别地物特性和变化, 并在植被生物量估计和土壤湿度反演等定量遥感应用中获取更准确的信息。

对于被动微波辐射计, 地表特定区域的辐射温度会受到周围地物的热辐射影响, 尤其在水体与陆地等不同地物具有显著热属性差异时。

### 3.5 传递效应

传递效应是指包括地物的电磁波到达遥感器入瞳处进入遥感器系统后, 信号传输、光电转换、数字化记录等过程引起的成像质量变化。荧光辐射进入遥感器后的成像过程与可见短波红外波段基本一致, 因此传递效应类似, 下面主要针对可见短波红外反射、激光回波、中长波红外辐射、微波辐射与后项散射开展邻近效应研究分析。

#### 3.5.1 可见—短波红外辐射

到达遥感器入瞳处的辐亮度, 进入遥感器系统后通常经过前置光学系统后被光谱分光系统分解成不同波长的谱信号, 然后被光电探测器接收并转变成电信号, 实现光电转换, 最后通过模数转换记录成为 DN 信号, 如图 43 所示。

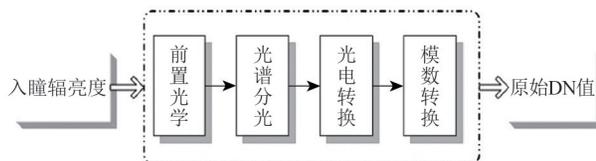


图 43 遥感器成像主要过程

Fig. 43 Imaging flow inside the imager

光谱分光方式包括滤光型、色散型、干涉型等。常用色散器件包括色散棱镜、衍射光栅, 光栅有平面透射光栅、平面反射光栅、凹面反射光栅等。干涉型是测量不同光程差下的干涉信息并对其傅里叶变换处理得到光谱分布 (相里斌 等, 2009)。棱镜和干涉型分光时各波段的光谱分辨率 (以波长为单位) 随波长位置而变化, 可见科学化设计论证波段设置时需要结合光谱分光模式进行。

空间成像方面, 主要有摆扫、推扫、框幅等形式。摆扫式由扫描镜的左右摆扫与平台的沿轨运动来实现二维空间成像, 可大视场成像获取宽幅数据, 但不同位置像元空间分辨率有较大变化, 而且由于像元凝视时间较短载荷性能难以大幅提

升(童庆禧等, 2006)。推扫式基于面阵探测器获得一维空间信息同时基于平台沿轨推扫对另一维(列方向)空间成像。其凝视时间长可大幅提高系统灵敏度和信噪比, 但受探测器影响幅宽相对较小。框幅式一般使用面阵探测器依次记录二维空间的各波段图像数据, 该方式不适宜观测快速变化目标。

光电转换是基于探测器将光辐射转换为电信号, 并基于电子学系统实现模数转换记录为数字信号。探测器重要参数有像元数、像元尺寸、填充因子、量子效率、响应线性度、可探测最小辐射功率等。

传感器成像系统进行信号传输过程中改变能量值之外, 还会产生MTF空间响应退化并引入杂光、畸变或噪声等。其中, 光学系统主要是能量衰减、MTF退化以及图像几何畸变; 探测器主要是光谱空间调制与响应积分、MTF退化、噪声和几何畸变等; 电子学系统主要是信号采样衰减、MTF退化、噪声引入以及量化等。

可见, 传感器系统设计及器件性能密切影响了图像数据质量。在整个传感器集成后, 需要进行实验室、星上和场地进行几何、光谱、辐射等方面定标和验证工作, 实现各类误差的溯源、不确定评估和图像质量评价(Gao等, 2013; Li等, 2015a, 2017; Zhang等, 2018; 张兵等, 2020b; Cui等, 2023; Zhang等, 2023)。因此, 在系统几何校正、光谱辐射校正必须结合系统特点开展, 而相似传感器间会存在系统性差异, 多源数据综合应用时必须开展归一化。

激光遥感探测系统通常通过发射一束窄而强大的激光, 经过光路设计使其具有一定的聚光能力和扩散角度。激光被定向到目标物体上, 通过接收器对反射或散射的光信号进行检测, 从而获得物体表面的几何形状和材质特性。激光遥感探测系统受探测距离和激光雷达的发射功率、探测模式(如: 盖格模式、光子探测等)、接收光学口径、发射频率等差异的影响, 在超远距离激光雷达探测方面激光光斑存在较大的差异(如星载激光雷达ICESAT2的激光光斑可达数十米)。由于上述因素的影响, 不同的激光雷达探测系统在三维探测成像的分辨率和精度方面存在显著差异, 对地物解译的质量具有直接的影响。

### 3.5.2 中长波红外辐射

中长波红外遥感器的成像过程与可见光—短波红外类似, 但由于中长波红外波段的特性, 其成像和光谱分光过程需要特殊设计和考虑。分光原理基于目标物体发出的不同波长的红外辐射, 利用光栅和滤光片等光学器件对这些辐射进行分离和探测, 使探测器能够识别特定波段的辐射信号。红外探测器经历了从单元探测器、线阵、单色焦平面阵列(FPA)到多色FPA的发展(Martyniuk等, 2014), 典型探测器包括碲镉汞(HgCdTe)和量子阱红外探测器(QWIP), 它们具备高灵敏度, 但通常需要制冷以降低噪声并提高信噪比。

在成像方式上, 中长波红外遥感器主要采用推扫、摆扫和圆扫成像, 适用于不同的空间探测需求(Wang等, 2024)。线阵探测器通过平台的运动逐行扫描地表, 适合宽幅成像, 而焦平面阵列探测器则具备更高的灵敏度, 尽管成像幅宽较窄, 但非常适合高精度侦察和早期预警。未来的红外成像系统将通过多波段(如短波和长波红外)联合应用, 进一步提升空间、时间和光谱分辨率。

由于中长波红外系统易受到背景热辐射的影响, 信号容易衰减, 杂光和热辐射噪声对成像质量影响显著。降低工作温度是减少暗电流噪声和背景辐射的重要方法, 能显著提高探测器的灵敏度和工作范围。在空间观测系统中, 将探测器冷却至极低温(如40 K)可以有效提升中长波红外系统的探测精度和距离(Rogalski, 2011; Sclar, 1984)。

### 3.5.3 微波辐射与后向散射

在合成孔径雷达中, 调制传递函数是从成像系统的传感器、信号处理链以及成像算法等各个方面共同作用的结果, 用来描述系统对细节特征的响应能力, 即系统对空间频率的传递能力。它衡量了SAR系统对地面场景中不同尺度细节的记录能力, 通常表现为从点扩散函数PSF(Point Spread Function)或线扩散函数LSF(Line Spread Function)衍生出的频率响应曲线。同时, 如果MTF在成像过程中不均匀或不稳定, 可能导致图像中的几何畸变, 影响对观测地物形状和大小的精确重建。

与所有其他相干成像系统的输出类似, 雷达图像的特征是散斑或“椒盐”纹理形式的噪声,

这种颗粒状噪声是由每个SAR分辨率单元内发生的多次散射回波产生的随机相长和相消干涉引起的。斑点噪声是分辨率单元内许多小的基本散射体重辐射信号的叠加直接导致的（Ferretti等，2007）。SAR图像中的斑点会降低图像分割和分类的有效性，使图像解译问题复杂化。为了减轻噪声的有害影响，主要采用空间滤波（Lee等，1994a；Rio等，2000）或多视处理（Lee等，1994b，1999）来抑制它。

星载微波辐射计通过天线接收地球的微波辐射计，然后采用高低端定标源对接收机输出的数字信号进行定标获得微波辐射亮温。在信号接收端，星载微波辐射计的主天线对地球微波辐射的接收会受到天线特性影响。主天线溢出会导致实际接收到的地球辐射偏低。此外，采用主天线的自身辐射被馈源接收到造成实际接收到的地球辐射偏高。在信号处理过程中，星载微波辐射计定标源的不确定性会引起定标结果的误差。例如，冷空天线溢出会导致地球辐射或卫星平台辐射进入馈源造成实际观测的亮温值大于太空背景辐射。太空环境中的因素，如高轨道通信卫星的信号干扰和星体辐射干扰，都会对地球微波辐射的接收与处理产生影响。此外，卫星平台稳定性、平台的波束遮挡等多种因素也会干扰星载微波辐射计的信号传递。

#### 4 遥感基础研究的意义与重要性

遥感观测中的地物辐射、光谱、时相特性以及尺度、大气、角度、邻近、传递效应等基础性科学问题，是遥感科学机理研究的核心内容，这涉及了地表环境特性、大气状况、遥感器性能、观测平台及电磁波的作用。对遥感科学问题的深入研究构成了遥感科学技术及其应用的基础，并为推动其持续创新提供了坚实的理论支撑。

遥感基础研究也是新型遥感载荷论证的基础。比如，卫星图像模拟仿真就是模拟地物辐射、光谱、时相特性以及尺度、大气、角度、邻近、传递效应，也是遥感器指标论证优化的基础手段。它是通过对太阳—大气—地表遥感辐射传输过程数字化建模来模拟生成卫星观测的辐亮度图像数据，并结合数据应用能力评价分析来实现指标参数的迭代优化。面向矿物应用，Li等（2015b）以遥感器SNR为关键核心指标，开展了指标系列组

合下的图像模拟，通过信息提取与效能评估提出了指标优化方案，矿物信息提取精度相对Hyperion平均提高21.7%（Li等，2015b）。Landsat 8卫星研制初期就利用图像模拟软件DIRSIG进行了热红外遥感器TIRS在轨后数据的预测模拟，通过分析系统性能指标对图像质量的影响发现，TIRS MTF的退化可能会引起1.05 K的温度误差，而且抖动会引起调制传递函数（MTF）降低超过2%，基于这一分析促进了遥感器系统改进冷却器阻尼方案（Schott等，2012）。

遥感科学针对地表环境自身特性以及遥感器观测效应方面辐射传输机理的深入研究，发展和完善典型地物在不同尺度上的多谱段辐射传输模型，是遥感数据处理、信息反演与量化应用的理论依据（柳钦火等，2019）。例如，地表可见—短波谱段的双向反射率分布（BRDF）建模，是地表反照率、叶面积指数等参量定量反演的算法基础（柳钦火等，2019）。热红外辐射尺度效应和方向性建模的研究，可以显著提高地表上行长波辐射的估算精度（Hu等，2023）。基于微波相互作用机理模型的发展，可以改进从微波遥感数据中反演定量参数如土壤湿度、植被生物量和大气属性的算法（Ji等，2024；Mladenova等，2014；Tanase等，2014）。有学者系统回顾经典辐射传输理论与电磁学Maxwell方程的联系，试图从基础物理学进一步改进辐射传输这种“唯象”过程（吴自华等，2023）。

了解电磁波与地物、大气圈层以及遥感器平台间的相互作用，是定量反演地表参数的重要基础。例如，只有充分认知大气成分、气溶胶、云层对电磁波的衰减和散射效应以及对于图像质量的影响，才可以更加精确地校正这些影响，提高地表参数反演精度。Liu等（2019）通过分析大气辐射传输对基于塔式的日光诱导叶绿素荧光（SIF）观测的下行辐射和上行辐射的影响，提出了基于塔式SIF观测O<sub>2</sub>-A波段的大气校正操作方案。微波遥感的基础科学研究也推动了定量遥感发展、开拓了更多应用领域，例如用微波遥感技术测量森林的高度（Lee等，2018），估算农作物的种植面积和预测产量（Periasamy和Ravi，2024）等。

随着航天航空技术的快速发展，海量、多源、异构的遥感数据迅猛增长，以智能信息提取为特征的遥感大数据逐渐成为遥感科学与技术发展前

沿方向(张兵, 2017)。人工智能与地学知识有效结合的一个重要趋势是充分利用地学知识, 强调在对地理环境和实体对象认知的基础上, 设计相应的模型和算法。这种思路认为人工智能系统不应该只是基于输入信息的基本单元(如像素矩阵)进行处理, 而是应该加入更加丰富的结构化元素和表征, 以及对应的算法, 从而更好地理解外部世界(张兵等, 2022)。通过构建多模态遥感大数据驱动和知识引导下的智能化遥感信息处理、反演与推测体系, 充分挖掘遥感数据价值并提升其应用水平, 可以更有效地服务国家战略需求(熊巨华等, 2023)。针对遥感科学基础问题的研究可以加深对数据特性的理解, 以便使用人工智能技术时可更加充分利用先验知识, 从而设计更符合遥感机理的模型与方法, 提高对遥感数据的信息挖掘和智能提取能力。例如, 针对依赖于多元化训练样本的深度学习泛化能力, 数据不仅需要场景变化, 还需要考虑观测几何、大气条件、传感器平台等差异引起的数据特性变化, 为此 Han 等(2017)等利用物理驱动的模拟软件 DIRSIG 开展成像条件变化的数据生成, 为深度学习算法训练高效生成多样化的图像块。微波遥感数据的生成与多种物理过程密切相关, 包括信号的极化特性、散射机制、以及与地表及大气的相互作用, 研究人员基于深度卷积神经网络(CNN)框架, 提出了一种新的 SAIR 成像方法, 在图像质量、计算效率和噪声抑制等方面与传统的手工傅里叶变换和稀疏正则化重构成像方法相比具有优势(Zhang 等, 2019b)。在多模态数据方面, 深刻理解光学、激光雷达、荧光、合成孔径雷达等不同数据源的特点和限制, 可以更有效地进行多模态数据融合, Maimaitijiang 等(2020)利用高空间、多光谱和热红外数据, 在冠层光谱、结构、热学和纹理特征, 在输入级特征融合、中间级特征融合的基础上, 采用深度神经网络开展大豆粮食产量预测。

## 5 结 语

作为交叉一级学科的遥感科学与技术, 其理论发展对推动遥感科学的系统化和规范化具有重要意义。遥感科学侧重于研究遥感现象和规律, 地物的辐射特性、波谱特性和时相特性是其核心内容。遥感技术以遥感科学为理论基础支撑的实践手段, 将遥感科学知识转化为实际应用的工具。

在遥感技术领域, 各种传感器、遥感平台、数据处理算法等技术手段的发展, 也可促进遥感科学和应用研究手段的革新, 从而实现对地球表面的全面观测和监测, 为环境保护、资源管理、灾害监测等提供支持(张兵等, 2016), 是实施可持续发展战略的重要技术支撑(徐冠华等, 2016)。可见, 遥感科学和遥感技术密不可分、二者相互促进、相互依赖。遥感科学的发展为遥感技术的进步奠定了理论基础, 而遥感技术的不断创新也为遥感科学研究提供了更多可能性和工具。

在遥感科学与技术的快速发展中, 基础研究的重要性不言而喻。站在从模型驱动到数据驱动科学范式的转变的背景下, 遥感科学的研究显得愈发重要和复杂。本文提出的3大特性与5大效应的理论框架为遥感数据获取、处理和应用提供了方向性的指导。随着遥感技术的不断进步, 不仅需要深入理解遥感数据的物理和数学基础, 还必须充分挖掘数据背后的潜在信息, 提升其在实际应用中的效能。为此, 将遥感领域的专业知识融入深度学习, 构建一个多模态遥感大数据驱动和知识引导下的智能化遥感信息处理、反演与推测体系, 将成为提升遥感科学应用水平的关键。

遥感作为一门综合性学科, 研究范围广泛, 涉及到传感器性能、大气条件、地物分布及观测平台尺度等多个复杂因素。在传统的遥感研究中, 虽然已有相当多的工作专注于单因素的机理性研究, 但综合考虑多个因素耦合的基础研究仍显不足。特别是在遥感辐射传输过程中, 不同因素的复杂耦合关系使得对全谱段、全天候、全链路、空天地人多尺度平台及多类型地物交错分布因素的理解变得尤为重要(熊巨华等, 2023)。

为了应对这些挑战, 需要建立一个系统完善的多因素耦合的遥感辐射传输基础理论体系。这一体系不仅需要整合遥感物理模型和地学知识, 还需要融入人工智能方面的新技术, 以构建更为精准和高效的遥感数据处理和信息提取的框架。

随着新型航空航天遥感载荷和系统的不断涌现和发展, 遥感科学的基础研究将迎来新的机遇和挑战。这些新型遥感系统将具有更丰富的遥感物理特征捕捉、更高分辨率的数据获取、更宽广和高频次的地表观测以及更强的数据实时处理能力, 能够及时获得更加详尽和全面的遥感信息。然而, 这也要求在数据处理和分析的过程中, 能

够建立更为先进的算法、技术和系统,通过智能解译有效处理由此产生的更加复杂和庞大的数据集。因而,定量遥感与人工智能的结合,将会成为未来发展的重要方向。通过这种数理、信息、地球等科学的更深层次交叉融合,不仅能够提高数据的解析精度,还能够海量数据中迅速识别出关键信息,从而为各种应用场景提供更为精准的技术支撑。

此外,未来的遥感基础研究还需要关注遥感数据在不同应用场景中的实际需求。例如,在环境监测、资源管理、灾害预警等领域,遥感数据的应用将直接影响到决策的科学性和及时性。为了更好地服务国家战略需求,需要不断提升遥感数据的应用水平,将遥感数据的价值充分挖掘出来。这不仅需要加强基础理论研究,还需要在技术应用方面进行创新和突破。通过构建多模态遥感大数据驱动和知识引导下的智能化遥感信息处理体系,能够实现更为高效和精准的遥感数据应用,为国家的环境保护、资源管理和应急响应提供强有力的支持。

总之,遥感基础问题的研究在遥感科学与技术的发展中发挥着至关重要的作用。未来,需要在深入理解遥感物理机理的基础上,结合先进的人工智能技术,推进遥感科学的前沿研究发展,提升遥感技术的应用水平,以更好地满足不断增长的国家战略需求。在不同学科的深度交叉与融合越来越深入的背景下,遥感科学与技术也必将为地球系统的科学认知和可持续发展提供强有力的科技支持。

## 参考文献(References)

- Ackerman S A, Smith W L, Revercomb H E and Spinhirne J D. 1990. The 27—28 October 1986 FIRE IFO cirrus case study: spectral properties of cirrus clouds in the 8—12  $\mu\text{m}$  window. *Monthly Weather Review*, 118(11): 2377-2388 [DOI: 10.1175/1520-0493(1990)118<2377:Toficc>2.0.Co;2]
- Agati G, Mazzinghi P, Fusi F and Ambrosini I. 1995. The F685/F730 chlorophyll fluorescence ratio as a tool in plant physiology: response to physiological and environmental factors. *Journal of Plant Physiology*, 145(3): 228-238 [DOI: 10.1016/S0176-1617(11)81882-1]
- Awange J L and Kyalo Kiema J B. 2013. *Microwave remote sensing// Environmental Geoinformatics: Monitoring and Management*. Berlin, Heidelberg: Springer: 133-144 [DOI: 10.1007/978-3-642-34085-7]
- Ben-Dor E, Schläpfer D, Plaza A J and Malthus T. 2013. *Hyperspectral remote sensing//Wendisch M and Brenguier J L, eds. Airborne Measurements for Environmental Research: Methods and Instruments*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH and Co. KGaA: 413-456 [DOI: 10.1002/9783527653218.ch8]
- Berry J A, Frankenberg C, Wennberg P, Baker I, Bowman K W, Castro-Contreas S, Cendrero-Mateo M P, Damm A, Drewry D and Ehlmann B. 2012. New methods for measurement of photosynthesis from space. *Geophysical Research Letters*, 38(17): L17706[https://doi.org/10.26206/9NJP-CG56]
- Bian Z J, Cao B, Li H, Du Y M, Fan W J, Xiao Q and Liu Q H. 2021a. The effects of tree trunks on the directional emissivity and brightness temperatures of a leaf-off forest using a geometric optical model. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 59(6): 5370-5386 [DOI: 10.1109/TGRS.2020.3011157]
- Bian Z J, Cao B, Li H, Du Y M, Lagouarde J P, Xiao Q and Liu Q H. 2018. An analytical four-component directional brightness temperature model for crop and forest canopies. *Remote Sensing of Environment*, 209: 731-746 [DOI: 10.1016/j.rse.2018.03.010]
- Bian Z J, Du Y M, Li H, Cao B, Huang H G, Xiao Q and Liu Q H. 2017. Modeling the temporal variability of thermal emissions from row-planted scenes using a radiosity and energy budget method. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 55(10): 6010-6026 [DOI: 10.1109/TGRS.2017.2719098]
- Bian Z J, Fan T Y, Roujean J L, Wang D D, Irvine M, Wu S B, Cao B, Li H, Du Y M, Xiao Q and Liu Q H. 2024. An analytical urban temperature model with building heterogeneity using geometric optical theory. *Remote Sensing of Environment*, 301: 113948 [DOI: 10.1016/j.rse.2023.113948]
- Bian Z, Roujean J L, Lagouarde J P, Cao B, Li H, Du Y, Liu Qiang, Xiao Q and Liu Qinhuo. 2020. A semi-empirical approach for modeling the vegetation thermal infrared directional anisotropy of canopies based on using vegetation indices. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 160: 136-148 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2019.12.004]
- Bian Z J, Roujean J L, Cao B, Du Y M, Li H, Gamet P, Fang J Y, Xiao Q and Liu Q H. 2021b. Modeling the directional anisotropy of fine-scale TIR emissions over tree and crop canopies based on UAV measurements. *Remote Sensing of Environment*, 252: 112150 [DOI: 10.1016/j.rse.2020.112150]
- Bian Z J, Wu S B, Roujean J L, Cao B, Li H, Yin G F, Du Y M, Xiao Q and Liu Q H. 2022. A TIR forest reflectance and transmittance (FRT) model for directional temperatures with structural and thermal stratification. *Remote Sensing of Environment*, 268: 112749 [DOI: 10.1016/j.rse.2021.112749]
- Bolten J D, Lakshmi V and Njoku E G. 2003. Soil moisture retrieval using the passive/active L- and S-band radar/radiometer. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(12): 2792-2801 [DOI: 10.1109/TGRS.2003.815401]
- Bright R M, Zhao K G, Jackson R B and Cherubini F. 2015. Quantifying surface albedo and other direct biogeophysical climate forc-

- ings of forestry activities. *Global Change Biology*, 21(9): 3246-3266 [DOI: 10.1111/gcb.12951]
- Cao B, Guo M Z, Fan W J, Xu X R, Peng J J, Ren H Z, Du Y M, Li H, Bian Z J, Hu T, Xiao Q and Liu Q H. 2018. A new directional canopy emissivity model based on spectral invariants. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 56(12): 6911-6926 [DOI: 10.1109/TGRS.2018.2845678]
- Cao B, Liu Q H, Du Y M, Roujean J L, Gastellu-Etchegorry J P, Trigo I F, Zhan W F, Yu Y Y, Cheng J, Jacob F, Lagouarde J P, Bian Z J, Li H, Hu T and Xiao Q. 2019. A review of earth surface thermal radiation directionality observing and modeling: historical development, current status and perspectives. *Remote Sensing of Environment*, 232: 111304 [DOI: 10.1016/j.rse.2019.111304]
- Cao B, Roujean J L, Gastellu-Etchegorry J P, Liu Q H, Du Y M, Lagouarde J P, Huang H G, Li H, Bian Z J, Hu T, Qin B X, Ran X T and Xiao Q. 2021. A general framework of kernel-driven modeling in the thermal infrared domain. *Remote Sensing of Environment*, 252: 112157 [DOI: 10.1016/j.rse.2020.112157]
- Che N, Choi T, Xiong X and Moyer D. 2008. MODIS along-scan direction Line Spread Function (LSF) modeling and verification using the Integration and Alignment Collimator (IAC)//Proceedings Volume 7081, Earth Observing Systems XIII. San Diego: SPIE: 64-72 [DOI: 10.1117/12.793388]
- Chen C and Yang B S. 2016. Dynamic occlusion detection and inpainting of in situ captured terrestrial laser scanning point clouds sequence. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 119: 90-107 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2016.05.007]
- Chen S W, Li Y Z, Wang X S, Xiao S P and Sato M. 2014. Modeling and interpretation of scattering mechanisms in polarimetric synthetic aperture radar: advances and perspectives. *IEEE Signal Processing Magazine*, 31(4): 79-89 [DOI: 10.1109/MSP.2014.2312099]
- Cheng J, Liang S L, Weng F Z, Wang J D and Li X W. 2010. Comparison of radiative transfer models for simulating snow surface thermal infrared emissivity. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 3(3): 323-336 [DOI: 10.1109/JSTARS.2010.2050300]
- Cheng J, Liu Q H, Li X W, Xiao Q, Liu Q and Du Y M. 2008. The correlation based mid-infrared temperature and emissivity separation algorithm. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 38(2): 261-272 (程洁, 柳钦火, 李小文, 肖青, 刘强, 杜永明. 2008. 基于相关性的热红外温度与发射率分离算法. *中国科学D辑: 地球科学*, 38(2): 261-272) [DOI: 10.1360/zd2008-38-2-261]
- Coakley J A. 2003. Reflectance and albedo, surface//Holton J R, ed. *Encyclopedia of Atmospheric Sciences*. London: Academic Press: 1914-1923 [DOI: 10.1016/B0-12-227090-8/00069-5]
- Cogliati S, Rossini M, Julitta T, Meroni M, Schickling A, Burkart A, Pinto F, Rascher U and Colombo R. 2015. Continuous and long-term measurements of reflectance and sun-induced chlorophyll fluorescence by using novel automated field spectroscopy systems. *Remote Sensing of Environment*, 164: 270-281 [DOI: 10.1016/j.rse.2015.03.027]
- Coll C, Galve J M, Niclòs R, Valor E and Barberà M J. 2019. Angular variations of brightness surface temperatures derived from dual-view measurements of the Advanced Along-Track Scanning Radiometer using a new single band atmospheric correction method. *Remote Sensing of Environment*, 223: 274-290 [DOI: 10.1016/j.rse.2019.01.021]
- Conel J E. 1969. Infrared emissivities of silicates: experimental results and a cloudy atmosphere model of Spectral emission from condensed particulate mediums. *Journal of Geophysical Research*, 74(6): 1614-1634 [DOI: 10.1029/JB074i006p01614]
- Cui Z Z, Ma C, Zhang H, Hu Y H, Yan L, Dou C Y and Li X M. 2023. Vicarious radiometric calibration of the multispectral imager onboard SDGSAT-1 over the dunhuang calibration site, China. *Remote Sensing*, 15(10): 2578 [DOI: 10.3390/rs15102578]
- Dai L Y, Che T, Ding Y J and Hao X H. 2017. Evaluation of snow cover and snow depth on the Qinghai-Tibetan Plateau derived from passive microwave remote sensing. *The Cryosphere*, 11(4): 1933-1948 [DOI: 10.5194/tc-11-1933-2017]
- Derrien M, Lavanant L and Le Gléau H. 1988. Retrieval of the cloud top temperature of semi-transparent clouds with AVHRR//Proceedings of the IRS. Lille: [s.n.]: 199-202
- Dickinson R E. 1995. Land processes in climate models. *Remote Sensing of Environment*, 51(1): 27-38 [DOI: 10.1016/0034-4257(94)00062-R]
- Du S S, Liu L Y, Liu X J, Zhang X, Zhang X Y, Bi Y M and Zhang L C. 2018. Retrieval of global terrestrial solar-induced chlorophyll fluorescence from TanSat satellite. *Science Bulletin*, 63(22): 1502-1512 [DOI: 10.1016/j.scib.2018.10.003]
- Duan S B, Li Z L, Gao C X, Zhao W, Wu H, Qian Y G, Leng P and Gao M F. 2020. Influence of adjacency effect on high-spatial-resolution thermal infrared imagery: implication for radiative transfer simulation and land surface temperature retrieval. *Remote Sensing of Environment*, 245: 111852 [DOI: 10.1016/j.rse.2020.111852]
- Escorihuela M J, Chanzy A, Wigneron J P and Kerr Y H. 2010. Effective soil moisture sampling depth of L-band radiometry: a case study. *Remote sensing of Environment*, 114(5): 995-1001 [DOI: 10.1016/j.rse.2009.12.011]
- Fan T Y, Wen J G, Jiao Z H, Bian Z J, Zhong S Y, Zhu W Z, Cao B, Li H, Du Y M, Xiao Q and Liu Q H. 2024. Modeling the topographic effect on directional anisotropies of land surface temperature from thermal remote sensing. *Journal of Remote Sensing*, 4: 0226 [DOI: 10.34133/remotesensing.0226]
- Ferretti A., Andrea M.G., Prati C., Rocca Fabio. 2007. *InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation*, TM-19, European Space Agency, The Netherlands, 250 p.
- Fournier A, Daumard F, Champagne S, Ounis A, Goulas Y and Moya I. 2012. Effect of canopy structure on sun-induced chlorophyll fluorescence. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 68: 112-120 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2012.01.003]
- Frankenberg C, Berry J, Guanter L and Joiner J. 2013. Remote sensing of terrestrial chlorophyll fluorescence from space. *SPIE Newsroom*, 2-5 [DOI: 10.1117/2.1201302.004725]
- Gao L R, Du Q, Zhang B, Yang W and Wu Y F. 2013. A comparative study on linear regression-based noise estimation for hyperspec-

- tral imagery. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 6(2): 488-498 [DOI: 10.1109/JSTARS.2012.2227245]
- Guanter L, Aben I, Tol P, Krijger J M, Hollstein A, Köhler P, Damm A, Joiner J, Frankenberg C and Landgraf J. 2015. Potential of the TROPospheric Monitoring Instrument (TROPOMI) onboard the Sentinel-5 Precursor for the monitoring of terrestrial chlorophyll fluorescence. *Atmospheric Measurement Techniques*, 8(3): 1337-1352 [DOI: 10.5194/amt-8-1337-2015]
- Guanter L, Frankenberg C, Dudhia A, Lewis P E, Gómez-Dans J, Kuze A, Suto H and Grainger R G. 2012. Retrieval and global assessment of terrestrial chlorophyll fluorescence from GOSAT space measurements. *Remote Sensing of Environment*, 121: 236-251 [DOI: 10.1016/j.rse.2012.02.006]
- Guanter L, Zhang Y G, Jung M, Joiner J, Voigt M, Berry J A, Frankenberg C, Huete A R, Zarco-Tejada P, Lee J E, Moran M S, Ponce-Campos G, Beer C, Camps-Valls G, Buchmann N, Gianelle D, Klumpp K, Cescatti A, Baker J M and Griffis T J. 2014. Global and time-resolved monitoring of crop photosynthesis with chlorophyll fluorescence. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111(14): E1327-E1333 [DOI: 10.1073/pnas.1320008111]
- Guo L N, Zheng H X, Wu Y H, Fan L X, Wen M X, Li J S, Zhang F F, Zhu L P and Zhang B. 2022. An integrated dataset of daily lake surface water temperature over the Tibetan Plateau. *Earth System Science Data*, 14(7): 3411-3422 [DOI: 10.5194/essd-14-3411-2022]
- Han S H, Fafard A, Kerekes J, Gartley M, Ientilucci E, Savakis A, Law C, Parhan J, Turek M, Fieldhouse K and Rovito T. 2017. Efficient generation of image chips for training deep learning algorithms// *Proceedings Volume 10202, Automatic Target Recognition XXVII*. Anaheim: SPIE: 15-23 [DOI: 10.1117/12.2261702]
- Han Y, Wen J G, Xiao Q, Bao Y F, Chen X, Liu Q and He M. 2023. Review of the land surface BRDF inversion methods based on remotely sensed satellite data. *National Remote Sensing Bulletin*, 27(9): 2024-2040 (韩源, 闻建光, 肖青, 鲍云飞, 陈曦, 刘强, 贺敏. 2023. 陆表二向反射(BRDF)反演方法研究进展. *遥感学报*, 27(9): 2024-2040) [DOI: 10.11834/jrs.20231188]
- Han Z, Gao L, Zhang B, Sun X and Li Q. 2020. Nonlinear hyperspectral unmixing algorithm based on deep autoencoder networks. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 24(4): 388-400 (韩竹, 高连如, 张兵, 孙旭, 李庆亭. 2020. 高分五号高光谱图像自编码网络非线性解混. *遥感学报*, 24(4): 388-400) [DOI: 10.11834/jrs.20209188]
- Hapke B. 2012. Bidirectional reflectance spectroscopy 7. *Icarus*, 221(2): 1079-1083 [DOI: 10.1016/j.icarus.2012.10.022]
- Höfle B and Pfeifer N. 2007. Correction of laser scanning intensity data: data and model-driven approaches. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 62(6): 415-433 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2007.05.008]
- Hu F C. 2007. *The Atmospheric Properties over Taihu Lake Jointly Remote Sensed from MODIS and Sun Photometer Data*. Beijing: Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences (胡方超. 2007. 基于MODIS与太阳光度计联合遥感太湖地区大气特性. 北京: 中国科学院遥感应用研究所)
- Hu T, Roujean J, Cao B, Mallick K, Boulet G, Li H, Xu Z H, Du Y M and Liu Q H. 2023. Correction for LST directionality impact on the estimation of surface upwelling longwave radiation over vegetated surfaces at the satellite scale. *Remote Sensing of Environment* 295:113649,[DOI: 10.1016/j.rse.2023.113649]
- Ji W Z, Chen Y H, Gao H and Xia H P. 2024. A retrieval algorithm for passive microwave-based land surface temperature considering spatiotemporal soil moisture and land scenarios. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 17: 15651-15670 [DOI: 10.1109/JSTARS.2024.3432770]
- Joiner J, Guanter L, Lindstrot R, Voigt M, Vasilkov A P, Middleton E M, Huemmrich K F, Yoshida Y and Frankenberg C. 2013. Global monitoring of terrestrial chlorophyll fluorescence from moderate-spectral-resolution near-infrared satellite measurements: methodology, simulations, and application to GOME-2. *Atmospheric Measurement Techniques*, 6(10): 2803-2823 [DOI: 10.5194/amt-6-2803-2013]
- Kaufman Y J. 1984. Atmospheric effect on spatial resolution of surface imagery: errata. *Applied Optics*, 23(22): 4164-4172 [DOI: 10.1364/AO.23.004164]
- Köhler P, Frankenberg C, Magney T S, Guanter L, Joiner J and Landgraf J. 2018. Global retrievals of solar-induced chlorophyll fluorescence with TROPOMI: first results and intersensor comparison to OCO-2. *Geophysical Research Letters*, 45(19): 10456-10463 [DOI: 10.1029/2018GL079031]
- Konings A G, Rao K and Steele-Dunne S C. 2019. Macro to micro: microwave remote sensing of plant water content for physiology and ecology. *New Phytologist*, 223(3): 1166-1172 [DOI: 10.1111/nph.15808]
- Korhonen L, Korpela I, Heiskanen J and Maltamo M. 2011. Airborne discrete-return LIDAR data in the estimation of vertical canopy cover, angular canopy closure and leaf area index. *Remote Sensing of Environment*, 115(4): 1065-1080 [DOI: 10.1016/j.rse.2010.12.011]
- Krieger G, Moreira A, Fiedler H, Hajnsek I, Werner M, Younis M and Zink M. 2007. TanDEM-X: a satellite formation for high-resolution SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45(11): 3317-3341 [DOI: 10.1109/TGRS.2007.900693]
- Kustas W P, Norman J M, Anderson M C and French A N. 2003. Estimating subpixel surface temperatures and energy fluxes from the vegetation index-radiometric temperature relationship. *Remote Sensing of Environment*, 85(4): 429-440 [DOI: 10.1016/S0034-4257(03)00036-1]
- Lagouarde J P and Irvine M. 2008. Directional anisotropy in thermal infrared measurements over Toulouse city centre during the CAPITOUL measurement campaigns: first results. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 102(3-4): 173-185 [DOI: 10.1007/s00703-008-0325-4][Lakhankar T, Krakauer N and Khanbilvardi R. 2009. Applications of microwave remote sensing of soil moisture for agricultural applications. *International Journal of Terraspace Science*

- and Engineering, 2(1): 81-91
- Lasko K, Vadrevu K P, Tran V T and Justice C. 2018. Mapping double and single crop paddy rice with Sentinel-1A at varying spatial scales and polarizations in Hanoi, Vietnam. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 11(2): 498-512 [DOI: 10.1109/JSTARS.2017.2784784]
- Lee J S, Grunes M R and De Grandi G. 1999. Polarimetric SAR speckle filtering and its implication for classification. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 37(5): 2363-2373 [DOI:10.1109/36.789635]
- Lee J S, Jurkevich L, Dewaele P, Wambacq P and Oosterlinck A. 1994a. Speckle filtering of synthetic aperture radar images: a review. *Remote Sensing Reviews*, 8(4): 313-340 [DOI: 10.1080/02757259409532206]
- Lee J S, Miller A R and Hoppel K W. 1994b. Statistics of phase difference and product magnitude of multi-look processed Gaussian signals. *Waves in Random Media*, 4(3): 307-319 [DOI: 10.1088/0959-7174/4/3/006]
- Lee J S and Pottier E. 2017. *Polarimetric Radar Imaging: From Basics to Applications*. Boca Raton: CRC Press [DOI: 10.1201/9781420054989]
- Lee W J and Lee C W. 2018. Forest canopy height estimation using multiplatform remote sensing dataset. *Journal of Sensors*, 2018: 1593129 [DOI: 10.1155/2018/1593129]
- Letu H, Ma R, Nakajima T Y, Shi C, Hashimoto M, Nagao T M, Baran A J, Nakajima T, Xu J, Wang T X, Tana G, Bilige S, Shang H Z, Chen L F, Ji D B, Lei Y H, Wei L S, Zhang P, Li J, Li L, Zheng Y, Khatri P and Shi J C. 2023. Surface solar radiation compositions observed from *Himawari-8/9* and Fengyun-4 series. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 104(10): E1772-E1789 [DOI: 10.1175/BAMS-D-22-0154.1]
- Letu H, Nakajima T Y, Wang T X, Shang H Z, Ma R, Yang K, Baran A J, Riedi J, Ishimoto H, Yoshida M, Shi C, Khatri P, Du Y H, Chen L F and Shi J C. 2022. A new benchmark for surface radiation products over the East Asia-Pacific region retrieved from the *Himawari-8/AHI* next-generation geostationary satellite. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 103(3): E873-E888 [DOI: 10.1175/BAMS-D-20-0148.1]
- Li H, Liu Q H, Yang Y K, Li R B, Wang H S, Cao B, Bian Z J, Hu T, Du Y M and Sun L. 2019. Comparison of the MuSyQ and MODIS collection 6 land surface temperature products over barren surfaces in the Heihe River Basin, China. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 57(10): 8081-8094 [DOI: 10.1109/TGRS.2019.2918259]
- Li H, Sun D L, Yu Y Y, Wang H Y, Liu Y L, Liu Q H, Du Y M, Wang H S and Cao B. 2014. Evaluation of the VIIRS and MODIS LST products in an arid area of Northwest China. *Remote Sensing of Environment*, 142: 111-121 [DOI: 10.1016/j.rse.2013.11.014]
- Li H, Wang H, Yang Y, Du Y, Cao B, Bian Z and Liu Q. 2019. Evaluation of Atmospheric Correction Methods for the ASTER Temperature and Emissivity Separation Algorithm Using Ground Observation Networks in the HiWATER Experiment. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 57(5): 3001-3014 [DOI: 10.1109/TGRS.2018.2879316]
- Li H W, Zhang H, Chen Z C and Yuan J. 2015a. MTF computing method of remote sensing image after removing the effects of atmospheric adjacency effect. *Acta Optica Sinica*, 35(3): 0328002 (李海巍, 张浩, 陈正超, 原娟. 2015a. 去除大气邻近效应影响的遥感图像 MTF 计算方法. *光学学报*, 35(3): 0328002) [DOI: 10.3788/AOS201535.0328002]
- Li H W, Zhang H, Zhang B, Chen Z C, Yang M H and Zhang Y Q. 2015b. A method suitable for vicarious calibration of a UAV hyperspectral remote sensor. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 8(6): 3209-3223 [DOI: 10.1109/JSTARS.2015.2416213]
- Li J S, Hu C M, Shen Q, Barnes B B, Murch B, Feng L, Zhang M W and Zhang B. 2017. Recovering low quality MODIS-Terra data over highly turbid waters through noise reduction and regional vicarious calibration adjustment: a case study in Taihu Lake. *Remote Sensing of Environment*, 197: 72-84 [DOI: 10.1016/j.rse.2017.05.027]
- Li Q T, Gao L R, Zhang W J and Zhang B. 2015b. Requirements and optimization of sensor parameters for mineral extraction//2015 7th Workshop on Hyperspectral Image and Signal Processing: Evolution in Remote Sensing (WHISPERS). Tokyo: IEEE: 1-4 [DOI: 10.1109/WHISPERS.2015.8075467]
- 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, Strahler A H and Friedl M A. 1999. A conceptual model for effective directional emissivity from nonisothermal surfaces. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 37(5): 2508-2517 [DOI: 10.1109/36.789646]
- 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, 王祎婷. 2013. 定量遥感尺度效应刍议. *地理学报*, 68(9): 1163-1169) [DOI: 10.11821/dlxb201309001]
- Li Z L, Tang B H, Wu H, Ren H Z, Yan G J, Wan Z M, Trigo I F and Sobrino J A. 2013. Satellite-derived land surface temperature: current status and perspectives. *Remote Sensing of Environment*, 131: 14-37 [DOI: 10.1016/j.rse.2012.12.008]
- Li Z L, Wu H, Duan S B, Zhao W, Ren H Z, Liu X Y, Leng P, Tang R L, Ye X, Zhu J S, Sun Y W, Si M L, Liu M, Li J H, Zhang X, Shang G F, Tang B H, Yan G J and Zhou C H. 2023. Satellite remote sensing of global land surface temperature: definition, methods, products, and applications. *Reviews of Geophysics*, 61(1): e2022RG000777 [DOI: 10.1029/2022RG000777]
- Liang S. 2005. *Quantitative Remote Sensing of Land Surfaces*. New York: John Wiley and Sons
- Liang S, Fang H and Chen M. 2001. Atmospheric correction of Landsat ETM+ land surface imagery. I. Methods. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(11): 2490-2498 [DOI: 10.

- 1109/36.964986]
- Lichtenthaler H K and Miehe J A. 1997. Fluorescence imaging as a diagnostic tool for plant stress. *Trends in Plant Science*, 2(8): 316-320 [DOI: 10.1016/S1360-1385(97)89954-2]
- Lichtenthaler H K and Rinderle U. 1988. The role of chlorophyll fluorescence in the detection of stress conditions in plants. *CRC Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 19(S1): S29-S85 [DOI: 10.1080/15476510.1988.10401466]
- Liu L Y. 2021. *Hyperspectral Remote Sensing of Vegetation*. Wuhan: Hubei Science and Technology Press (刘良云. 2021. 植被高光谱遥感. 武汉: 湖北科学技术出版社)
- Liu L Y, Liu X J, Wang Z H and Zhang B. 2016. Measurement and analysis of bidirectional SIF emissions in wheat canopies. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 54(5): 2640-2651 [DOI: 10.1109/tgrs.2015.2504089]
- Liu Q H, CAO B, Zeng Y L, Li J, Du Y M, Wen J G, Fan W J, Zhao J and Yang L. 2016. Recent progresses on the remote sensing radiative transfer modeling over heterogeneous vegetation canopy. *National Remote Sensing Bulletin* 20 (5): 933-945 [DOI: 10.11834/jrs.20166280.]
- Liu Q H, Li X W and Chen L F. 2002. Field campaign for quantitative remote sensing in Beijing. Paper presented at the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium [DOI: 10.1109/IGARSS.2002.1027109]
- Liu X J, Guanter L, Liu L Y, Damm A, Malenovsky Z, Rascher U, Peng D L, Du S S and Gastellu-Etchegorry J P. 2019. Downscaling of solar-induced chlorophyll fluorescence from canopy level to photosystem level using a random forest model. *Remote Sensing of Environment*, 231: 110772 [DOI: 10.1016/j.rse.2018.05.035]
- Liu X J, Guo J, Hu J C and Liu L Y. 2019. Atmospheric Correction for Tower-Based Solar-Induced Chlorophyll Fluorescence Observations at O2-A Band. *Remote Sensing*, 11 (3): 355 [DOI: 10.3390/rs11030355]
- Liu X J and Liu L Y. 2014. Assessing band sensitivity to atmospheric radiation transfer for space-based retrieval of solar-induced chlorophyll fluorescence. *Remote Sensing*, 6(11): 10656-10675 [DOI: 10.3390/rs61110656]
- Liu X J and Liu L Y. 2015. Improving chlorophyll fluorescence retrieval using reflectance reconstruction based on principal components analysis. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 12(8): 1645-1649 [DOI: 10.1109/LGRS.2015.2417857]
- Liu X J, Liu L Y, Hu J C, Guo J and Du S S. 2020. Improving the potential of red SIF for estimating GPP by downscaling from the canopy level to the photosystem level. *Agricultural and Forest Meteorology*, 281: 107846 [DOI: 10.1016/j.agrformet.2019.107846]
- Lyapustin A I and Kaufman Y J. 2001. Role of adjacency effect in the remote sensing of aerosol. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D11): 11909-11916 [DOI: 10.1029/2000jd900647]
- Ma J H, Zhang W J, Marinoni A, Gao L R and Zhang B. 2018. An improved spatial and temporal reflectance unmixing model to synthesize time series of landsat-like images. *Remote Sensing*, 10(9): 1388 [DOI: 10.3390/rs10091388]
- Maimaitijiang M, Sagan V, Sidike P, Hartling S, Esposito F and Fritsch F B. 2020. Soybean yield prediction from UAV using multimodal data fusion and deep learning. *Remote Sensing of Environment*, 237: 111599 [DOI: 10.1016/j.rse.2019.111599]
- Marceau D J and Hay G J. 1999. Remote sensing contributions to the scale issue. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 25(4): 357-366 [DOI: 10.1080/07038992.1999.10874735]
- Markham K, Frazier A E, Singh K K and Madden M. 2023. A review of methods for scaling remotely sensed data for spatial pattern analysis. *Landscape Ecology*, 38(3): 619-635 [DOI: 10.1007/s10980-022-01449-1]
- Martyniuk P, Antoszewski J, Martyniuk M, Faraone L and Rogalski A. 2014. New concepts in infrared photodetector designs. *Applied Physics Reviews*, 1(4): 041102 [DOI: 10.1063/1.4896193]
- Matthew M W, Adler-Golden S M, Berk A, Richtsmeier S C, Levine R Y, Bernstein L S, Acharya P K, Anderson G P, Felde G W, Hoke M L, Ratkowski A J, Burke H H K, Kaiser R D and Miller D P. 2000. Status of atmospheric correction using a MODTRAN4-based algorithm//Proceedings Volume 4049, Algorithms for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery VI. Orlando: SPIE: 199-207 [DOI: 10.1117/12.410341]
- Miller J, Berger M, Goulas Y, Jacquemond S, Loius J, Mohammed G, Moise N, Moreno J, Moya I, Pedrós R, Verhoef W and Zarco-Tejada P. 2005. Development of a vegetation fluorescence canopy model. ESA Scientific and Technical Publications Branch, ESTEC
- Mladenova I E, Jackson T J, Njoku E, Bindlish R, Chan S, Cosh M H, Holmes T R H, de Jeu R A M, Jones L, Kimball J, Paloscia S and Santi E. 2014. Remote monitoring of soil moisture using passive microwave-based techniques — Theoretical basis and overview of selected algorithms for AMSR-E. *Remote Sensing of Environment*, 144: 197-213 [DOI: 10.1016/j.rse.2014.01.013]
- Nagel E. 1979. *The Structure of Science: Problems in the Logic of Scientific Explanation*. 2nd ed. Indianapolis: Hackett Publishing Company, Inc
- Nakajima T Y, Ishida H, Nagao T M, Hori M, Letu H, Higuchi R, Tamaru N, Imoto N and Yamazaki A. 2019. Theoretical basis of the algorithms and early phase results of the GCOM-C (Shikisai) SGLI cloud products. *Progress in Earth and Planetary Science*, 6: 52 [DOI: 10.1186/s40645-019-0295-9]
- Nicodemus F E. 1965. Directional reflectance and emissivity of an opaque surface. *Applied Optics*, 4(7): 767-775 [DOI: 10.1364/AO.4.000767]
- Nicodemus F E, Richmond J C, Hsia J J, Ginsberg I W and Limperis T. 1977. *Geometrical Considerations and Nomenclature for Reflectance*. Washington: National Bureau of Standards
- Noilhan J and Calvet J C. 1995. Mesoscale land-atmosphere models and usefulness of microwave remote-sensing data//Choudhury B J, Kerr Y H, Njoku E G and Pampaloni P, eds. *Passive Microwave Remote Sensing of Land-Atmosphere Interactions*. [s. l.]: De Gruyter: 17-54 [DOI: 10.1515/9783112319307-006]
- Otterman J and Fraser R S. 1979. Adjacency effects on imaging by surface reflection and atmospheric scattering: cross radiance to ze-

- nith. *Applied Optics*, 18(16): 2852-2860 [DOI: 10.1364/AO.18.002852]
- Ouyang Z T, Sciusco P, Jiao T, Feron S, Lei C, Li F, John R, Fan P L, Li X, Williams C A, Chen G Z, Wang C H and Chen J Q. 2022. Albedo changes caused by future urbanization contribute to global warming. *Nature Communications*, 13(1): 3800 [DOI: 10.1038/s41467-022-31558-z]
- Peake W. H., and T. L. Oliver. 1971. The Response of Terrestrial Surfaces at Microwave Frequencies. Ohio State University Technical Report AFAL-TR-70-301 [DOI: 10.21236/ad0884106]
- Pedrés R, Goulas Y, Jacquemoud S, Louis J and Moya I. 2010. FluorMODleaf: a new leaf fluorescence emission model based on the PROSPECT model. *Remote Sensing of Environment*, 114(1): 155-167 [DOI: 10.1016/j.rse.2009.08.019]
- Periasamy S and Ravi K P. 2024. An integrated approach to investigate surface and root zone salinity from multispectral and microwave remote sensing techniques. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 21(11): 7565-7580 [DOI: 10.1007/s13762-024-05513-y]
- Perkins T, Adler-Golden S M, Matthew M W, Berk A, Bernstein L S, Lee J and Fox M. 2012. Speed and accuracy improvements in FLAASH atmospheric correction of hyperspectral imagery. *Optical Engineering*, 51(11): 111707 [DOI: 10.1117/1.OE.51.11.111707]
- Porcar-Castell A, Tyystjärvi E, Atherton J, Van Der Tol C, Flexas J, Pfündel E E, Moreno J, Frankenberg C and Berry J A. 2014. Linking chlorophyll *a* fluorescence to photosynthesis for remote sensing applications: mechanisms and challenges. *Journal of Experimental Botany*, 65(15): 4065-4095 [DOI: 10.1093/jxb/eru191]
- Qi M J, Liu X J, Du S S, Guan L L, Chen R N and Liu L Y. 2023. Improving the estimation of canopy fluorescence escape probability in the near-infrared band by accounting for soil reflectance. *Remote Sensing*, 15(18): 4361 [DOI: 10.3390/rs15184361]
- Qin B X, Cao B, Roujean J L, Gastellu-Etchegorry J P, Ermida S L, Bian Z J, Du Y M, Hu T, Li H, Xiao Q, Chen S S and Liu Q H. 2023. A thermal radiation directionality correction method for the surface upward longwave radiation of geostationary satellite based on a time-evolving kernel-driven model. *Remote Sensing of Environment*, 294: 113599 [DOI: 10.1016/j.rse.2023.113599]
- Rautiainen K, Lemmetyinen J, Schwank M, Kontu A, Ménard C B, Mätzler C, Drusch M, Wiesmann A, Ikonen J and Pulliainen J. 2014. Detection of soil freezing from L-band passive microwave observations. *Remote sensing of Environment*, 147: 206-218 [DOI: 10.1016/j.rse.2014.03.007]
- Reichstein M, Camps-Valls G, Stevens B, Jung M, Denzler J, Carvalhais N and Prabhat. 2019. Deep learning and process understanding for data-driven Earth system science. *Nature*, 566(7743): 195-204 [DOI: 10.1038/s41586-019-0912-1]
- Reynolds D W and Vonder Haar T H. 1977. A bispectral method for cloud parameter determination. *Monthly Weather Review*, 105(4): 446-457 [DOI: 10.1175/1520-0493(1977)105<0446:ABMFCP>2.0.CO;2]
- Richter R. 1997. Correction of atmospheric and topographic effects for high spatial resolution satellite imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 18(5), 1099-1111. [DOI: https://doi.org/10.1080/014311697218593]
- Rio J N R and Lozano-García D F. 2000. Spatial filtering of radar data (RADARSAT) for wetlands (brackish marshes) classification. *Remote sensing of Environment*, 73(2): 143-151 [DOI: 10.1016/S0034-4257(00)00089-4]
- Rogalski A. 2011. Recent progress in infrared detector technologies. *Infrared Physics and Technology*, 54(3): 136-154 [DOI: 10.1016/j.infrared.2010.12.003]
- Rossov W B and Schiffer R A. 1999. Advances in understanding clouds from ISCCP. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 80(11): 2261-2288 [DOI: 10.1175/1520-0477(1999)080<2261:AIUCFI>2.0.CO;2]
- Sanders L C, Schott J R and Raqueño R. 2001. A VNIR/SWIR atmospheric correction algorithm for hyperspectral imagery with adjacency effect. *Remote Sensing of Environment*, 78(3): 252-263 [DOI: 10.1016/S0034-4257(01)00219-X]
- Sandven S and Johannessen O M. 1993. The use of microwave remote sensing for sea ice studies in the Barents Sea. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 48(1): 2-18 [DOI: 10.1016/0924-2716(93)90002-5]
- Savtchenko A, Ouzounov D, Ahmad S, Acker J, Leptoukh G, Koziana J and Nickless D. 2004. Terra and Aqua MODIS products available from NASA GES DAAC. *Advances in Space Research*, 34(4): 710-714 [DOI: 10.1016/j.asr.2004.03.012]
- Schmetz J, Holmlund K, Hoffman J, Strauss B, Mason B, Gaertner V, Koch A and Van de Berg L. 1993. Operational cloud-motion winds from meteorological infrared images. *Journal of Applied Meteorology*, 32(7): 1206-1225 [DOI: 10.1175/1520-0450(1993)032<1206:OCMWFM>2.0.CO;2]
- Schott J, Gerace A, Brown S, Gartley M, Montanaro M and Reuter D C. 2012. Simulation of image performance characteristics of the landsat data continuity mission (LDCM) thermal infrared sensor (TIRS). *Remote Sensing*, 4(8): 2477-2491 [DOI: 10.3390/rs4082477]
- Sclar N. 1984. Properties of doped silicon and Germanium infrared detectors. *Progress in Quantum Electronics*, 9(3): 149-257 [DOI: 10.1016/0079-6727(84)90001-6]
- Sei A. 2015. Efficient correction of adjacency effects for high-resolution imagery: integral equations, analytic continuation, and Padé approximants. *Applied Optics*, 54(12): 3748-3758 [DOI: 10.1364/AO.54.003748]
- Seto K C, Güneralp B and Hutyra L R. 2012. Global forecasts of urban expansion to 2030 and direct impacts on biodiversity and carbon pools. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 109(40): 16083-16088 [DOI: 10.1073/pnas.1211658109]
- Shang H Z, Letu H, Xu R, Wei L S, Wu L X, Shao J Q, Nagao T M, Nakajima T Y, Riedi J, He J and Chen L F. 2024. A hybrid cloud detection and cloud phase classification algorithm using classic threshold-based tests and extra randomized tree model. *Remote*

- Sensing of Environment, 30(2): 113957 [DOI: 10.1016/j.rse.2023.113957]
- Shao J Q, Letu H, Ri X, Tana G, Wang T X and Shang H Z. 2023. Estimation of surface downward longwave radiation and cloud base height based on infrared multichannel data of Himawari-8. *Atmosphere*, 14(3): 493 [DOI: 10.3390/atmos14030493]
- Shi J C, Du Y, Du J Y, Jiang L M, Chai L N, Mao K B, Xu P, Ni W J, Xiong C, Liu Q, Liu C Z, Guo P, Cui Q, Li Y Q, Chen J, Wang A Q, Luo H J and Wang Y H. 2012. Progresses on microwave remote sensing of land surface parameters. *Science China Earth Sciences*, 55(7): 1052-1078 [DOI: 10.1007/s11430-012-4444-x]
- Shi S, Song S L, Gong W, Du L, Zhu B and Huang X. 2015. Improving backscatter intensity calibration for multispectral LiDAR. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 12(7): 1421-1425 [DOI: 10.1109/LGRS.2015.2405573]
- Smith W L and Frey R. 1990. On cloud altitude determinations from high resolution interferometer sounder (HIS) observations. *Journal of Applied Meteorology*, 29(7): 658-662 [DOI: 10.1175/1520-0450(1990)029<0658:OCADFH>2.0.CO;2]
- Smorenburg K, Courreges-Lacoste G B, Berger M, Buschman C, Court A J, Del Bello U, Langsdorf G, Lichtenthaler H K, Sioris C, Stoll M P and Visser H. 2002. Remote sensing of solar-induced fluorescence of vegetation//*Proceedings Volume 4542, Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology III*. Toulouse: SPIE: 178-190 [DOI: 10.1117/12.454193]
- Soenen S A, Peddle D R and Coburn C A. 2005. SCS+C: a modified sun-canopy-sensor topographic correction in forested terrain. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 43(9): 2148-2159 [DOI: 10.1109/TGRS.2005.852480]
- Su Y, Xu R, Gao L, 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]
- Szejwach G. 1982. Determination of semi-transparent cirrus cloud temperature from infrared radiances: application to METEOSAT. *Journal of Applied Meteorology*, 21(3): 384-393 [DOI: 10.1175/1520-0450(1982)021<0384:DOSTCC>2.0.CO;2]
- Tanase M A, Panciera R, Lowell K, Tian S Y, Hacker J M and Walker J P. 2014. Airborne multi-temporal L-band polarimetric SAR data for biomass estimation in semi-arid forests. *Remote Sensing of Environment*, 145: 93-104 [DOI: 10.1016/j.rse.2014.01.024]
- Tian G L. 2006. *Thermal Remote Sensing*. Beijing: Publishing House of Electronics Industry (田国良. 2006. *热红外遥感*. 北京: 电子工业出版社)
- Tong Q X. 1994. Advance in remote sensing science and technology. *Acta Geographica Sinica*, 49(S1): 616-624 (童庆禧. 1994. 遥感科学技术进展. *地理学报*, 49(S1): 616-624) [DOI: 10.11821/xb1994S1005]
- Tong Q X, Zhang B and Zhang L F. 2006. *Hyperspectral Remote Sensing: Principles, Techniques, and Applications*. Beijing: Higher Education Press (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)
- Van Der Tol C, Verhoef W, Timmermans J, Verhoef A and Su Z. 2009. An integrated model of soil-canopy spectral radiances, photosynthesis, fluorescence, temperature and energy balance. *Biogeosciences*, 6(12): 3109-3129 [DOI: 10.5194/bg-6-3109-2009]
- Van Zyl J and Kim Y. 2011. *Synthetic Aperture Radar Polarimetry*. New York: John Wiley and Sons [DOI: 10.1002/9781118116104]
- 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, Justice C O, Kaufman Y J, Privette J L, Remer L, Roger J C and Tanré D. 1997. Atmospheric correction of visible to middle-infrared EOS-MODIS data over land surfaces: background, operational algorithm and validation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 102(D14): 17131-17141 [DOI: 10.1029/97JD00201]
- Vermote E F and Saleous N. 2006. Operational atmospheric correction of MODIS visible to middle infrared land surface data in the case of an infinite lambertian target//Qu J J, Gao W, Kafatos M, Murphy R E and Salomonson V V, eds. *Earth Science Satellite Remote Sensing: Vol. 1: Science and Instruments*. Berlin: Springer: 123-153 [DOI: 10.1007/978-3-540-37293-6\_8]
- Wang H S, Xiao Q, Li H, Du Y M and Liu Q H. 2015. Investigating the impact of soil moisture on thermal infrared emissivity using ASTER data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 12(2): 294-298 [DOI: 10.1109/LGRS.2014.2336912]
- Wang H S, Yu Y Y, Yu P and Liu Y L. 2020. Land surface emissivity product for NOAA JPSS and GOES-R missions: methodology and evaluation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 58(1): 307-318 [DOI: 10.1109/TGRS.2019.2936297]
- Wang S L, Li J S, Zhang B, Shen Q, Zhang F F and Lu Z Y. 2016. A simple correction method for the MODIS surface reflectance product over typical inland waters in China. *International Journal of Remote Sensing*, 37(24): 6076-6096 [DOI: 10.1080/01431161.2016.1256508]
- Wang Y Y, Li J D, Sun H Z and Li X. 2024. A review on the developments and space applications of mid- and long-wavelength infrared detection technologies. *Frontiers of Information Technology and Electronic Engineering*, 25(8): 1031-1056 [DOI: 10.1631/FITEE.2300218]
- Wen J G, Liu Q, Xiao Q, Liu Q H, You D Q, Hao D L, Wu S B and Lin X W. 2018. Characterizing land surface anisotropic reflectance over rugged terrain: a review of concepts and recent developments. *Remote Sensing*, 10(3): 370 [DOI: 10.3390/rs10030370]
- Wieneke S, Ahrends H, Damm A, Pinto F, Stadler A, Rossini M and Rascher U. 2016. Airborne based spectroscopy of red and far-red sun-induced chlorophyll fluorescence: implications for improved estimates of gross primary productivity. *Remote Sensing of Environment*, 184: 654-667 [DOI: 10.1016/j.rse.2016.07.025]
- Woodcock C E and Strahler A H. 1987. The factor of scale in remote

- sensing. *Remote sensing of Environment*, 21(3): 311-332 [DOI: 10.1016/0034-4257(87)90015-0]
- Wu L S, Zhang Y G, Zhang Z Y, Zhang X K, Wu Y F and Chen J M. 2024. Deriving photosystem-level red chlorophyll fluorescence emission by combining leaf chlorophyll content and canopy far-red solar-induced fluorescence: possibilities and challenges. *Remote Sensing of Environment*, 304: 114043 [DOI: 10.1016/j.rse.2024.114043]
- Wu R, Zhang C J, Zhu Y H, Liu N Y, Shen Y Q, Xu B B, Shi X R, Li D C and Zhou B. 1992. Research on Distinguishing indices of Stress Plants Using Characteristics of Fluorescence Spectra. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 1992, (S1):68-73 (吴荣, 张崇静, 朱永豪, 刘南英, 沈玉其, 徐彬彬, 石晓日, 李德成, 周斌. 1992. 应用荧光光谱特征作受害植物判别指标的研究. *遥感学报*, (S1): 68-73)
- Wu X D, Xiao Q, Wen J G, You D Q and Hueni A. 2019. 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 H, Guo L N, Fan L X, Wen M X, Chi H J and Zhang B. 2022. Lake ice phenology of the Nam Co at Tibetan Plateau: remote sensing and modelling. *National Remote Sensing Bulletin*, 26(1): 193-200 (吴艳红, 郭立男, 范兰馨, 文梦宣, 迟皓婧, 张兵. 2022. 青藏高原纳木错湖冰物候变化遥感监测与模拟. *遥感学报*, 26(1): 193-200) [DOI: 10.11834/jrs.20221288]
- Wu Z H and Qin Q M. 2023. Radiative transfer: From phenomenology to first principles. *National Remote Sensing Bulletin*, 27(7): 1628-1641 (吴自华, 秦其明. 2023. 辐射传输: 从唯象到第一性原理. *遥感学报*, 27(7): 1628-1641) [DOI:10.11834/jrs.20222062]
- Xiang L B, Yuan Y and Lü Q B. 2009. Spectral transfer function of the Fourier transform spectral imager. *Acta Physica Sinica*, 58(8): 5399-5405 (相里斌, 袁艳, 吕群波. 2009. 傅里叶变换光谱成像仪光谱传递函数研究. *物理学报*, 58(8): 5399-5405) [DOI: 10.7498/aps.58.5399]
- Xiong J H, Wu H, Gao Y, Cai S, Liang D and Yu W P. 2023. Ten years of remote sensing science: NSFC program fundings, progress and challenges. *National Remote Sensing Bulletin*, 27(4): 821-830 (熊巨华, 吴浩, 高阳, 蔡顺, 梁丹, 于文凭. 2023. 遥感科学十年: 自然科学基金项目申请资助、研究成果与发展挑战. *遥感学报*, 27(4): 821-830) [DOI: 10.11834/jrs.20232644]
- 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 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]
- Yamaguchi Y, Kahle A B, Tsu H, Kawakami T and Pniel M. 1998. Overview of advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer (ASTER). *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(4): 1062-1071 [DOI: 10.1109/36.700991]
- Yamaguchi Y, Moriyama T, Ishido M and Yamada H. 2005. Four-component scattering model for polarimetric SAR image decomposition. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 43(8): 1699-1706 [DOI: 10.1109/TGRS.2005.852084]
- Yang G J, Liu Q H, Liu Q, Huang W J and Wang J H. 2009. Simulation of high-resolution mid-infrared (3—5  $\mu\text{m}$ ) images using an atmosphere radiative transfer analytic model. *International Journal of Remote Sensing* 30 (22): 6003-6022[DOI: 10.1080/01431160902798403]
- Yang P, Zhang S Q, Xia J, Zhang Y Y, Wang W Y and Yao T C. 2022. Occurrence of drought events at the land-atmosphere interface in Central Asia assessed via advanced microwave scanning radiometer data. *International Journal of Climatology*, 42(14): 7408-7425 [DOI: 10.1002/joc.7655]
- Yang P Q and Van Der Tol C. 2018. Linking canopy scattering of far-red sun-induced chlorophyll fluorescence with reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 209: 456-457 [DOI: 10.1016/j.rse.2018.02.029]
- Yang P Q, Liu X J, Liu Z G, Van Der Tol C and Liu L Y. 2023. The roles of radiative, structural and physiological information of sun-induced chlorophyll fluorescence in predicting gross primary production of a corn crop at various temporal scales. *Agricultural and Forest Meteorology*, 342: 109720 [DOI: 10.1016/j.agrformet.2023.109720]
- Yang X, Tang J W, Mustard J F, Lee J E, Rossini M, Joiner J, Munger J W, Kornfeld A and Richardson A D. 2015. Solar-induced chlorophyll fluorescence that correlates with canopy photosynthesis on diurnal and seasonal scales in a temperate deciduous forest. *Geophysical Research Letters*, 42(8): 2977-2987 [DOI: 10.1002/2015GL063201]
- Zarco-Tejada P J, Berni J A J, Suárez L, Sepulcre-Cantó G, Morales F and Miller J R. 2009. Imaging chlorophyll fluorescence with an airborne narrow-band multispectral camera for vegetation stress detection. *Remote Sensing of Environment*, 113 (6): 1262-1275. [DOI: 10.1016/j.rse.2009.02.016]
- Zeng Y L, Badgley G, Dechant B, Ryu Y, Chen M and Berry J A. 2019. A practical approach for estimating the escape ratio of near-infrared solar-induced chlorophyll fluorescence. *Remote Sensing of Environment*, 232: 111209 [DOI: 10.1016/j.rse.2019.05.028]
- Zhang A Z and Jia G S. 2013. Monitoring meteorological drought in semiarid regions using multi-sensor microwave remote sensing data. *Remote Sensing of Environment*, 134: 12-23 [DOI: 10.1016/j.rse.2013.02.023]
- Zhang B. 2017. Current status and future prospects of remote sensing. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 32(7): 774-784 (张兵. 2017. 当代遥感科技发展的现状与未来展望. *中国科学院院刊*, 32(7): 774-784) [DOI: 10.16418/j.issn.1000-3045.2017.07.012]
- Zhang B, Chen Z C, Peng D L, Benediktsson J A, Liu B, Zou L, Li J and Plaza A. 2019a. Remotely sensed big data: evolution in model development for information extraction [point of view]. *Proceed-*

- ings of the IEEE, 107(12): 2294-2301 [DOI: 10.1109/JPROC.2019.2948454]
- Zhang B, Huang W J, Zhang H and Ni L. 2016. The current and future situation of dynamic monitoring technology for the earth resource and environment. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 20(6): 1470-1478. (张兵, 黄文江, 张浩, 倪丽. 地球资源环境动态监测技术的现状与未来. *遥感学报*, 2016, 20(06): 1470-1478) [DOI: 10.11834/jrs.20166369]
- Zhang B, Li Q T and Zhang X. 2020a. *Hyperspectral Remote Sensing of Rocks and Minerals*. Hubei Science and Technology Press (张兵, 李庆亭, 张霞. 2020a. 岩矿高光谱遥感. 武汉: 湖北科学技术出版社)
- Zhang B, Liu Y, Zhang W J, Gao L R, Li J, Wang J and Li X. 2014. Analysis of the proportion of surface reflected radiance in mid-infrared absorption bands. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 7(6): 2639-2646 [DOI: 10.1109/JSTARS.2013.2272633]
- 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 B, Yang X M, Gao L R, Meng Y, Sun X, Xiao C C and Ni L. 2022. Geo-cognitive models and methods for intelligent interpretation of remotely sensed big data. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 51(7): 1398-1415 (张兵, 杨晓梅, 高连如, 孟瑜, 孙显, 肖晨超, 倪丽. 2022. 遥感大数据智能解译的地理学认知模型与方法. *测绘学报*, 51(7): 1398-1415) [DOI: 10.11947/j.AGCS.2022.20220279]
- Zhang B, Zhang H and Chen Z C. 2020b. *Radiometric Calibration of Optical Remote Sensing*. Beijing: Science Press (张兵, 张浩, 陈正超. 2020b. 光学遥感辐射定标. 北京: 科学出版社)
- Zhang H, Yan D C, Zhang B, Fu Z W, Li B P and Zhang S N. 2022b. An operational atmospheric correction framework for multi-source medium-high-resolution remote sensing data of China. *Remote Sensing*, 14(21): 5590 [DOI: 10.3390/rs14215590]
- Zhang H, Zhang B, Chen D M, Li J S and Zhao G N. 2013. Influence of filter band function on retrieval of aerosol optical depth from sunphotometer data. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 30(5): 929-941 [DOI: 10.1175/JTECH-D-12-00104.1]
- Zhang H, Zhang B, Chen Z C and Huang Z H. 2018. Vicarious radiometric calibration of the hyperspectral imaging microsattellites SPARK-01 and -02 over Dunhuang, China. *Remote Sensing*, 10(1): 120 [DOI: 10.3390/rs10010120]
- Zhang H, Liu T, Yan D C, Yan Y G and Cui Z Z. 2023. Cross calibration of GF-4/PMS based on MODIS over Badain Jaran Desert. *National Remote Sensing Bulletin*, 27(5): 1205-1215 (张浩, 刘涛, 闫东川, 阎跃观, 崔珍珍. 2023. 基于MODIS的GF-4/PMS遥感器交叉定标—以巴丹吉林沙漠为参考目标. *遥感学报*, 27(5): 1205-1215) [DOI: 10.11834/jrs.20221774]
- Zhang Y J, Liu L Y, Wang J H, Zhao C J and Wang R C. 2007. Detection of leaf fluorescence from reflectance using hyper-spectrometer. *Optical Technique*, 33(1): 119-121, 123 (张永江, 刘良云, 王纪华, 赵春江, 王人潮. 2007. 应用高光谱仪探测叶片反射光谱中的荧光. *光学技术*, 33(1): 119-121, 123) [DOI: 10.3321/j.issn:1002-1582.2007.01.011]
- Zhang Y L, Ren Y, Miao W, Lin Z H, Gao H and Shi S C. 2019b. Microwave SAIR imaging approach based on deep convolutional neural network. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 57(12): 10376-10389 [DOI: 10.1109/TGRS.2019.2934154]
- Zhang Z Y, Wang S H, Qiu B, Song L and Zhang Y G. 2019. Retrieval of sun-induced chlorophyll fluorescence and advancements in carbon cycle application. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 23(1): 37-52 (章钊颖, 王松寒, 邱博, 宋练, 张永光. 2019. 日光诱导叶绿素荧光遥感反演及碳循环应用进展. *遥感学报*, 23(1): 37-52) [DOI: 10.11834/jrs.20197485]
- Zhang Z Y, Zhang Y G, Zhang Q, Chen J M, Porcar-Castell A, Guanter L, Wu Y F, Zhang X K, Wang H Z, Ding D W and Li Z Y. 2020. Assessing bi-directional effects on the diurnal cycle of measured solar-induced chlorophyll fluorescence in crop canopies. *Agricultural and Forest Meteorology*, 295: 108147 [DOI: 10.1016/j.agrformet.2020.108147]
- Zhang Z Y, Zhang Y and Zhang Y G. 2023. Generating high-resolution total canopy SIF emission from TROPOMI data: algorithm and application. *Remote Sensing of Environment*, 295: 113699 [DOI: 10.1016/j.rse.2023.113699]
- Zhao F, Guo Y Q, Verhoef W, Gu X F, Liu L Y and Yang G J. 2014. A method to reconstruct the solar-induced canopy fluorescence spectrum from hyperspectral measurements. *Remote Sensing*, 6(10): 10171-10192 [DOI: 10.3390/rs61010171]
- Zhao Y S. 2003. *The Principle and Method of Analysis of Remote Sensing Principle and Application*. 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)
- Zhou Q, Zhao F S and Gao W H. 2010. Retrieval of cloud radiative properties from FY-2C satellite data. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 34(4): 827-842 (周青, 赵凤生, 高文华. 2010. 利用FY-2C卫星数据反演云辐射特性. *大气科学*, 34(4): 827-842) [DOI: 10.3878/j.issn.1006-9895.2010.04.14]
- Zi N N, Li X M, Gade M, Fu H and Min S S. 2024. Ocean eddy detection based on YOLO deep learning algorithm by synthetic aperture radar data. *Remote sensing of Environment*, 307: 114139 [DOI: 10.1016/j.rse.2024.114139]
- Zou C, Liu L Y, Du S S and Liu X J. 2022. Investigating the potential accuracy of spaceborne solar-induced chlorophyll fluorescence retrieval for 12 capable satellites based on simulation data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60: 1002913 [DOI: 10.1109/TGRS.2022.3210185]

## The core concepts and fundamental issues of remote sensing science

ZHANG Bing<sup>1,2,3</sup>, LIU Qinhua<sup>1,2,3</sup>, LI Xiaoming<sup>1</sup>, LIU Liangyun<sup>1</sup>, YANG Bisheng<sup>4</sup>, HUSI Letu<sup>1,3</sup>,  
GAO Lianru<sup>1</sup>, ZHANG Wenjuan<sup>1</sup>, ZHANG Hao<sup>1</sup>, BIAN Zunjian<sup>1,3</sup>, QI Mengjia<sup>1</sup>,  
CHEN Chi<sup>4</sup>, SHANG Huazhe<sup>1,3</sup>

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

2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

4. Wuhan University State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying Mapping and Remote Sensing, Wuhan 430072, China

**Abstract:** Since the 1960s, remote sensing science and technology has emerged as a competitive high-tech field, with major countries striving to advance their capabilities. It has become a fundamental tool for human research in the earth system science and the comprehensive application of aerospace information across multiple domains. Recently, two significant developments warrant attention: First, in 2022, the Ministry of Education of China officially recognized Remote Sensing Science and Technology as a first-level interdisciplinary discipline within the graduate education framework, thereby strengthening foundational research in remote sensing and broadening its application areas. Second, the rise of artificial intelligence technologies, particularly deep learning, has ushered in a new paradigm for data-driven analysis and application of remote sensing data. While remote sensing fundamentally belongs to the domain of electromagnetic radiation physics, the associated physical models have been indispensable for the development of quantitative remote sensing. Nevertheless, the data-driven deep learning paradigm has introduced transformative ideas and methodologies to the field. Moving forward, the synergy between physical models and artificial intelligence will undoubtedly shape the future trajectory of remote sensing research and applications. In this context, a deeper exploration of the core concepts and fundamental issues in remote sensing science is crucial for achieving significant technological breakthroughs and scientific discoveries within this discipline.

This article begins by examining the physical origins of remote sensing science, focusing on the interaction between ground objects and electromagnetic waves, which produces spectral radiation images under specific conditions. It explores the characteristics of various remote sensing methods across the electromagnetic spectrum, including solar reflected radiation in the visible to shortwave infrared remote sensing, daylight-induced chlorophyll fluorescence (SIF) remote sensing, laser remote sensing, both medium and longwave infrared remote sensing, and microwave remote sensing. The fundamental theoretical issues in remote sensing science are categorized into three primary characteristics: radiative, spectral, and temporal characteristics, along with five major effects: scale, atmospheric, angular, adjacent, and transfer effects. The former pertains to the intrinsic physical and chemical properties of ground objects within the electromagnetic spectrum, while the latter relates to factors such as imaging scale, atmospheric conditions, observation angle, and background environment. This discussion includes the expression and variation patterns of remote sensing features of land objects formed under diverse observation modes and conditions.

The radiative characteristics reflect overall difference in term of radiation across different electromagnetic bands for various land covers, closely tied to geophysical and chemical properties. The spectral characteristics of land cover manifest as variations in the intensity of reflected and emitted signals with wavelength, highlighting significant differences in absorption, reflection, and emission behaviors among different materials, known as spectral characteristics. Temporal characteristics pertain to the systematic changes in spectral reflection or emission over time, aiding in remote sensing identification or feature inversion of land cover. The scale effect refers to the changes in remote sensing observation characteristics due to variations in pixel area size, influenced by spatial resolution or point scanning density (e.g., laser scanning spot density). The atmospheric effect describes how electromagnetic waves are impacted by the absorption, scattering, and emission from atmospheric particles during remote sensing imaging, leading to radiation distortion in image data. The angular effect highlights the directional nature of the interaction between land cover and electromagnetic waves, resulting in significant anisotropic characteristics and variations in radiation values based on the angles of incident radiation, remote sensing observation, and electromagnetic wave wavelength. The adjacent effect refers to the influence of spatial structure heterogeneity among land features, which can create cross-radiation contributions from non-target pixels to target pixels, dependent on spatial distribution and remote sensing observation mode. Finally, the transfer effect encompasses the changes in imaging quality after the electromagnetic signal of the ground objects entering the remote sensing system, including the processes such as photoelectric conversion, signal transmission, and digital recording.

The review and discussion presented in this article on the fundamental issues of remote sensing science aim to deepen theoretical research in the field, particularly in the context of artificial intelligence. This exploration is intended to foster innovative methods in remote sensing technology and applications, promote the collaborative evolution of AI for Science and Science for AI in remote sensing, and encourage profound cross-disciplinary integration between remote sensing and other fields.

**Key words:** remote sensing science, electromagnetic spectrum of ground objects, radiative transfer, scale effect, angular effect, reflected radiation, emitted radiation, LiDAR, Synthetic Aperture Radar (SAR)

**Supported by** National Natural Science Foundation of China (No. 42030111, 42325104, 41930111, 42130105)