

海岸带遥感研究综述：进展、机遇和挑战

孙伟伟¹, 陈超², 付波霖³, 孟祥超⁴, 贺双颜⁵, 李东⁶, 胡亚斌⁷,
侯西勇⁶, 任广波⁷, 杨刚¹

1. 宁波大学 地理与空间信息技术系, 宁波 315211;
2. 苏州科技大学 地理科学与测绘工程学院, 苏州 215009;
3. 桂林理工大学 测绘地理信息学院, 桂林 541006;
4. 宁波大学 信息科学与工程学院, 宁波 315211;
5. 浙江大学 海洋学院, 舟山 316021;
6. 中国科学院烟台海岸带研究所, 烟台 264003;
7. 自然资源部第一海洋研究所, 青岛 266061

摘要: 海岸带是陆地、海洋、大气相互作用的地球生态关键带, 汇集了大量的物质和能量, 正经历着高强度人类活动、全球气候变化和物种入侵的叠加影响, 面临着前所未有的挑战。遥感科学与技术是全面、系统、深入监测海岸带资源、生态、环境的有效手段。本文从海岸带独特性和遥感技术优势出发, 借助 Web of Science 和 CNKI 数据库, 分析了海岸带遥感国内外研究现状, 探讨了海岸带遥感所面临的科学技术问题, 综述了研究进展, 明确了机遇与挑战, 讨论了未来发展方向。本文可为科学认识海岸带遥感中存在的问题, 把握海岸带遥感发展方向提供参考。

关键词: 海岸带遥感, 科学问题, 传感器设计, 地物与电磁波交互作用, 信息提取, 参数定量遥感反演, 多领域交叉, 机遇与挑战

中图分类号: P2

引用格式: 孙伟伟, 陈超, 付波霖, 孟祥超, 贺双颜, 李东, 胡亚斌, 侯西勇, 任广波, 杨刚. 2025. 海岸带遥感研究综述: 进展、机遇和挑战. 遥感学报, 29(11): 3136-3161

Sun W W, Chen C, Fu B L, Meng X C, He S Y, Li D, Hu Y B, Hou X Y, Ren G B and Yang G. 2025. Review of coastal zone remote sensing research: Development, opportunities and challenges. National Remote Sensing Bulletin, 29(11): 3136-3161 [DOI: 10.11834/jrs.20254151]

1 引言

海岸带指陆地向海洋延伸的过渡地带, 包括沿海平原、滨海湿地、河口三角洲、潮间带、水下岸坡、浅海大陆架等多种地形 (苏奋振, 2015; Sun 等, 2023; 崔振昂 等, 2023)。海岸带区域气候类型多样, 水量充沛, 是地球多圈层交互作用的地球生态关键地带, 分布有珊瑚礁、海草床、红树林、海湾、河口等形式多样的海岸带生态系统, 具有涵养水源、降解污染、净化水质、调节气候等多种生态功能, 在维持岸滩稳定、提供生物栖息地、加速物质交换、促进碳汇等方面发挥

着重要作用 (杨晓梅 等, 2002; 李清泉 等, 2016; 唐剑武 等, 2018; Almar 等, 2021; 孙伟伟 等, 2024)。全球一半以上的人口生活在沿海约 60 km 的范围内, 超过 250 万人口的城市有 2/3 分布在海岸带区域, 中国沿海地区更是以占陆地总面积的 13% 集中了 50% 以上的大城市, 40% 的中小城市, 承载着 42% 的人口, 创造着 60% 以上的国内生产总值 (侯西勇和徐新良, 2011; 骆永明, 2016; 姜璐 等, 2022)。

全球气候变化、大陆板块构造运动、河流携带入海泥沙沉积物减少、地面沉降等引起海平面抬升, 海岸线与滩涂向内陆迁移, 沿岸沉积物收

收稿日期: 2024-01-06; 预印本: 2024-05-27

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 42471404, 42122009, 42171311, 42371341, 41971296, 42101336, 42201354, 42271340)

第一作者简介: 孙伟伟, 研究方向为海岸带遥感。E-mail: sunweiwei@nbu.edu.cn

支平衡被破坏,导致海岸带空间异质性较强,长期处于动态演替之中(Kottek等,2006;李晓婷等,2018; Apostolopoulos和Nikolakopoulos,2021;田伟和董玉祥,2023)。当前,受全球气候变化、高强度人类活动和物种入侵等因素的综合影响,出现了砂质海岸侵蚀严重,海岸生态功能降低;红树林生态系统衰减,生态服务价值受损;珊瑚礁资源退化严重,覆盖率和多样性指数持续下降等问题(Castillo等,2012;Rangel-Buitrago等,2020;韩广轩等,2023)。

作为全球海岸带资源最为丰富的国家之一,中国海岸线漫长,海岸带自南向北纵跨北半球的热带、亚热带和温带三大气候带,雨热同季、水热共济,形成了典型的季风型气候(Su等,2011;Sun等,2023)。中国海岸带自然环境的多样性、复杂性、动态性特征突出,资源丰富、区位优势、人口聚集、经济发达,但存在的问题也极为严峻(侯西勇等,2016;高吉喜等,2020)。2022年海洋生态环境状况公报显示,24个典型海洋生态系统(7个河口生态系统、8个海湾生态系统、1个滩涂湿地生态系统、4个珊瑚礁生态系统、2个红树林生态系统、1个海草床生态系统)中有17个呈亚健康状态(中华人民共和国生态环境部,2022)。海岸带区域是社会可持续发展的重要资源基地和生态屏障,海岸带高精度动态监测对于海岸带生态系统有效管理和资源利用,以及中国乃至全球可持续发展极具迫切性和重要性,因此,海岸带资源、环境与生态变迁已成为近年来国内外研究的热点问题。

遥感科学与技术是在地球科学与传统物理学、现代高科技基础上发展起来的一门战略性新兴产业交叉学科,能够为人类提供对地观测的多种信息和遥感数据产品,已成为海岸带科学研究的重要手段(李小文,2006;李爱农等,2016;Delmas等,2019;孙伟伟等,2020)。海岸带遥感是面向海岸带这一特定地理对象,利用遥感科学与技术研究其基本原理、技术与方法及应用的学科,是遥感科学的重要组成部分(李清泉等,2016)。近年来,随着地球大数据、多星组网观测等技术的发展,极大丰富了海岸带遥感监测数据源,海岸带遥感也进入了全新的发展阶段。目前海岸带遥感理论与技术的研究尚处于发展阶段,缺乏系统性梳理。本文拟从遥感传感器设计、地物电磁波交

互作用机理、遥感数据处理与信息提取、地表定量遥感和多领域交叉应用五个方面展开讨论,总结海岸带遥感研究进展,厘清海岸带遥感关键科学与技术问题,明确未来发展机遇与挑战。本文对于推动和发展中国海岸带遥感研究、助力实现联合国SDGs目标、保障国家生态安全、支撑生态文明和建设美丽中国具有重要意义。

2 海岸带遥感的关键科学问题

海岸带是地球表面唯一的固态、液态和气态三相接触带,其环境和生态系统受到来自陆地、海洋、岩石圈、大气和人类的多重影响,具有高度空间复杂性和时间变异性,在全球物质能量循环过程中扮演重要角色(吴志峰,1998;侯西勇等,2018)。水平方向上,海岸带是陆地和海洋两大生态系统之间物质交换和能量流动的过渡地带,受地理分区影响明显,纬度地带性强,径流、潮汐和生物活动等不断改变着海岸带地理环境。垂直方向上,海岸带与大气系统之间的交互作用十分强烈,降雨、蒸发和大气动力等促使大量物质和能量在各生态系统之间进行循环。海岸带是生态环境脆弱的地球关键带,受多因子共同作用,在高强度人类活动和全球气候变化影响下,表现出高度动态、复杂变化,遥感科学与技术凭借独特优势已经成为海岸带科学研究不可或缺的重要手段。然而,海岸带遥感关键科学问题认识仍不十分清晰,在海岸带遥感传感器设计、电磁波与海岸带地物交互作用机理、遥感数据处理与信息提取、地表参数定量遥感反演、多领域交叉应用等方面面临着诸多科学问题和挑战。

2.1 海岸带遥感传感器设计

(1) 面向海岸带测绘:海岸带测绘存在克服潮汐、海浪、水中物质等对辐射信号的干扰的需求,传感器谱段选择、观测模式、轨道模式和倾角要兼顾短周期、高频次、持续性和大幅宽的要求,以提升水陆要素的高时空动态捕捉能力和高精度测量。

(2) 面向海岸带资源调查和监测:海岸带资源调查和监测存在快速和高效覆盖及精细信息提取的需求,需要突破遥感卫星探测模式、卫星组网观测或大卫星星座平台系统、数据格式标准化等,以克服不同传感器之间的影像特征差异,进行准确的信息匹配和综合。

(3) 面向海岸带环境要素定量反演: 海岸带环境要素复杂多样, 其定量遥感反演存在地物波谱特征精准解析、海陆辐射特征精确量化的需求, 卫星传感器设计需要在谱段选择、光谱带宽、空谱分辨率、成像模式(曝光时间、瞬时视场角等)、传感器定标等方面进行针对性技术论证和研发。

2.2 电磁波与海岸带地物交互作用机理

(1) 复杂多变条件下海岸带大气、地物物理光学性质准确刻画: 精准剖析海岸带大气气溶胶以及不同地物介质组分构成、粒径分布、光学性质、垂向分布规律、影响因素、光谱特征等, 实现海岸带复杂大气气溶胶和地物光学性质的精确数值计算和甄别。

(2) 海岸带大气—陆地—水体界面辐射传输过程精准模拟: 海岸带不同地物目标三维几何光学特征、粗糙海面反射和透射过程、光学浅水不同海底底质的各向异性, 以及光学深水海水组分的垂向非均匀分布等是制约大气陆表/海洋辐射传输数值精确模拟的关键问题。同时, 随着卫星遥感数据信息多源化程度和精度需求的提高, 考虑偏振的精确辐射传输数值模拟和云影响数值模拟也越来越受到关注。

2.3 海岸带遥感数据处理与信息提取

(1) 海岸带遥感数据高质量增强: 海岸带地物信息时空异质性显著, 亟需同时兼顾高质量、高空间、高光谱、高时间分辨率的影像数据。为了克服卫星传感器成像系统限制, 多源多模态遥感融合、时间序列遥感融合与重建、跨传感器异构遥感融合、光学遥感云层检测和修复技术以及基于深度学习与智能AI算法的遥感数据高质量增强已成为亟待解决的关键难题。

(2) 时空稳健的海岸带遥感信息提取: 天气条件、潮汐和海浪等制约了海岸线、潮滩地形、近海水深等高精度提取。海岸带地表破碎、地物分布时空异质性显著, 地物光谱混淆现象突出, 且实地采样困难, 实现海岸带土地利用/覆被高精度分类仍存在较大挑战。此外, 红树林、盐沼植被、珊瑚礁和海草床、水产养殖池等自然资源生态要素对维护海岸带生态健康极为重要, 实现其时空稳健的信息提取也是亟待解决的重要问题。

2.4 海岸带地表参数定量遥感反演

(1) 植被定量遥感: 近红外光谱弱化和红边波段位置转移导致传统的辐射传输模型无法精准刻画海岸带植被冠层遥感响应特性。同时, 随着物种入侵、群落密度、冠层结构和物种演替, 植被叶片、个体和群落尺度的光谱反射率存在高时空异质性, 光谱和空间尺度效应明显, 构建不同尺度时空稳健的AI+遥感定量反演模型, 并探明尺度效应及其尺度转换机理将成为海岸带遥感研究的热点和难点。

(2) 潮滩土壤定量遥感: 解析不同基质类型潮滩(砂质、淤泥质等)和不同潮位(潮上带、潮间带和潮下带)土壤光谱反射特性, 探明蓝绿LiDAR、高光谱组网等多源传感器对潮滩土壤物质组分、理化性质、演化过程的遥感监测与反演机理。

(3) 近海水色定量遥感: 受制于近岸水体的高时空动态变化特性, 提高多平台高时空分辨率传感器在近海水环境对不同水体组分及其浓度的离水反射率和固有光学特性的灵敏度, 攻克多源传感器辐射特性差异、观测角度和观测时刻引起的水色反演精度不稳定性问题。

2.5 海岸带遥感的多领域交叉应用

(1) 海岸带具有多界面、多维度和多过程交互作用的特征。陆海统筹涉及人口、资源、环境、科技和资金等诸多要素, 现有研究侧重于单一界面或单一要素, 在要素类型、更新频次、时空分辨率等方面还存在不足, 特别是缺乏多界面交互、多要素综合的考量, 影响陆海统筹管理、综合防治的需求。因此, 深入挖掘陆海要素之间的内部结构及相互作用关系, 准确探测海陆交互作用及其界面过程, 是遥感技术服务于陆海统筹需要考虑的重点。

(2) 海岸带存在多物种、多生境, 各生态空间动态发展并彼此联系, 有着复杂的物质、能量和信息流通, 对海岸带区域人类活动、物种入侵、土壤盐渍化和海岸侵蚀等产生的生态后果进行科学、定量评估, 是保障海岸带生态安全的重要途径和手段。海岸带生态修复监测与评估由单一数据、单因素、阶段性向多源数据、多因素、全过程转变。因此, 构建综合、全面、精确的多指标评价体系, 基于遥感技术开展海岸带生态修复全

过程监测是亟需考虑的问题。

(3) 海岸带自然灾害具有多样性、复杂性和突发性等特点, 实现灾害全过程、全要素、多灾种监测评估和灾害预警仍存在挑战。同时, 海岸带涉及人口、物质和能量等诸多要素, 基于遥感技术开展灾害形成过程、致灾机理、演变机制研究是需要重点关注的问题。

3 文献分析

3.1 资料与方法

本文综述文献来源于 Web of Science 核心合集数据库 (简称“WOS”) 和中国知网 (CNKI) 数据库, 检索年限范围为 1980 年—2023 年 (图 1)。WOS 数据库检索条件为: TS= “Coastal Remote Sensing” OR “Ocean Remote Sensing” OR “Coastal Zone Remote Sensing” OR “Remote Sensing Of Coastal Zone”。CNKI 数据库检索条件为: 主题= “海岸带” or “滨海湿地” and “遥感”。筛选得

到英文文献 15124 篇, 中文文献 1641 篇, 利用 CiteSpace 软件进行分析文献。

3.2 文献分析概述

发表英文文献最多的期刊是《Remote Sensing》(1515 篇) 和《Remote Sensing of Environment》(779 篇)。发表中文文献最多的期刊是《海洋开发与管理》(41 篇) 和《海洋测绘》(34 篇)。WOS 核心合集数据库检索结果发现, 1980 年—1994 年英文文献发文量为 0, 说明当时国外学者对海岸带遥感涉及较少。1995 年—2000 年呈现逐年增加的趋势。2000 年—2010 年发文量明显增多, 达到了 3000 多篇, 是 1995 年—2000 年发文总量的 5 倍。2010 年至今, 海岸带遥感相关文章达到 10000 余篇, 近乎是 1995 年—2010 年的 3 倍。中文文献发文量在 1980 年左右就有了一定发展, 证实了国内学者早于国外学者开展海岸带遥感研究。在此之后, 对于海岸带的研究总体上呈现不断增长的趋势, 但整体的发文量偏低。

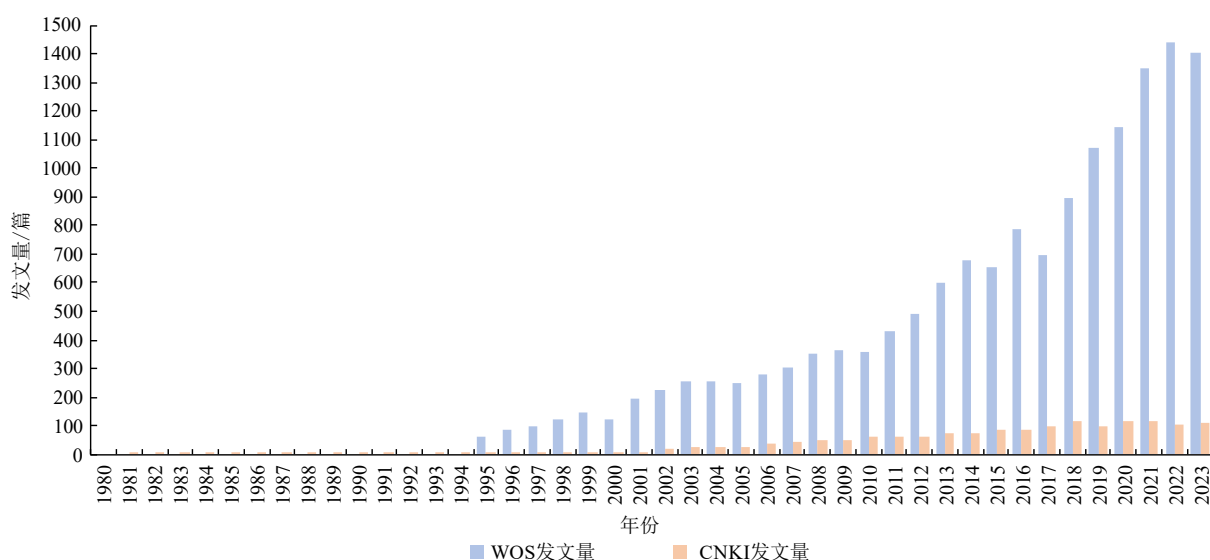


图 1 中英文文献年度发文量

Fig. 1 Number of articles published in both English and Chinese each year

3.3 国家与机构发文量及学科方向分析

WOS 数据库显示, 美国和中国是海岸带遥感领域发表文献最多的两个国家, 分别发表了 5521 篇和 3642 篇, 占总体发文量的 36.50% 和 24.08% (图 2)。在研究机构方面, 本文筛选了发文量前十的研究机构, 如图 3 所示, 美国国家航空航天局和

中国科学院发文量最多, 分别为 1247 篇和 1209 篇, 占总体发文量的 8.24% 和 7.99% (图 3)。发表中文文献最多的机构是华东师范大学 (92 篇)、自然资源部第一海洋研究所 (74 篇)、中国科学院大学 (66 篇), 分别占比为 11.02%、8.86% 和 7.90% (图 4)。

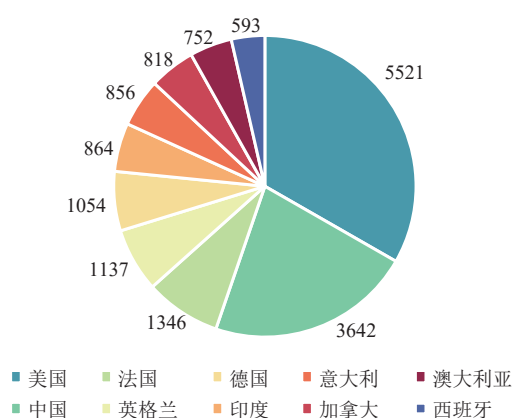


图2 WOS数据库检索发文量前十的国家

Fig. 2 The top ten countries by number of articles in WOS database

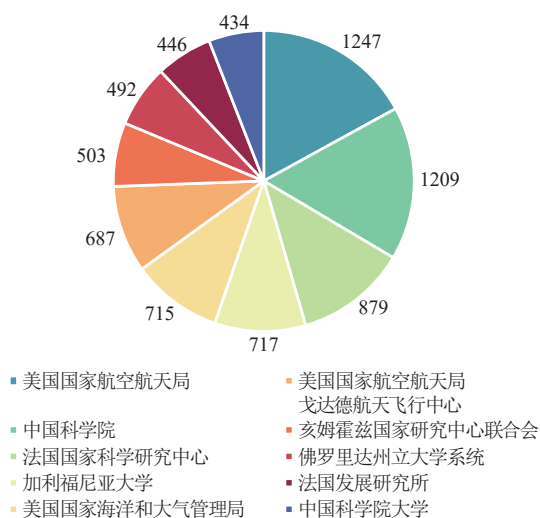


图3 WOS数据库检索发文量前十的研究机构

Fig. 3 The top ten institutions by number of articles in WOS database

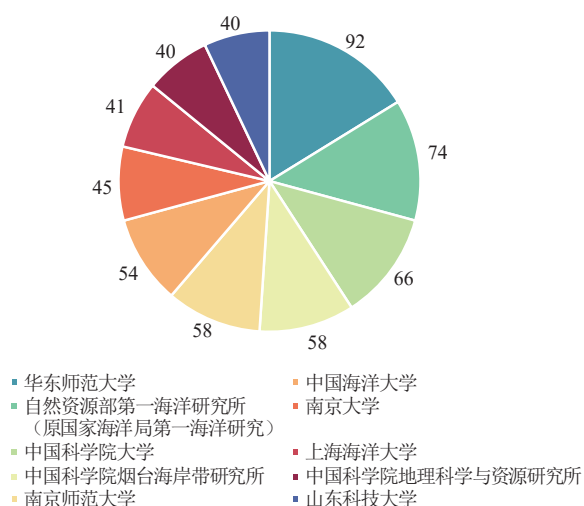


图4 CNKI数据库检索发文量前十的研究机构

Fig. 4 The top ten institutions by number of articles in CNKI database

海岸带遥感涉及生态环境学科、遥感学科、影像学、地质学、海洋学、工程学、气象学、海洋淡水生物学、自然地理学、地球物理化学等多个学科，研究方向主要为生态环境学、遥感、影像学和地质学（图5）。同时，海洋学和工程学也有较高的关注度。

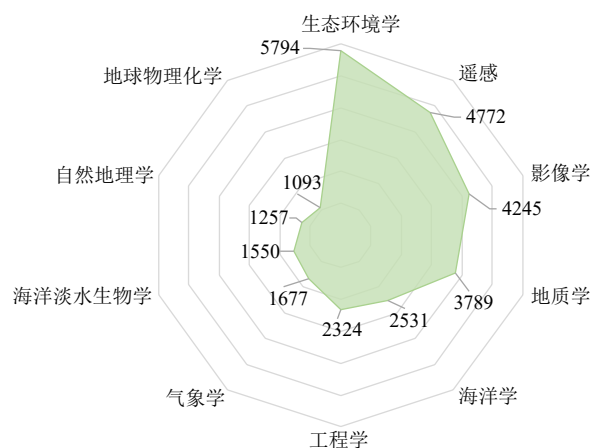


图5 主要研究方向与学科分析(排名前十)

Fig. 5 Main research direction and discipline analysis (Top 10)

3.4 关键词分析

分析总结中英文文献的关键词发现，海岸带遥感研究热点主要包括海岸线、土地利用、红树林、互花米草、驱动力、大气校正、海洋水色、滨海湿地、遥感反演、水质等。近年来，算法、模型、深度学习等逐渐应用于海岸带气候变化监测、植被指数分析、沿海水质检测等领域（图6）。

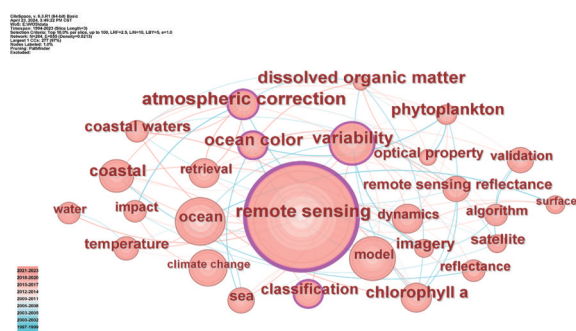


图6 WOS数据库关键词共现图谱(出现频率>400)

Fig. 6 Keywords clustering in WOS database (Occurs more than 1000)

根据WOS数据库关键词突现结果分析发现（图7），海岸带遥感主要分3个发展阶段：起步阶

段、技术应用阶段、智能化阶段。1990s至2000s中期为起步阶段，也是传统发展期阶段，国际研究内容聚焦3个方面：波浪、天然水体、荧光现象，国内研究内容聚焦海洋粒子、光谱吸收。2000s中期到2010s中期，海岸带与遥感等空间信息技术紧密结合，国际学者对海洋水色研究逐渐增多，国内学者结合遥感技术和解析模型对海水

叶绿素浓度的研究增多。2010s中期至今为智能化阶段，机器学习、深度学习逐渐成为国内外海岸带遥感的研究热点，并在海岸线和土地利用/覆被变化监测、自然灾害预警、资源管理等方面发挥着至关重要的作用，其中，国外学者主要研究地表覆盖类型，而国内学者则关注海洋测量以及对沿海湿地区域的研究。

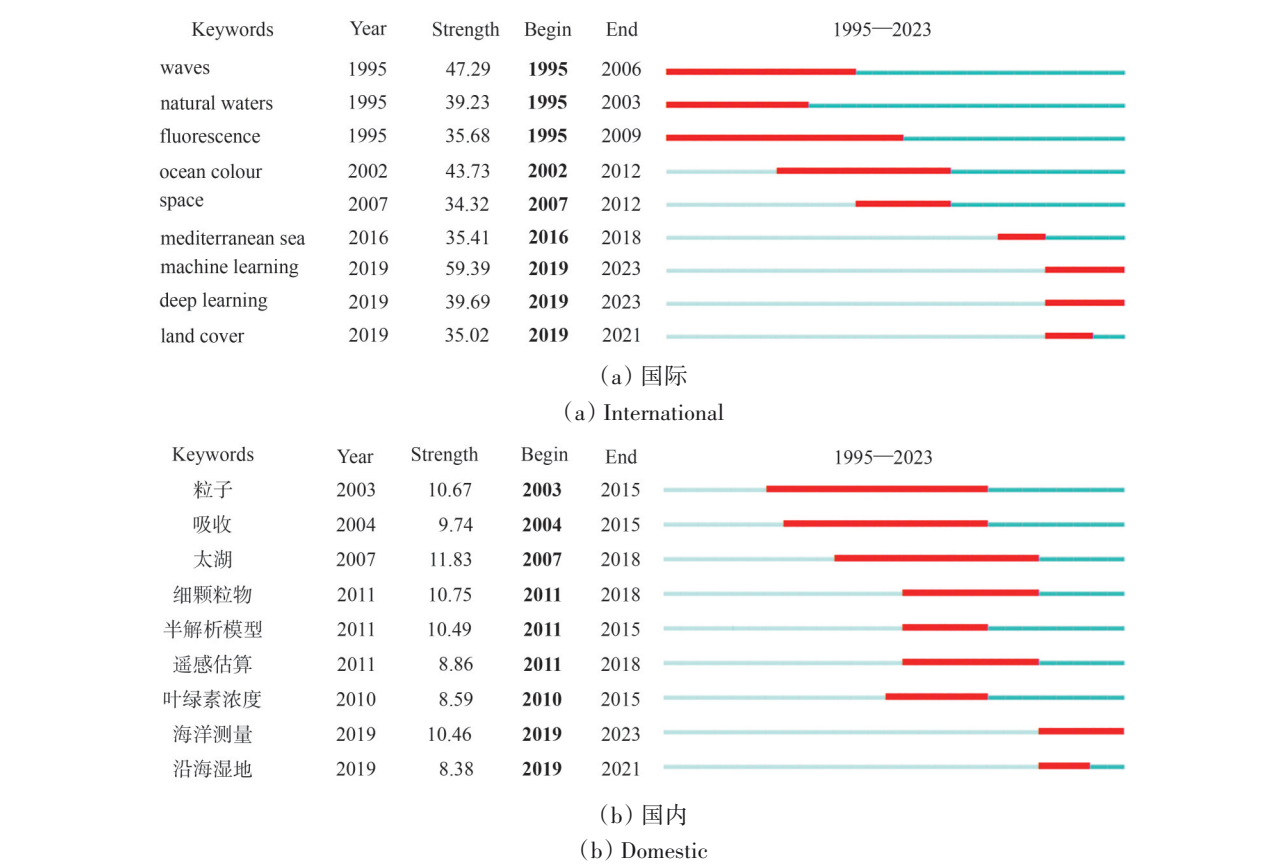


图7 WOS数据库中海岸带遥感的关键词突现图谱
Fig. 7 Pop-up keywords of coastal remote sensing in WOS database

4 海岸带遥感的文献研究进展

4.1 海岸带遥感传感器设计

本文统计了1980年—2023年国内外已经发射和目前在轨运行的遥感卫星（图8），传感器设计主要面向海岸带测绘、资源调查和监测、环境要素定量反演。

（1）面向浅海水下地形测绘：主动遥感的水深探测精度最高，在0—15 m较为清澈的浅海水深段，机载激光雷达探测误差可达厘米级（Abdallah等，2012；张震等，2015），被动遥感中高光谱水深反演精度高于多光谱，平均相对误差可达15%

（Grigorieva等，2017；张靓等，2017）。被动遥感水深反演精度相对较低，但是数据源丰富、覆盖范围广、时效性强、水深反演模型较丰富，是目前浅海水深遥感反演的主要方法。主动遥感由于机动性强、测深精度较高，逐步成为当前应用和研究的热点（Collin等，2012）。水深遥感融合探测可以优化整合多源遥感数据，有效地挖掘多源、多时相信息，有助于提高水深遥感反演精度，遥感融合探测方法的水深反演精度比单源单时相提高10%以上（刘焱雄等，2017）。但是多源遥感融合存在空间尺度问题，多时相数据融合反演水深的精度也会受到底质及水下地形变化等因素的影响。

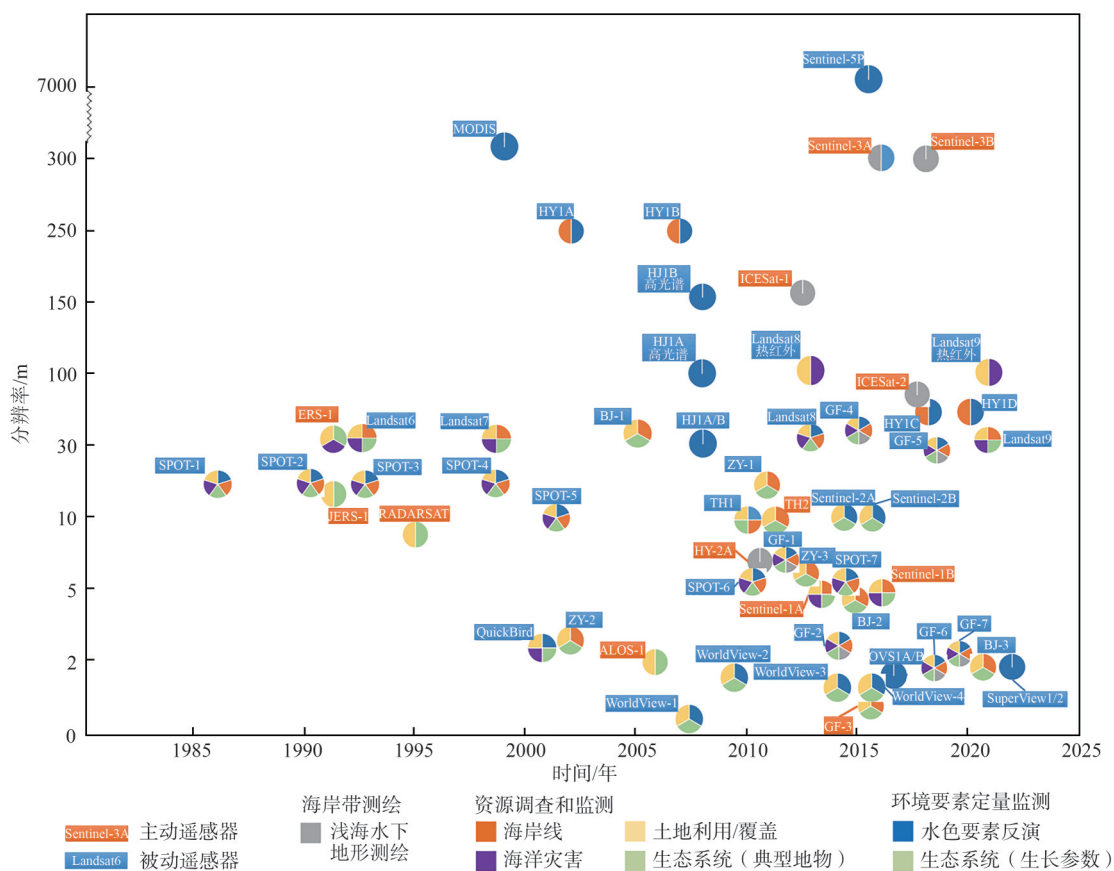


图8 国内外已经发射和目前在轨运行的遥感卫星

Fig. 8 Remote sensing satellites that have been launched and are currently in orbit at home and abroad

(2) 面向资源调查和监测：中低分辨率遥感卫星适用于大范围海岸带土地利用监测 (Lu 等, 2022)，而高分辨率遥感卫星通过捕捉不同地物的光谱特征，适用于精细化地物分类与识别研究 (骆剑承 等, 2021)，如识别与监测红树林、海草床、珊瑚礁等多类型生态系统 (Hu 等, 2019)。同时，高分辨率遥感卫星也被应用于海洋溢油事件、风暴潮、海岸带滑坡等生态灾害、海洋自然灾害的监测与预警 (Hu 等, 2022)。

(3) 面向环境要素定量反演：基于水体光谱特性的定量反演方法已成为近海水色要素估算的重要方法之一，已有学者利用 SeaWiFS、MODIS、Landsat、SPOT 等陆地和气象卫星多光谱数据、实测水面光谱和水质参数，构建基于统计的定量模型 (Miller 和 McKee, 2004)。部分学者利用具有更强时效性和经济性的中低分辨率多光谱数据开展有机物反演研究，如 Sentinel-2、HY-1C、MODIS、天宫二号卫星等多光谱卫星数据被用于开展近海 CDOM (Colored Dissolved Organic Matter)、叶绿素 a 浓度、悬浮物浓度等要素反演 (滕越 等, 2022)。

高光谱传感器提供了更加精细的光谱信息，可以探寻对环境要素敏感的最优波段组合，为复杂多变的海岸带遥感监测提供可靠的数据源。已有研究证实，549 nm、559 nm、702 nm、722 nm、742 nm 和 763 nm 谱段对红树林冠层叶绿素含量最为敏感，可精确估算红树林冠层叶绿素含量 (George 等, 2018)。

4.2 电磁波与海岸带地物交互作用机理

海岸带区域的大气气溶胶和水体具有组分复杂且多变、时空不均匀性强的特点。持续的航次测量以及陆基现场测量网建设，如美国的气溶胶和海洋水色自动测量网络 AERONET (Holben 等, 1998)、日本的 SKYNET 网络 (Takamura, 2004)、中国的气溶胶遥感网 CARSNET (Che 等, 2015) 等，以及卫星遥感数据的不断积累，使得对不同海域气溶胶和水体组分构成来源、散射吸收光学性质和颗粒物粒径分布等方面有了较深入的研究 (Kaufman, 2002; Bisson 等, 2021; Li 等, 2022)，但目前对不同海域尤其是海岸带区域大气气溶胶的

种类组成及其光学特性依然不十分清晰，在大气海洋辐射传输模拟中所用的大气气溶胶模型种类及分布仍然很有限，实际大气或海洋中不同颗粒物的成分组成、颗粒表面和内部组成复杂、相互作用机制仍然有待进一步研究（Schiffer等，2018；Davies等，2021）。此外，气溶胶和云的相互作用在气候变化领域已受到关注，但仍待进一步研究（Li等，2022）。

目前辐射传输数值模拟模型按应用场景可分为大气辐射传输模拟模型、海洋辐射传输模拟模型、大气—海洋耦合辐射传输模拟模型（表1）。典型的大气辐射传输模型如5S/6S、LOWTRAN、MODTRAN等，海洋辐射传输模型如Hydrolight，大气—陆表几何光学耦合辐射传输模型，大气—海

洋耦合辐射传输模型如COART、MOMO、PCOART、OSOAA等。其中有标量辐射传输数值模拟模型（Hydrolight、COART），也有精度更高的矢量辐射传输数值模拟模型（MOMO、PCOART、OSOAA）。目前美国的最新气候监测卫星计划PACE（Plankton，Aerosol，Cloud，ocean Ecosystem）拟于2024年发射多角度偏振和高光谱多角度观测遥感传感器。在陆地遥感中，针对陆地地物的立体几何特性，也发展了三维几何光学模型用于精确模拟不同地物目标物的大气—地物辐射传输。尽管目前为止已有很多辐射传输数值计算模型被研究开发出来，但商业化或可以公开获得的数值模拟模型并不多，例如具有友好用户使用界面和详细用户使用手册的6S、MODTRAN和Hydrolight。

表1 几种典型的辐射传输数值计算模型

Table 1 Several typical numerical calculation models of radiative transfer

类型	典型模型	界面考虑	计算方法	标量或矢量	参考
大气辐射传输模型	6S	地表朗伯面反射	状态近似和逐次散射算法	标量、矢量	(Vermote等,2006;Kotchenova等,2006;Kotchenova和Vermote,2007)
	MODTRAN	选择或输入不同地表反照率	逐线积分法	标量	(Berk等,2014,2015)
陆表几何光学模型	三维辐射传输模拟计算	利用比尔定律及其改进形式求解冠层辐射能量	解析法	/	(Pukkala等,1993)
	VBRT、DIRSIG-5 LESS	光线追踪模拟辐射传输过程	蒙特卡洛光线追踪方法	/	(Qi和Hu,2019)
	RCM、RAPID	能量平衡原理数值近似求解场景物体表面辐射亮度分布	辐射度方法	/	(Qin和Gerstl,2000)
海洋辐射传输模型	Hydrolight	考虑粗糙海气界面	不变嵌入法	标量	(Mobley,2015)
	DISORT	海气界面为水平面	离散坐标法	标量	(Jin和Stamnes,1994)
	CDSORT、COART	考虑粗糙海气界面	离散坐标法	标量	(Jin等,2006)
大气—海洋耦合辐射传输模型	MOMO	考虑粗糙海气界面	矩阵算子方法(加倍法)	标量 矢量	(Hollstein等Fischer,2012)
	PCOART	考虑水平海气界面 考虑粗糙海气界面	矩阵算子方法(加倍法)	矢量	(He等,2007)
	OSOA	考虑水平海气界面	逐次散射算法	矢量	(Chami等,2001)
	OSOAA	考虑粗糙海气界面			(Chami等,2015)
	VRT	考虑粗糙海气界面	逐次散射算法	矢量	(Zhai等,2010)
	HMOMC	三维大气—海洋辐射传输模拟	矩阵算子和蒙特卡洛方法混合	矢量	(You等,2009)

4.3 海岸带遥感数据处理与信息提取

4.3.1 海岸带遥感数据处理

(1) 大气校正。大气校正是海岸带遥感定量反演的前提（Pahlevan等，2021）。目前，大气校正方法主要包括：影像特征法、辐射传输模型法

和机器学习法等。影像特征法从影像本身特征出发消除大气影响，如暗像元法（Kravitz等，2020；Pahlevan等，2020），该类方法较为简单，但特征选择主观性强，不适于海岸带复杂区域。辐射传输模型法主要包括LOWTRAN、MODTRAN、以及6S模型等（Cao等，2020）。该类方法原理复杂，

需要假设气溶胶种类来估算贡献,对气溶胶成分不同或变化快的区域的大气校正结果可能产生误差,且未虑强散射水体和海底反射影响。基于机器学习的大气校正方法主要通过数据集训练,建立地面真实地表反射率和遥感影像亮度值之间的关系,为目前研究前沿(Yunus等,2020)。该类方法精度较高,但因对海岸带反射强度等特性考虑不足,难以满足海岸带遥感高精度定量反演要求。

(2) 光学影像云去除。遥感影像云去除方法总体可分为4类:空域法、谱域法、时域法及时空谱混合法(Chen等,2004)。空域法利用同景影像内无云覆盖区域对云覆盖区域进行修复,如插值法(Ebel等,2021)、传播扩散法(Huang等,2015)等,通常用于小区域云覆盖的去除。谱域法利用光谱波段之间的相关性,如基于多项式的拟合方法(Ji等,2018),适用于薄云处理。时域法利用多时相图像之间的时间相关性,如替换法(Li等,2020)、过滤法(Li等,2019)等,需假设不同时相影像无较大的地物变化。时空谱混合法同时使用空域、谱域和时域的方法去云,如张量补全法(Mendez-Rial等,2012),该类方法效果较好,但不适用于海岸带区域。海岸带区域云覆盖频繁,仅依靠光学影像难以进行有效去云。SAR具有不受云雨雾影响的全天候成像特点,可为光学影像去云提供有效辅助信息(Shen等,2015)。现有海岸带区域云去除方法主要针对多光谱影像(Yu等,2011; Shen等,2014),对高光谱影像难以实现光谱高保真,且对海岸带特点及不同传感器成像机理考虑不足,难以进行海岸带影像云覆盖下地物信息的高保真修复。

(3) 多源遥感融合。遥感影像时空谱融合可集成多源遥感影像的时间、空间和光谱分辨率互补优势,为海岸带遥感监测提供时间连续的高空间和高光谱分辨率影像(Shen等,2016)。主要包括空谱融合、时空融合、时空谱融合。空谱融合旨在集成多源遥感影像在空间和光谱分辨率方面的互补优势,生成高空间和高光谱分辨率影像。时空融合主要克服单源影像时间和空间分辨率制约的问题,融合生成高时一空分辨率影像。相比于空谱融合和时空融合,时空谱融合为目前研究前沿与热点,主要包括分步融合和一体化融合。其中,分步融合通过空谱融合、时空融合等的分

步处理得到最终融合影像(Zhao和Huang,2017),一体化融合旨在充分集成多源传感器影像的空间、光谱、时间分辨率互补优势,包括基于变分理论的融合方法和深度学习的融合方法,尤其是基于深度学习的融合方法近年来受到广泛关注,如基于卷积神经网络的融合方法和基于Transformer的融合方法等。

4.3.2 海岸带遥感信息提取

(1) 海岸带地形要素遥感信息提取。海岸带地形要素主要包括海岸线、潮滩地形、近岸水深提取(表2)。海岸线信息提取方法整体可分为3类:瞬时海岸线、校正海岸线和概率海岸线。其中瞬时海岸线可有效的判别出成像时刻海洋和陆地的边界(Chen等,2019; Mondal等,2020; Sun等,2023),为主流方法。校正海岸线在瞬时海岸线的基础上利用数字高程数据以及潮汐数据等进行海岸线的修正,包括基于潮汐校正的方法和潮汐模型与DEM(Digital Elevation Model)相结合的方法两大类(Ghosh等,2015; Chen等,2022a)。概率海岸线在水线基础上,基于每个像素是水域还是陆地的概率进行确定,因此往往需对同一区域进行多次连续观测(Amani等,2020)。潮滩地形信息提取。基于遥感的滩涂DEM构建方法可分为以下3类:水边线复合技术(Mason等,1999)、机载合成孔径雷达干涉测量(InSAR)技术(Ferretti等,2001)、机载LiDAR测量技(金鼎坚等,2020)。其中,水边线复合技术是反演滩涂地形的常用方法,但其精度不高、现势性不强(杨立君等,2018)。InSAR技术精度相对较高,绝对高度精度达到厘米级(Wimmer等,2000)。机载LiDAR测量技术通过主动式测量快速、准确地获取测区的高程信息,无需大量地面控制点即可生成高精度DEM,是获取滩涂区域高精度空间信息的有效方法(张靓等,2017)。近岸水深遥感信息提取可分为两大类:一是传统的以水体辐射传输模型发展而来的水深光学遥感方法(陆天启等,2022),二是以双介质摄影测量原理为基础的遥感立体水深测量方法。水深光学遥感测深手段主要包括多光谱遥感测深(Cracknell和Ibrahim,1988)、高光谱遥感测深(王新强和张丽娟,2012)、LiDAR测深(Wang等,2015)。遥感立体水深测量(立体双介质技术)主要是以航空数据或高分辨率卫星

立体像对为数据源对水深进行遥感反演，对成像要求较高，测深精度与成像条件密切相关，但具有无需水深控制点的优势，具备监测近岸水深的

能力（刘善磊 等，2011；杜娟 等，2019）。

表2 海岸带地形要素遥感信息提取主要方法

Table 2 Main methods of information extraction of coastal terrain elements from remote sensing images					
类型	方法	数据源	优点	缺点	参考文献
海岸线	瞬时海岸线	Landat 等光学遥感	简单快速	提取结果为水边线，存在争议	(Mondal 等,2020)
	校正海岸线	Landat 等光学遥感、潮汐数据、DEM 等	精度较高	数据获取困难	(Ghosh 等,2015)
	概率海岸线	Landat 等光学遥感	较为客观,符合现实情况	数据获取困难	(Amani 等,2020)
潮滩地形	水边线复合技术	遥感影像、高程数据	数据获取方便、简单实用等优势	精度不高、现势性不强	(马洪羽 等,2016; Yang 等,2021)
	机载合成孔径雷达干涉测量技术	InSAR	精度较高,可制作不同比例尺的滩涂 DEM	数据获取困难	(Pinheiro 等,2020; Li 等,2021)
	机载 LiDAR 测量技术	LiDAR	精度较高,提取潮滩敏感地形信息	数据获取困难	(Coveney 等,2010; Schmid 等,2011)
近岸水深	基于水体辐射传输模型的水深光学遥感测量方法	多光谱遥感、高光谱遥感、激光雷达等	包括多光谱、高光谱、激光雷达等多种探测手段	精度较低	(Lu 等,2019)
	基于双介质摄影测量的遥感立体水深测量方法	航空遥感、高分辨率卫星立体像对	精度相对较高	对成像条件要求高,数据获取困难	(周高伟 等,2015)

(2) 海岸带土地利用/覆被信息提取。目前，海岸带土地利用/覆被信息提取方法主要分为3类：基于像元的分类方法、面向对象的分类方法和面向场景的分类方法。基于像元的分类方法主要利用中低分辨率卫星遥感数据，采用分类器将像元聚类到相应的类别，常用算法包括无监督分类（如 K-means 和 ISODATA）、监督分类和更复杂的机器学习（如支持向量机、决策树和随机森林）（Mendez-Rial 等，2012；Yu 等，2011；Shen 等，2014，2015，2016）。然而，海岸带地貌高度分散，形状和规模千差万别，中低分辨率图像容易导致信息丢失。高分辨率遥感图像更加注重采集光谱、纹理和空间特征，采用面向对象分类的方法（Ghosh 等，2015；Zhao 和 Huang，2017；Mondal 等，2020）先将图像分割成同质区域（即对象），再计算对象的特征并进行分类。然而，由于海岸带地区地物类型混乱，景观复杂多变，面向对象的分类方法可能难以对海岸带复杂场景进行准确的分割和分类。面向场景的分类方法（Ferretti 等，2001；Amani 等，2020）旨在更好地捕捉海岸带复杂的地貌特征，着重考虑地物之间的空间关系和上下文信息，以提高分类的准确性和可靠性。这种方法通过综合分析地物的空间分布、邻近关系、形态特征等，能够更好地捕捉海岸带地区复杂的地貌和多样的地物类

型，为海岸带管理、保护和可持续发展提供有力支持。

(3) 海岸带自然资源生态要素提取。海岸带自然资源生态要素信息提取主要包括红树林、盐沼植被、水产养殖区、珊瑚、海草等（表3）。红树林遥感信息提取包括边界范围提取和种间分类（张靓 等，2017；杨立君 等，2018）。目前已有多种红树林指数被用于提取红树林边界范围（陆天启 等，2022），其主要利用红树林与其他植被的水分含量差异进行构建（王新强和张丽娟，2012）。红树林种间分类对影像空间分辨率要求较高，通常使用 IKONOS（Chadwick，2011）、QuickBird（Wang 等，2004）、ZY-3（Zhang 等，2021）、GF-5（Wan 等，2020）卫星数据以及无人机数据（Yin 和 Wang，2019；Navarro 等，2020）。盐沼植被的分类提取包括盐沼植被间的精细分类和典型植被要素的提取，其主要考虑植被的空间特征、光谱特征，以及物候特征进行识别（Sun 等，2021；孟祥珍 等，2021），其中，互花米草作为入侵物种对中国海岸带生态健康造成了极大威胁，其时空分布遥感监测为近年来研究热点（刘明月 等，2023）。大规模的围海养殖以及港口海堤建设等人类活动使得海岸带发生了巨大的变化，与湖泊、河流等大型水体相比，国内外对水产养殖区的遥感监测起步较晚。目前已有学者利用多源遥感数

据对水产养殖池塘进行遥感识别与提取研究，主要方法包括随机森林、决策树以及深度学习等（Duan 等，2020；Xia 等，2020；Liang 等，2021；Hou 等，2022；Sun 等，2024）。珊瑚主要分布于热带海域，海表温度异常升高导致大面积珊瑚白化，当前遥感监测主题主要包括珊瑚白化面积、珊瑚覆盖、珊瑚礁生态系统健康等（蔡玉林 等，

2019；熊媛 等，2022）。海草床作为3大蓝碳生态系统之一也成为遥感监测的重点，当前光学遥感海草监测研究尚处于初级阶段（李一琼 等，2021），主要研究方向包括海草空间分布及覆盖制图、海草生物量反演、海草碳储量估算等（Misbari 和 Hashim，2016；Topouzelis 等，2018；Sousa 等，2019）。

表3 主要的海岸带自然资源生态要素提取方法
Table 3 Main methods of ecological elements for natural resources in coastal zone from remote sensing images

类型	方法	数据源	优点	缺点	参考文献
红树林	红树林指数提取方法	Landsat, Sentinel-2 等多光谱	简单快速, 无需大量样本, 适合于大尺度制图	易受“同物异谱”和“同谱异物”影响	(Gupta 等, 2018; Baloloy 等, 2020; 徐芳 等, 2020; Huang 等, 2022; Yang 等, 2022)
	机器学习等监督分类方法	IKONOS, QuickBird, ZY-3, GF-5 以及无人机数据	可以实现树种分类	需要大量样本, 计算效率低、可迁移性弱	(何玉花 等, 2019; 刘凯 等, 2019; 田义超 等, 2019; Wan 等, 2020)
盐沼植被	基于物候特征的盐沼植被精细分类方法		精度较高, 可以获得多种盐沼植被的分布	需要长时序数据; 依赖样本和分类器, 计算效率低、可迁移性弱	(Sun 等, 2021)
	联合植被物候特征与机器学习的互花米草提取方法	Landsat, Sentinel-2 等长时序多光谱影像	无需人工确定阈值	需要长时序数据; 依赖样本和分类器, 计算效率低、可迁移性弱	(刘明月 等, 2023)
	基于物候特征的互花米草决策树提取方法		简单快速, 无需大量样本, 适合于大尺度制图	需要长时序数据; 人工确定阈值	(孟祥珍 等, 2021)
水产养殖区	机器学习以及深度学习方法	Landsat, Sentinel-2、GF-2、GF-1	精度较高, 无需人工确定阈值	依赖样本和分类器, 计算效率低、可迁移性弱	(Duan 等, 2020; Xia 等, 2020; Liang 等, 2021)
	养殖浮筏指数提取方法	ZY-1 02D 高光谱影像	简单快速, 无需大量样本, 适合于大尺度制图	需要高光谱数据; 人工确定阈值	(Hou 等, 2022)
珊瑚礁	机器学习等监督分类方法	Landsat, Sentinel-2 等多光谱影像	无需人工确定阈值	分类标准不统一, 不同研究差别大; 依赖样本和分类器, 计算效率低、可迁移性弱	(蔡玉林 等, 2019; 熊媛 等, 2022)
海草床	机器学习等监督分类方法	Landsat, SPOT-7、Worldview-2 等多光谱影像	无需人工确定阈值	依赖样本和分类器, 计算效率低、可迁移性弱	(Misbari 和 Hashim, 2016; Topouzelis 等, 2018; Sousa 等, 2019)

4.4 海岸带地表参数定量遥感反演

4.4.1 植被功能性状定量反演进展

(1) 红树林、盐沼植被和互花米草功能性状的定量反演。近年来，多光谱、高光谱、SAR 和 LiDAR 等多源遥感技术已用于红树林、盐沼植被和互花米草功能性状的定量反演，反演方法主要包括参数回归法、非参数回归法、物理模型法（PROSAIL、SCOPE）和混合模型法（物理模型+非参数模型），相关研究文献归纳如表4所示。当

前海岸带植被功能性状遥感反演研究呈现如下特点：1) 以经验模型和半经验反演为主，模型普适性差，基于二维和三维物理模型（DART）的反演研究较少，未顾及海岸带场景复杂背景的物理模型反演。2) 多集中树高/株高、植被叶面积指数、叶绿素含量、生物量等物理结构参数的定量反演，对功能性状中反映植物养分适应策略过程和机制的关键生理参数（如碳、氮、磷含量等）及其化学计量特征、光能利用率、光学色素、日光诱导叶绿素荧光等反演研究不足。3) 尚缺乏

对红树林生态学特征参数（物种多样性、优势度等）以及灾害灾情（病虫害监测、冰冻灾害监测、风暴潮监测及生物入侵等）研究。4）植被功能性状定量反演存在光谱尺度效应和空间尺度效应，现有研究尺度转换和数据同化解析了遥感

观测尺度对功能性状估算结果的影响，但是对其光谱尺度效应缺乏系统性研究，选择适合的光谱尺度和空间尺度是建立海岸带植被遥感综合监测模型的基础。

表4 主要的海岸带植被参数遥感反演方法
Table 4 Main retrieval methods of vegetation parameters in coastal zone from remote sensing images

功能性状参数	主要数据源	反演方法	参考文献
株(树)高	星载主被动影像	非参数回归	(Ghosh等,2020)
	机载LiDAR点云	非参数回归	(Luo等,2015)
叶面积指数(LAI)	无人机和星载多光谱影像	参数回归	(Tian等,2017)
	星载全极化SAR数据	参数回归	(Pereira等,2018)
	星载光谱影像实测高光谱数据	物理模型	(Darvishzadeh等,2019)
	星载光谱影像	混合模型	(Zhao等,2023)
叶绿素含量	星载光谱影像	参数回归	(Zhao等,2019;Zhen等,2021)
	实测高光谱数据	非参数回归	(Liu等,2017)
	星载多光谱影像	非参数回归	(Lou等,2021)
	实测高光谱数据	物理模型	(Zhuo等,2021;Zhang等,2024b)
叶片干物质重量	星载多光谱影像	非参数回归	(Ali等,2019;Chen等,2022b)
地上生物量	无人机LiDAR点云	非参数回归	(Tian等,2021)
		参数回归	(Koma等,2021)

(2) 珊瑚礁和海草床定量遥感研究。当前已有学者综合利用光学遥感、LiDAR、SAR以及船载声学等多源遥感技术，开展了珊瑚白化监测、珊瑚礁底质分类和地貌分带、珊瑚礁稳定性及其沉降变形监测，以及浅海底部海草栖息地识别、空间分布范围和动态变化趋势监测、丰度及空间特征评估、生物量反演和碳储量估算等方面的研究。

4.4.2 潮滩土壤定量遥感反演进展

国内外学者利用SAR、LiDAR和高光谱等遥感技术开展了潮滩土壤定量遥感研究，反演了潮滩的沉积物粒度、粉砂及粘土含量，估算了表层沉积物含水量、潮滩冲淤速率和沉积速率，以及露滩涂沙纹粗糙度参数，绘制了沿海滩涂土壤剖面各层位光谱曲线，分析了土壤理化参数指标最重要的敏感光谱波段，实现了土壤粒度、基本理化性质和微量元素定量反演（表5）。

4.4.3 近岸水色遥感定量反演进展

已有学者利用中等空间分辨率成像光谱辐射计（MODIS）和成像光谱辐射计（MERIS）、地球

静止海洋水色成像仪（GOCI）、近海海洋高光谱成像仪（HICO）、Landsat系列和Sentinel系列卫星传感器等实现了叶绿素a、浊度/透明度、固体悬浮物、CDOM和DOC、盐度等近海水质参数的定量反演（表6）。但是已有研究还存在以下不足：（1）近海水域不同水体组分，尤其是色素组分，影响叶绿素a的光谱特性，导致叶绿素a浓度反演存在较大误差。（2）不同水质要素之间的交互作用机制仍需进一步研究，特别是弱光学特性的水质参数。（3）近海水域中的悬浮颗粒物和溶解有机物会影响光线的透过能力，使得水体的光学深度变化不规律，导致遥感数据无法准确地代表海水的实际光学特性。（4）当前水质参数反演以经验模型、半经验模型等为主，需要针对不同区域和不同水质参数进行参数调整和校准，如何构建时空稳健的AI+水质参数定量反演模型是亟需考虑的问题。（5）高时间分辨率影像无法精确描述小尺度区域发生的水质参数变化，而高空间分辨率影像缺乏时效性，难以捕捉水质参数在水平和垂直结构上的空间异质性。

表 5 主要的潮滩土壤参数遥感反演方法

Table 5 Main retrieval methods of soil parameters in tidal flats from remote sensing images

土壤参数	主要数据源	研究方法	参考文献
潮间带滩涂沉积物粒度参数	Landsat TM/ Sentinel-2 影像	非参数回归; 参数回归	(Li 等, 2021; Kang 等, 2020; Zhang 等, 2023)
潮滩底栖微藻叶绿素 a	实测高光谱数据	参数回归	(Barillé 等, 2011)
潮滩裸面粗糙度和露滩含水量	ENVISAT ASAR 影像	Zribi-Dechambre 模型	(Han 和 Peng, 2012)
潮滩土壤盐度	HyMap 高光谱扫描仪	非参数回归	(Farifteh 等, 2007)
潮滩土壤重金属	HyMap 高光谱扫描仪	参数回归	(Shi 等, 2014)
潮滩土壤理化性质和微量元素	实测高光谱数据	非参数回归	(徐明星 等, 2011)

表 6 近岸水色遥感定量反演方法

Table 6 Main retrieval methods of ocean color parameters in coastal zone from remote sensing images

水质参数	主要数据源	研究方法	参考文献
叶绿素 a	Landsat 系列; HICO	参数回归; 非参数回归	(Keith 等, 2014; Nazeer 和 Nichol, 2016; Yao 等, 2023)
浊度/透明度	水面高光谱实测; SeaWiFS	物理传输和非参数回归	(Dogliotti 等, 2015)
固体悬浮物	MODIS; MERIS, Sentinel-2、Sentinel-3	参数回归; 2SeaColor 模型	(Kim 等, 2017; Arabi 等, 2020)
溶解性有机碳和有色可溶性有机物	MERIS, Sentinel-2、Sentinel-3; MERIS	2SeaColor 模型; MOD2SEA 模型	(Arabi 等, 2020; Du 等, 2021)
氮和磷	Landsat 8 影像	参数回归; 非参数回归	(Zhang 等, 2020, 2024a; Zhu 等, 2023)
海面盐度	SMOS 和 SMAP	参数回归	(Dossa 等, 2021)

4.5 海岸带遥感的多领域交叉应用

(1) 陆海统筹研究进展。海岸带是海洋系统和陆地系统复合交叉的地理单元，是受海陆相互作用的独特环境体系，内部系统复杂且联系密切，生态保护和开发利用矛盾突出，使得海岸带管理充满了挑战。一方面，目前存在多个以中高分辨率卫星影像为主要数据源的全球尺度土地利用/覆盖分类产品，如美国地质调查局的 IGBP-DISCover、美国马里兰大学的 UMD、欧盟联合研究中心的 GLC2000、美国波士顿大学的 MCD12Q1、欧洲空间局的 GlobCover 和 CCI-LC、中国清华大学的 FROM-GLC、中国国家基础地理信息中心的 GlobeLand30、中国科学院空天信息创新研究院的 GLC_FCS30D 以及武汉大学的 CLDC 等 (Klemas, 2009, 2011; 邸向红 等, 2014; 侯婉和侯西勇, 2018)。这些依托于遥感对地观测技术的土地利用/覆盖分类产品为真实、准确掌握陆海资源基本情况和变化规律，摸清陆海资源“家底”提供了重要基础数据，能够为优化陆海要素配置、绘制陆海统筹空间规划“一张图”提供支持。但是，现有土地利用/覆盖分类系统不专门针对海岸带区域，缺少水陆交互对海岸带区域空间范围界定和地表

类型识别的影响研究。另一方面，海岸带内部的多个系统存在着复杂的交互作用，不同系统间的物质交换和能量流动在人类介入后变得更加不可预测。如沿海城市人口增长、经济高速发展加快了对土地资源的消耗，围填海工程造成了大面积的海域空间被改造成建设用地、农田及养殖塘，导致了经济发展与滩涂湿地、自然岸线保护之间的冲突，并损害着海岸带生态系统服务价值，威胁着海岸带生态系统安全 (Klemas, 2013; 李加林 等, 2022)。针对海岸带生态安全评估，国内外学者已在多种尺度上开展了大量实证研究，包括区域尺度的生态安全综合评估、水鸟及其栖息地调查等 (范冰雄 等, 2023)。然而，受制于海岸带地区多界面和多维度交互的特征，大多数研究侧重于单一物种或单一要素，缺乏多物种—多生境—多尺度的综合考量，尤其缺乏多圈层、多要素、多类型交互作用下海岸带生态安全评估、陆海统筹管理研究。

(2) 海岸带生态修复研究进展。海岸带生态修复研究与实践得到了持续发展，修复对象逐渐多元化，已涵盖了牡蛎礁、盐沼、红树林、珊瑚礁、海草床、海藻场等多种典型生境 (McCarthy

等, 2017; 李杨帆 等, 2020)。已有研究从人类活动影响、景观完整度、水文连通性等角度建立了适合的遥感生境质量评价指标体系, 用于生态系统现状调查、格局演变分析、胁迫因子识别、修复成效评价等 (Amer 等, 2017; 叶有华 等, 2021)。另外, 遥感技术也广泛应用于外来入侵物种灾害防治, 如准确了解互花米草等物种的空间分布状况, 评估并跟踪清除状态等 (Tian 等, 2020)。在空间尺度上, 海岸带生态修复大体经历了两个阶段: 一是 20 世纪 90 年代中期以前, 主要以单一生境、物种或局部小尺度的修复为主; 二是 20 世纪 90 年代中期以后, 统筹规划海岸带生态修复的重要性开始逐渐得到重视, 大尺度的生态修复规划日益增多, 如美国切萨皮克湾的牡蛎礁修复, 美国弗吉尼亚东岸的海草床修复, 荷兰瓦登海的大规模海草床修复, 中国深圳湾红树林湿地修复, 中国三门湾牡蛎礁修复等 (骆永明, 2016; Cadier 等, 2020; Bertolini 和 da Mosto, 2021; 杨波 等, 2023)。尽管如此, 遥感技术服务于海岸带生态修复仍然存在不足, 例如, 把植被恢复监测作为单一指标, 较少关注生态系统的整体性修复和修复区域选址的科学性评估。

(3) 海岸带防灾减灾研究进展。海岸带灾害主要类型有海岸带地质灾害 (滑坡、海啸等)、海岸带生态灾害 (溢油、绿潮等)、海岸带气象灾害 (风暴潮、寒潮等)。对海岸带灾害进行监测、评估、预报、预警和应急处置, 对于保护海岸带区域的生命财产安全具有重要意义 (王焰新 等, 2020; 王江波 等, 2023)。早期学者多聚焦于灾害损失评估, 基于历史宏观数据, 对海岸带灾害造成的经济损失率、直接经济损失或总损失进行建模, 形成了丰富的人口和经济损失评估理论和方法体系 (Dissanayaka 等, 2022)。进一步, 利用遥感技术的大范围、实时性、多谱段等特性以及卫星组网观测技术, 监测海岸带灾害的形成过程及演进趋势, 如台风中心及行进路径、溢油位置及扩散范围, 建立海岸带灾害管理和决策系统, 实现历史灾害查询, 研究灾害发生的时空规律及变化分析, 结合海洋模式及海流数据, 预测自然灾害的影响区域, 已被广泛应用于灾情统计、灾后救援等 (李清泉 等, 2016; Kucharczyk 和 Hugenholtz, 2021)。然而, 解析海岸带极端灾害致灾机理及演变机制, 海量数据驱动的海岸带灾害预测预报模型仍然缺乏。

5 海岸带遥感的机遇与挑战

5.1 海岸带遥感传感器设计

(1) 面向海岸带测绘: 开展自主 532 nm 通道和 486 nm 夫琅禾费暗线蓝光通道的新型激光雷达卫星传感器研制, 突破高测深精度、高空间采样密度、小足印、高重访频率等关键技术问题。利用组网观测技术途径提升重访频率, 实现对近岸海域高透明度水体时间窗口的有效捕捉, 并发展高海况、水体浑浊条件下水下激光测深能力提升技术, 实现忽略海况和水质条件下的水下地形精准测绘, 进而解决海岸带陆地、潮间带和浅海区域一体化探测问题。

(2) 面向海岸带资源调查和监测: 研发基于地球静止轨道的高时间分辨率海岸带传感器, 突破提升高轨卫星平台空间分辨率的关键技术, 解决高质量、高捕捉能力的海岸带高分辨遥感影像获取难题。解决大尺度海岸带自然资源精细化表征问题。研发单星平台多传感器分区域拍摄或多星组网观测技术, 提升对变化剧烈海岸带的遥感影像覆盖能力, 解决我国海岸带高频覆盖监测难题。

(3) 面向海岸带环境要素定量监测: 建设海岸带陆地、潮间带和海面多场景实验场和定标场, 研发高光谱数据定标和星上波段漂移校正技术, 解决海岸带环境要素定量监测和反演光谱精准定标难题。设计光谱波段、增益、曝光时间可编程调整的高光谱传感器, 根据不同应用需求, 动态调整高光谱传感器的采集波段, 在减少数据采集量和降低数据传输压力的同时, 提升数据拍摄质量和定标效果, 提高对水体水质要素弱信号的检测能力, 实现海岸带目标弱信号提取问题。

5.2 电磁波与海岸带地物交互作用机理

(1) 合理布局高质量现场测量, 提升海岸带环境物理光学特性认知。现有实地测量和卫星遥感数据中有效数据量时空分布性及利用率有限, 未来需要研究论证海岸带现场测量站点的科学布局, 制定和完善海岸带高质量数据处理及共享机制, 提升时空变化快且复杂的海岸带大气海洋物质物理光学特性认识能力。目前现场测量技术一定程度上限制了对真实大气和海洋中颗粒物的种

类组成和物理光学性质的认识程度,除了充分挖掘历史测量数据有效信息,研制高精度自动连续大气海洋颗粒物物理光学性质测量仪器装备也是未来研究的一个重要方面。

(2) 亟待后续研究创新真实大气海洋物质散射吸收特性高精度模拟计算方法,形成高质量大气地表耦合辐射传输模拟软件产品。大气海洋物质散射吸收特性的精确计算和不同物质间相互作用认知是进行高精度大气海洋辐射传输模拟的重要前提,包括大气气溶胶不同组分构成及相互作用、气溶胶—云之间的相互作用、海洋组分构成及物理光学特性等。准确地进行大气—海岸带界面的耦合辐射传输模拟将成为未来研究热点和难点。

5.3 海岸带遥感数据处理与信息提取

(1) 探明复杂降质条件下的海岸带遥感成像机理,发展基于遥感AI大模型的海岸带复杂成像条件下综合质量提升方法,实现噪声、云覆盖、分辨率降质等复杂降质影像的协同质量提升。

(2) 发展海岸带遥感星上在轨实时数据处理技术,开展遥感数据星上处理的软硬件、算法和星上任务规划等方面研究,实现高时效性任务的快速响应,改革传统先星上数据下载、后地面数据处理的传统方式,实现海岸带水质排污、海岸带灾害等的实时监测与信息反馈。

(3) 深度融合遥感探测机理和AI大模型,发展海岸带全域遥感信息高精度稳健信息提取方法。充分考虑海岸带采样困难的现状,利用域适应在跨场景/跨时相信息提取中的优势,构建基于域适应的海岸带遥感信息高精度稳健提取模型,建立大尺度遥感影像的信息提取模型,实现小样本下海岸带大范围地物信息的高精度提取。

5.4 海岸带地表参数定量遥感反演

(1) 顾及海岸带高盐分水体与特殊植被类型及地表高度破碎化特点,未来需要改进现有辐射传输模型、光能利用率模型和过程模型,并通过地理大数据计算或AI大模型模拟,解析复杂海岸带环境下植被叶片和冠层辐射传输过程及其光谱辐射特性,构建适用于海岸带植被叶片和冠层的物理模型及碳循环模型,厘清各尺度遥感反演机理,海岸带地表参数地高时空稳定量估算。

(2) 联合声纳、蓝绿LiDAR、高光谱等多源遥感技术构建海草遥感监测体系,克服不同水环境质量和海藻的干扰,研发不同海草基质类型的遥感识别方法并监测其时空动态变化,不断完善海草遥感监测机理。攻克珊瑚礁水体光谱纠正和底栖物质水下光谱测量技术,高精度监测沉浸水中的珊瑚礁水平淤涨或侵蚀,以及其铅垂方向微小沉降。

(3) 建立适宜的数学模型描述潮滩动力学过程和沉积物输运过程,协同高空间分辨率、多时相、多角度的遥感传感器构建潮滩土壤理化参数定量反演模型。厘清不同水体组分的光学特性,探明近岸水体不同色素之间的光学影响机制,削弱色素反演时其他色素引起的精度偏差,未来需要进一步攻克多源传感器辐射特性差异和观测角度、观测时刻不一致带来的反演精度误差,建立时空稳健的水质反演模型,实现对近海岸带水质的高精度估计。

5.5 海岸带遥感的多领域交叉应用

(1) 基于遥感对地观测技术所提供的长时序、多模态数据,高频次、精细化获取海岸带地表覆被类型及形态演化信息,系统梳理生态系统的类型、结构及特征,评估生态系统关键功能韧性,加强陆海空间资源及生态环境要素之间的内部结构及相互作用关系研究,实施海岸带空间利用冲突诊断及调控,协同海岸带规划管控与生态安全保护,实现海岸带可持续与陆海统筹、河海兼顾的协调发展。

(2) 针对海岸带生态修复全过程监测及蓝碳精准核算,以卫星遥感和生态定位站监测为主,以无人机和现场调查为辅,获取地表覆盖类型、植被长势、水质参数等多生态要素,精准识别系统性生态问题,兼顾生态系统格局与生态修复质量,构建考虑水源涵养、水土保持、固碳能力、生态系统承载力、生态系统服务价值等的综合监测指标体系,实现基于遥感技术的海岸带生态修复监测与绩效评价。

(3) 面向台风、海啸、溢油、赤潮等海岸带灾害,有针对性布设电磁、热红外、高清岸基摄像机等传感器,协调具备地球同步轨道等特殊观测能力的卫星,借助理学、计算机科学、物理学、数学、海洋学、生态学、管理学、社会学

等多学科知识, 加强致灾机理、承载体承灾能力、风险体识别、风险区划分研究, 发展多源数据深度融合和智能化信息挖掘方法, 着重关注灾害预测与风险评估, 提升遥感技术在海岸带防灾减灾领域的应急保障能力。

6 结 语

本文基于 WOS 和 CNKI 核心数据库中的 16765 篇研究论文开展文献聚类分析, 并绘制了关键词共现图谱, 进而从遥感传感器设计、电磁波与地物交互作用机理、遥感数据处理与信息提取、地表参数定量遥感反演、多领域交叉应用等五个方面系统梳理了当前海岸带遥感的关键科学问题, 并综述了每个科学问题的研究进展。在此基础上, 本文进一步讨论了海岸带遥感未来发展所面临的机遇和挑战, 主要包括: (1) 顾及海岸带水陆时空异质性高、气候多变、地表要素复杂等特点, 研发特定传感器谱段、观测模式、轨道模式和轨道倾角的新一代卫星载荷为海岸带自然资源大尺度、高频次监测、精细探测提供支撑; (2) 精准解析海岸带环境物理光学特性, 整合地学大数据和数值模拟技术研发真实大气海洋物质散射吸收特性高精度计算方法, 厘清海岸带大气—陆地—水体界面辐射传输过程; (3) 通过遥感 AI 大模型和云计算技术研发海岸带复杂成像条件下遥感影像质量综合提升方法, 发展面向海岸带全域的遥感信息高精度、智能提取; (4) 改进现有辐射传输模型、光能利用率模型和过程模型, 解析海岸带水陆要素辐射传输机理, 构建基于 AI 大模型驱动的“机理—数据”双驱动的地表参数定量反演模型, 攻克多源传感器辐射特性差异和观测角度、观测时刻不一致带来的反演精度误差; (5) 海岸带陆海统筹、生态修复和防灾减灾等多领域交叉应用深入促使多学科深度融合形成更综合的系统科学技术。

参考文献 (References)

- Abdallah H, Baghdadi N, Bailly J S, Pastol Y and Fabre F. 2012. WaLiD: a new LiDAR simulator for waters. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 9(4): 744-748 [DOI: 10.1109/LGRS.2011.2180506]
- Ali A M, Darvishzadeh R, Shahi K R and Skidmore A. 2019. Validating the predictive power of statistical models in retrieving leaf dry matter content of a coastal wetland from a sentinel-2 image. *Remote Sensing*, 11(16): 1936 [DOI: 10.3390/rs11161936]
- Almar R, Ranasinghe R, Bergsma E W J, Diaz H, Melet A, Papa F, Voudoukas M, Athanasiou P, Dada O, Almeida L P and Kestenare E. 2021. A global analysis of extreme coastal water levels with implications for potential coastal overtopping. *Nature Communications*, 12(1): 3775 [DOI: 10.1038/s41467-021-24008-9]
- Amani M, Ghorbanian A, Ahmadi S A, Kakooei M, Moghimi A, Mirmazloumi S M, Moghaddam S H A, Mahdavi S, Ghahremanloo M, Parsian S, Wu Q S and Brisco B. 2020. Google earth engine cloud computing platform for remote sensing big data applications: a comprehensive review. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 13: 5326-5350 [DOI: 10.1109/JSTARS.2020.3021052]
- Amer R, Kolker A S and Muscietta A. 2017. Propensity for erosion and deposition in a deltaic wetland complex: implications for river management and coastal restoration. *Remote Sensing of Environment*, 199: 39-50 [DOI: 10.1016/j.rse.2017.06.030]
- Apostolopoulos D and Nikolakopoulos K. 2021. A review and meta-analysis of remote sensing data, GIS methods, materials and indices used for monitoring the coastline evolution over the last twenty years. *European Journal of Remote Sensing*, 54(1): 240-265 [DOI: 10.1080/22797254.2021.1904293]
- Arabi B, Salama M S, Pitarch J and Verhoef W. 2020. Integration of in-situ and multi-sensor satellite observations for long-term water quality monitoring in coastal areas. *Remote Sensing of Environment*, 239: 111632 [DOI: 10.1016/j.rse.2020.111632]
- Baloloy A B, Blanco A C, Ana R R C S and Nadaoka K. 2020. Development and application of a new mangrove vegetation index (MVI) for rapid and accurate mangrove mapping. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 166: 95-117 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2020.06.001]
- Barril   L, Mouget J L, M  l  der V, Rosa P and Jesus B. 2011. Spectral response of benthic diatoms with different sediment backgrounds. *Remote Sensing of Environment*, 115(4): 1034-1042 [DOI: 10.1016/j.rse.2010.12.008]
- Berk A, Conforti P and Hawes F. 2015. An accelerated line-by-line option for MODTRAN combining on-the-fly generation of line center absorption within 0.1 cm-1 bins and pre-computed line tails// *Proceedings of SPIE 9472, Algorithms and Technologies for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery XXI*. Baltimore: SPIE: 947217 [DOI: 10.1117/12.2177444]
- Berk A, Conforti P, Kennett R, Perkins T, Hawes F and van den Bosch J. 2014. MODTRAN   6: a major upgrade of the MODTRAN   radiative transfer code//*Proceedings of 2014 6th Workshop on Hyperspectral Image and Signal Processing*. Lausanne: IEEE: 1-4 [DOI: 10.1109/WHISPERS.2014.8077573]
- Bertolini C and da Mosto J. 2021. Restoring for the climate: a review of coastal wetland restoration research in the last 30 years. *Restoration Ecology*, 29(7): e13438 [DOI: 10.1111/rec.13438]

- Bisson K M, Boss E, Werdell P J, Ibrahim A and Behrenfeld M J. 2021. Particulate backscattering in the global ocean: a comparison of independent assessments. *Geophysical Research Letters*, 48(2): e2020GL090909 [DOI: 10.1029/2020GL090909]
- Cadier C, Bayraktarov E, Piccolo R and Adame M F. 2020. Indicators of coastal wetlands restoration success: a systematic review. *Frontiers in Marine Science*, 7: 600220 [DOI: 10.3389/fmars.2020.600220]
- Cai Y L, Suo L L, Sun X and Zhao B. 2019. Review of methods for coral reef bleaching monitoring. *Marine Environmental Science*, 38(5): 776-781 (蔡玉林, 索琳琳, 孙旋, 赵冰. 2019. 珊瑚礁白化监测方法研究进展. *海洋环境科学*, 38(5): 776-781) [DOI: 10.13634/j.cnki.mes.2019.05.019]
- Cao Z G, Ma R H, Duan H T, Pahlevan N, Melack J, Shen M and Xue K. 2020. A machine learning approach to estimate chlorophyll-a from Landsat-8 measurements in inland lakes. *Remote Sensing of Environment*, 248: 111974 [DOI: 10.1016/j.rse.2020.111974]
- Castillo M E, Baldwin E M, Casarin R S, Vanegas G P and Juaréz M A. 2012. Characterization of risks in coastal zones: a review. *CLEAN – Soil, Air, Water*, 40(9): 894-905 [DOI: 10.1002/clen.201100679]
- Chadwick J. 2011. Integrated LiDAR and IKONOS multispectral imagery for mapping mangrove distribution and physical properties. *International Journal of Remote Sensing*, 32(21): 6765-6781 [DOI: 10.1080/01431161.2010.512944]
- Chami M, Lafrance B, Fougne B, Chowdhary J, Harmel T and Waquet F. 2015. OSOAA: a vector radiative transfer model of coupled atmosphere-ocean system for a rough sea surface application to the estimates of the directional variations of the water leaving reflectance to better process multi-angular satellite sensors data over the ocean. *Optics Express*, 23(21): 27829-27852 [DOI: 10.1364/OE.23.027829]
- Chami M, Santer R and Dilligeard E. 2001. Radiative transfer model for the computation of radiance and polarization in an ocean – atmosphere system: polarization properties of suspended matter for remote sensing. *Applied Optics*, 40(15): 2398-2416 [DOI: 10.1364/AO.40.002398]
- Che H, Zhang X Y, Xia X, Goloub P, Holben B, Zhao H, Wang Y, Zhang X C, Wang H, Blarel L, Damiri B, Zhang R, Deng X, Ma Y, Wang T, Geng F, Qi B, Zhu J, Yu J, Chen Q and Shi G. 2015. Ground-based aerosol climatology of China: aerosol optical depths from the China Aerosol Remote Sensing Network (CARS-NET) 2002-2013. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15(13): 7619-7652 [DOI: 10.5194/acp-15-7619-2015]
- Chen C, Fu J Q, Zhang S and Zhao X. 2019. Coastline information extraction based on the tasseled cap transformation of Landsat-8 OLI images. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 217: 281-291 [DOI: 10.1016/j.ecss.2018.10.021]
- Chen C, Liang J T, Xie F, Hu Z J, Sun W W, Yang G, Yu J, Chen L, Wang L H, Wang L Y, Chen H X, He X Y and Zhang Z L. 2022a. Temporal and spatial variation of coastline using remote sensing images for Zhoushan archipelago, China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 107: 102711 [DOI: 10.1016/j.jag.2022.102711]
- Chen C, Ma Y, Ren G B and Wang J B. 2022b. Aboveground biomass of salt-marsh vegetation in coastal wetlands: sample expansion of in situ hyperspectral and Sentinel-2 data using a generative adversarial network. *Remote Sensing of Environment*, 270: 112885 [DOI: 10.1016/j.rse.2021.112885]
- Chen J, Jönsson P, Tamura M, Gu Z H, Matsushita B and Eklundh L. 2004. A simple method for reconstructing a high-quality NDVI time-series data set based on the Savitzky – Golay filter. *Remote Sensing of Environment*, 91(3/4): 332-344 [DOI: 10.1016/j.rse.2004.03.014]
- Collin A, Long B and Archambault P. 2012. Merging land-marine realms: spatial patterns of seamless coastal habitats using a multi-spectral LiDAR. *Remote Sensing of Environment*, 123: 390-399 [DOI: 10.1016/j.rse.2012.03.015]
- Coveney S, Fotheringham A S, Charlton M and McCarthy T. 2010. Dual-scale validation of a medium-resolution coastal DEM with terrestrial LiDAR DSM and GPS. *Computers and Geosciences*, 36(4): 489-499 [DOI: 10.1016/j.cageo.2009.10.003]
- Cracknell A P and Ibrahim M. 1988. Bathymetry studies on the coastal waters (Red Sea) of Jeddah, Saudi Arabia, using shuttle MOMS-01 data. *International Journal of Remote Sensing*, 9(6): 1161-1165 [DOI: 10.1080/01431168808954923]
- Cui Z A, Hou Y M, Zhao R S, Wang L Y, Wang X Q, Fu Y T, Yan B and Wang L L. 2023. Typical ecological and environmental issues and countermeasures in Lingao, Hainan province. *Ocean Development and Management*, 40(7): 70-76 (崔振昂, 侯月明, 赵若思, 王陆一, 王先庆, 付玉通, 严镔, 王嘹亮. 2023. 海南临高海岸带典型生态环境问题与对策研究. *海洋开发与管理*, 40(7): 70-76) [DOI: 10.20016/j.cnki.hykyfjgl.20230816.009]
- Darvishzadeh R, Skidmore A, Abdullah H, Cherenet E, Ali A, Wang T J, Nieuwenhuis W, Heurich M, Vrieling A, O'Connor B and Paganini M. 2019. Mapping leaf chlorophyll content from Sentinel-2 and RapidEye data in spruce stands using the invertible forest reflectance model. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 79: 58-70 [DOI: 10.1016/j.jag.2019.03.003]
- Davies E J, Basedow S L and McKee D. 2021. The hidden influence of large particles on ocean colour. *Scientific Reports*, 11(1): 3999 [DOI: 10.1038/s41598-021-83610-5]
- Delmas E, Besson M, Brice M H, Burkle L A, Dalla Riva G V, Fortin M J, Gravel D, Guimarães Jr P R, Hembry D H, Newman E A, Olesen J M, Pires M M, Yeakel J D and Poisot T. 2019. Analysing ecological networks of species interactions. *Biological Reviews*, 94(1): 16-36 [DOI: 10.1111/brv.12433]
- Di X H, Hou X Y and Wu L. 2014. Land use classification system for China's coastal zone based on remote sensing. *Resources Science*,

- 36(3): 463-472 (邸向红, 侯西勇, 吴莉. 2014. 中国海岸带土地利用遥感分类系统研究. 资源科学, 36(3): 463-472)
- Dissanayaka K D C R, Tanaka N and Vinodh T L C. 2022. Integration of Eco-DRR and hybrid defense system on mitigation of natural disasters (Tsunami and Coastal Flooding): a review. *Natural Hazards*, 110(1): 1-28 [DOI: 10.1007/s11069-021-04965-6]
- Dogliotti A I, Ruddick K G, Nechad B, Doxaran D and Knaeps E. 2015. A single algorithm to retrieve turbidity from remotely-sensed data in all coastal and estuarine waters. *Remote Sensing of Environment*, 156: 157-168 [DOI: 10.1016/j.rse.2014.09.020]
- Dossa A N, Alory G, Da Silva A C, Dahunsi A M and Bertrand A. 2021. Global analysis of coastal gradients of sea surface salinity. *Remote Sensing*, 13(13): 2507 [DOI: 10.3390/rs13132507]
- Du J, Cao B C and Chen S Y. 2019. Shallow water bathymetry based on satellite-borne two-media photogrammetry. *Modern Electronics Technique*, 42(11): 158-160, 164 (杜娟, 曹彬才, 陈世媛. 2019. 基于卫星立体双介质的浅海水深测量方法. 现代电子技术, 42(11): 158-160, 164) [DOI: 10.16652/j.issn.1004-373x.2019.11.036]
- Du Z H, Qi J, Wu S S, Zhang F and Liu R Y. 2021. A spatially weighted neural network based water quality assessment method for large-scale coastal areas. *Environmental Science and Technology*, 55(4): 2553-2563 [DOI: 10.1021/acs.est.0c05928]
- Duan Y Q, Li X, Zhang L P, Liu W, Liu S, Chen D and Ji H Y. 2020. Detecting spatiotemporal changes of large-scale aquaculture ponds regions over 1988-2018 in Jiangsu Province, China using Google Earth Engine. *Ocean and Coastal Management*, 188: 105144 [DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2020.105144]
- Ebel P, Meraner A, Schmitt M and Zhu X X. 2021. Multisensor data fusion for cloud removal in global and all-season sentinel-2 imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 59(7): 5866-5878 [DOI: 10.1109/TGRS.2020.3024744]
- Fan B X, Li Y F, Zhang X Q and Li Y. 2023. "One map" of coastal ecological security by integrating land-sea ecosystems. *Acta Ecologica Sinica*, 43(3): 962-972 (范冰冰, 李杨帆, 张雪婷, 李艺. 2023. 海岸带区域陆海统筹生态安全研究. 生态学报, 43(3): 962-972) [DOI: 10.5846/stxb202108122227]
- Farifteh J, Van der Meer F, Atzberger C and Carranza E J M. 2007. Quantitative analysis of salt-affected soil reflectance spectra: a comparison of two adaptive methods (PLSR and ANN). *Remote Sensing of Environment*, 110(1): 59-78 [DOI: 10.1016/j.rse.2007.02.005]
- Ferretti A, Prati C and Rocca F. 2001. Multibaseline phase unwrapping for InSAR topography estimation. *Nuovo Cimento*, 24(1): 159-176
- Gao J X, Zhao S H and Hou P. 2020. Advances of remote sensing on ecology and environment in China. *Journal of Geo-information Science*, 22(4): 705-719 (高吉喜, 赵少华, 侯鹏. 2020. 中国生态环境遥感四十年. 地球信息科学学报, 22(4): 705-719) [DOI: 10.12082/dqxxkx.2020.200197]
- George R, Padalia H, Sinha S K and Kumar A S. 2018. Evaluation of the use of hyperspectral vegetation indices for estimating mangrove leaf area index in middle Andaman Island, India. *Remote Sensing Letters*, 9(11): 1099-1108 [DOI: 10.1080/2150704X.2018.1508910]
- Ghosh M K, Kumar L and Roy C. 2015. Monitoring the coastline change of Hatiya Island in Bangladesh using remote sensing techniques. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 101: 137-144 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2014.12.009]
- Ghosh S M, Behera M D and Paramanik S. 2020. Canopy height estimation using sentinel series images through machine learning models in a mangrove forest. *Remote Sensing*, 12(9): 1519 [DOI: 10.3390/rs12091519]
- Grigorieva O V, Zhukov D V, Markov A V and Mochalov V F. 2017. The retrieval of the coastal water depths from data of multi- and hyperspectral remote sensing imagery. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 30(1): 7-12 [DOI: 10.1134/S1024856017010067]
- Gupta K, Mukhopadhyay A, Giri S, Chanda A, Majumdar S D, Samanta S, Mitra D, Samal R N, Pattnaik A K and Hazra S. 2018. An index for discrimination of mangroves from non-mangroves using LANDSAT 8 OLI imagery. *MethodsX*, 5: 1129-1139 [DOI: 10.1016/j.mex.2018.09.011]
- Han G X, Song W M, Li Y, Xiao L L, Zhao Q L, Chu X J and Xie B H. 2023. Enhancement of coastal blue carbon: concepts, techniques, and future suggestions. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 38(3): 492-503 (韩广轩, 宋维民, 李远, 肖雷雷, 赵明亮, 初小静, 谢宝华. 2023. 海岸带蓝碳增汇: 理念、技术与未来建议. 中国科学院院刊, 38(3): 492-503) [DOI: 10.16418/j.issn.1000-3045.20220619001]
- Han Z and Peng F. 2012. Soil moisture quantitative study of the Nanhui tidal flat in the Yangtze River Estuary by using ENVISAT ASAR data//Proceedings of 2012 International Conference on Systems and Informatics (ICSAI2012). Yantai: IEEE: 2188-2192 [DOI: 10.1109/ICSAI.2012.6223485]
- He X Q, Pan D L, Bai Y, Zhu Q K and Gong F. 2007. Vector radiative transfer numerical model of coupled ocean-atmosphere system using matrix-operator method. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 50(3): 442-452 [DOI: 10.1007/s11430-007-2075-4]
- He Y H, Zhang D S, Qiu B W, Li Y T, Han Y S and Liu X Z. 2019. Gravity transfer characteristics and common relationships of mangroves in China and mangrove communities in typical area. *Chinese Journal of Ecology*, 38(8): 2326-2336 (何玉花, 张东水, 邱炳文, 李燕婷, 韩用顺, 刘贤赵. 2019. 中国红树林与典型区红树林群落重心迁移特征及其性关系. 生态学杂志, 38(8): 2326-2336) [DOI: 10.13292/j.1000-4890.201908.038]
- Holben B N, Eck T F, Slutsker I, Tanré D, Buis J P, Setzer A, Vermote E, Reagan J A, Kaufman Y J, Nakajima T, Lavenue F, Jankowiak I and Smirnov A. 1998. AERONET—a federated instrument network and data archive for aerosol characterization. *Remote Sensing of Environment*, 66(1): 1-16 [DOI: 10.1016/S0034-4257(98)00031-5]

- Hollstein A and Fischer J. 2012. Radiative transfer solutions for coupled atmosphere ocean systems using the matrix operator technique. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 113(7): 536-548 [DOI: 10.1016/j.jqsrt.2012.01.010]
- Hou T T, Sun W W, Chen C, Yang G, Meng X C and Peng J T. 2022. Marine floating raft aquaculture extraction of hyperspectral remote sensing images based decision tree algorithm. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 111: 102846 [DOI: 10.1016/j.jag.2022.102846]
- Hou W and Hou X Y. 2018. Remote sensing classification system of land use and land cover for global coastal zone considering fine classification of wetlands. *Tropical Geography*, 38(6): 866-873 (侯婉, 侯西勇. 2018. 考虑湿地精细分类的全球海岸带土地利用/覆盖遥感分类系统. *热带地理*, 38(6): 866-873) [DOI: 10.13284/j.cnki.rddl.003088]
- Hou X Y, Di X H, Hou W, Wu L, Liu J, Wang J H, Su H F, Lu X, Ying L L, Yu X Y, Wu T, Zu M M, Han L and Li M J. 2018. Accuracy evaluation of land use mapping using remote sensing techniques in coastal zone of China. *Journal of Geo-Information Science*, 20(10): 1478-1488 (侯西勇, 邸向红, 侯婉, 吴莉, 刘静, 王俊惠, 苏红帆, 路晓, 应兰兰, 于新洋, 毋亭, 朱明明, 韩磊, 李明杰. 2018. 中国海岸带土地利用遥感制图及精度评价. *地球信息科学学报*, 20(10): 1478-1488) [DOI: 10.12082/dqxxkx.2018.180184]
- Hou X Y, Liu J, Song Y and Li X W. 2016. Environmental-ecological effect of development and utilization of China's coastline and policy recommendations. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 31(10): 1143-1150 (侯西勇, 刘静, 宋洋, 李晓伟. 2016. 中国大陆海岸线开发利用的生态环境影响与政策建议. *中国科学院院刊*, 31(10): 1143-1150) [DOI: 10.16418/j.issn.1000-3045.2016.10.002]
- Hou X Y and Xu X L. 2011. Spatial patterns of land use in coastal zones of China in the early 21st century. *Geographical Research*, 30(8): 1370-1379 (侯西勇, 徐新良. 2011. 21世纪初中国海岸带土地利用空间格局特征. *地理研究*, 30(8): 1370-1379)
- Hu Y B, Ren G B, Ma Y, Yang J F, Wang J B, An J B, Liang J, Ma Y Q and Song X K. 2022. Coastal wetland hyperspectral classification under the collaborative of subspace partition and infinite probabilistic latent graph ranking. *Science China Technological Sciences*, 65(4): 759-777 [DOI: 10.1007/s11431-021-1987-8]
- Hu Y B, Zhang J, Ma Y, An J B, Ren G B and Li X M. 2019. Hyperspectral coastal wetland classification based on a multiobject convolutional neural network model and decision fusion. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 16(7): 1110-1114 [DOI: 10.1109/LGRS.2018.2890421]
- Huang B, Li Y, Han X Y, Cui Y Z, Li W B and Li R R. 2015. Cloud removal from optical satellite imagery with SAR imagery using sparse representation. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 12(5): 1046-1050 [DOI: 10.1109/LGRS.2014.2377476]
- Huang K, Yang G, Yuan Y, Sun W W, Meng X C and Ge Y. 2022. Optical and SAR images Combined Mangrove Index based on multi-feature fusion. *Science of Remote Sensing*, 5: 100040 [DOI: 10.1016/j.srs.2022.100040]
- Ji T Y, Yokoya N, Zhu X X and Huang T Z. 2018. Nonlocal tensor completion for multitemporal remotely sensed images' inpainting. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 56(6): 3047-3061 [DOI: 10.1109/TGRS.2018.2790262]
- Jiang L, Yu J and Zhang B L. 2022. Analysis of the current situation and development of coastal zone remote sensing research. *Journal of Applied Oceanography*, 41(2): 215-228 (姜璐, 余静, 张宝路. 2022. 海岸带遥感研究现状及发展趋势分析. *应用海洋学学报*, 41(2): 215-228) [DOI: 10.3969/J.ISSN.2095-4972.2022.02.006]
- Jin D J, Wu F, Yu K, Li Q, Zhang Z G, Zhang Y J, Zhang W K, Li Y Z, Ji X Y, Gao Y, Li J and Gong J H. 2020. Large-scale application test and evaluation of an airborne lidar bathymetry system-a case study in China's coastal zone. *Infrared and Laser Engineering*, 49(S2): 20200317 (金鼎坚, 吴芳, 于坤, 李奇, 张宗贵, 张永军, 张文凯, 李勇志, 冀欣阳, 高宇, 李京, 龚建华. 2020. 机载激光雷达测深系统大规模应用测试与评估——以中国海岸带为例. *红外与激光工程*, 49(S2): 20200317) [DOI: 10.3788/IRLA20200317]
- Jin Z H, Charlock T P, Rutledge K, Stamnes K and Wang Y J. 2006. Analytical solution of radiative transfer in the coupled atmosphere-ocean system with a rough surface. *Applied Optics*, 45(28): 7443-7455 [DOI: 10.1364/AO.45.007443]
- Jin Z H and Stamnes K. 1994. Radiative transfer in nonuniformly refracting layered media: atmosphere - ocean system. *Applied Optics*, 33(3): 431-442 [DOI: 10.1364/AO.33.000431]
- Kang Y Y, Lv W T, He J Y and Ding X R. 2020. Remote sensing of time-varying tidal flat topography, Jiangsu Coast, China, based on the waterline method and an artificial neural network model. *Applied Sciences*, 10(10): 3645 [DOI: 10.3390/app10103645]
- Kaufman Y J, Tanré D and Boucher O. 2002. A satellite view of aerosols in the climate system. *Nature*, 419(6903): 215-223 [DOI: 10.1038/nature01091]
- Keith D J, Schaeffer B A, Lunetta R S, Gould Jr R W, Rocha K and Cobb D J. 2014. Remote sensing of selected water-quality indicators with the hyperspectral imager for the coastal ocean (HICO) sensor. *International Journal of Remote Sensing*, 35(9): 2927-2962 [DOI: 10.1080/01431161.2014.894663]
- Kim Y, Kimball J S, Glassy J and Du J Y. 2017. An extended global Earth system data record on daily landscape freeze - thaw status determined from satellite passive microwave remote sensing. *Earth System Science Data*, 9(1): 133-147 [DOI: 10.5194/essd-9-133-2017]
- Klemas V. 2011. Remote sensing of wetlands: case studies comparing practical techniques. *Journal of Coastal Research*, 27(3): 418-427 [DOI: 10.2112/JCOASTRES-D-10-00174.1]
- Klemas V. 2013. Remote sensing of coastal wetland biomass: an overview. *Journal of Coastal Research*, 29(5): 1016-1028 [DOI: 10.2112/JCOASTRES-D-12-00237.1]
- Klemas V V. 2009. The role of remote sensing in predicting and determining coastal storm impacts. *Journal of Coastal Research*,

- 2009(256): 1264-1275 [DOI: 10.2112/08-1146.1]
- Koma Z, Seijmonsbergen A C and Kissling W D. 2021. Classifying wetland-related land cover types and habitats using fine-scale lidar metrics derived from country-wide Airborne Laser Scanning. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 7(1): 80-96 [DOI: 10.1002/rse2.170]
- Kotchenova S Y and Vermote E F. 2007. Validation of a vector version of the 6S radiative transfer code for atmospheric correction of satellite data. Part II. Homogeneous Lambertian and anisotropic surfaces. *Applied Optics*, 46(20): 4455-4464 [DOI: 10.1364/AO.46.004455]
- Kotchenova S Y, Vermote E F, Matarrese R and Klemm Jr F J. 2006. Validation of a vector version of the 6S radiative transfer code for atmospheric correction of satellite data. Part I: path radiance. *Applied Optics*, 45(26): 6762-6774 [DOI: 10.1364/AO.45.006762]
- Kottek M, Grieser J, Beck C, Rudolf B and Rubel F. 2006. World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*, 15(3): 259-263 [DOI: 10.1127/0941-2948/2006/0130]
- Kravitz J, Matthews M, Bernard S and Griffith D. 2020. Application of Sentinel 3 OLCI for chl-a retrieval over small inland water targets: successes and challenges. *Remote Sensing of Environment*, 237: 111562 [DOI: 10.1016/j.rse.2019.111562]
- Kucharczyk M and Hugenholtz C H. 2021. Remote sensing of natural hazard-related disasters with small drones: global trends, biases, and research opportunities. *Remote Sensing of Environment*, 264: 112577 [DOI: 10.1016/j.rse.2021.112577]
- Li A N, Bian J H, Zhang Z J, Zhao W and Yin G F. 2016. Progresses, opportunities, and challenges of mountain remote sensing research. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 20(5): 1199-1215 (李爱农, 边金虎, 张正健, 赵伟, 尹高飞. 2016. 山地遥感主要研究进展, 发展机遇与挑战. *遥感学报*, 20(5): 1199-1215) [DOI: 10.11834/jrs.20166227]
- Li J, Carlson B E, Yung Y L, Lv D R, Hansen J, Penner J E, Liao H, Ramaswamy V, Kahn R A, Zhang P, Dubovik O, Ding A J, Lacis A A, Zhang L and Dong Y M. 2022. Scattering and absorbing aerosols in the climate system. *Nature Reviews Earth and Environment*, 3(6): 363-379 [DOI: 10.1038/s43017-022-00296-7]
- Li J L, Shen M H, Ma R F, Yang H S, Chen Y N, Sun C Z, Liu M, Han X Q, Hu Z D and Ma X G. 2022. Marine resource economy and strategy under the background of marine ecological civilization construction. *Journal of Natural Resources*, 37(4): 829-849 (李加林, 沈满洪, 马仁锋, 杨红生, 陈一宁, 孙才志, 刘明, 韩喜球, 胡志丁, 马学广. 2022. 海洋生态文明建设背景下的海洋资源经济与海洋战略. *自然资源学报*, 37(4): 829-849) [DOI: 10.31497/zrzyxb.20220401]
- Li P, Li Z H, Dai K R, Al-Husseinawi Y, Feng W P and Wang H J. 2021. Reconstruction and evaluation of DEMs from Bistatic TanDEM-X SAR in mountainous and coastal areas of China. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 14: 5152-5170 [DOI: 10.1109/JSTARS.2021.3073782]
- Li Q Q, Lu Y, Hu S B, Hu Z W, Li H Z, Liu P, Shi T Z, Wang C S, Wang J J and Wu G F. 2016. Review of remotely sensed geo-environmental monitoring of coastal zones. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 20(5): 1216-1229 (李清泉, 卢艺, 胡水波, 胡忠文, 李洪忠, 刘鹏, 石铁柱, 汪驰升, 王俊杰, 郭国锋. 2016. 海岸带地理环境遥感监测综述. *遥感学报*, 20(5): 1216-1229) [DOI: 10.11834/jrs.20166168]
- Li W B, Li Y and Chan J C W. 2020. Thick cloud removal with optical and SAR imagery via convolutional-mapping-deconvolutional network. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 58(4): 2865-2879 [DOI: 10.1109/TGRS.2019.2956959]
- Li X T, Chen J and Guo W. 2018. A review of the influence factors of plant phenology under different climate types. *Journal of Earth Environment*, 9(1): 16-27 (李晓婷, 陈骥, 郭伟. 2018. 不同气候类型下植物物候的影响因素综述. *地球环境学报*, 9(1): 16-27) [DOI: 10.7515/JEE181002]
- Li X W. 2006. Remote sensing science and quantitative remote sensing. *Science Focus*, 1(5): 45 (李小文. 2006. 遥感科学与定量遥感. *科学观察*, 1(5): 45)
- Li Y F, Xiang Z Y, Yang Y, Wang Q L and Li Y. 2020. Application of ecological restoration and planning based on resilience thinking in coastal areas. *Journal of Natural Resources*, 35(1): 130-140 (李杨帆, 向枝远, 杨奕, 王泉力, 李艺. 2020. 基于韧性理念的海岸带生态修复规划方法及应用. *自然资源学报*, 35(1): 130-140) [DOI: 10.31497/zrzyxb.20200112]
- Li Y Q, Bai J W, Zhang L and Li T. 2021. Review on the research of seagrass optical remote sensing monitoring. *Journal of Tropical Oceanography*, 40(6): 1-13 (李一琼, 白俊武, 张丽, 李通. 2021. 海草光学遥感监测研究综述. *热带海洋学报*, 40(6): 1-13) [DOI: 10.11978/2020110]
- Li Z W, Shen H F, Cheng Q, Li W and Zhang L P. 2019. Thick cloud removal in high-resolution satellite images using stepwise radiometric adjustment and residual correction. *Remote Sensing*, 11(16): 1925 [DOI: 10.3390/rs11161925]
- Liang C B, Cheng B, Xiao B H, He C L Q, Liu X N, Jia N and Chen J F. 2021. Semi-/weakly-supervised semantic segmentation method and its application for coastal aquaculture areas based on multi-source remote sensing images—taking the Fujian coastal area (mainly Sanduo) as an example. *Remote Sensing*, 13(6): 1083 [DOI: 10.3390/rs13061083]
- Liu K, Gong H, Cao J J and Zhu Y H. 2019. Comparison of mangrove remote sensing classification based on multi-type UAV data. *Tropical Geography*, 39(4): 492-501 (刘凯, 龚辉, 曹晶晶, 朱远辉. 2019. 基于多类型无人机数据的红树林遥感分类对比. *热带地理*, 39(4): 492-501) [DOI: 10.13284/j.cnki.rddl.003150]
- Liu M Y, Zheng H, Chen X T, Yang X W, Song J R, Zhang Y B and Man W D. 2023. Extraction of invasive plant *Spartina alterniflora* by combining vegetation phenological characteristics and ma-

- chine learning supported by GEE. Bulletin of Surveying and Mapping, (6): 36-43 (刘明月, 郑浩, 陈星彤, 杨晓芳, 宋敬茹, 张永彬, 满卫东. 2023. GEE 支持下联合植被物候特征与机器学习的入侵植物互花米草提取. 测绘通报, (6): 36-43) [DOI: 10.13474/j.cnki.11-2246.2023.0165]
- Liu P D, Shi R H, Zhang C, Zeng Y Y, Wang J P, Tao Z and Gao W. 2017. Integrating multiple vegetation indices via an artificial neural network model for estimating the leaf chlorophyll content of *Spartina alterniflora* under interspecies competition. Environmental Monitoring and Assessment, 189(11): 596 [DOI: 10.1007/s10661-017-6323-6]
- Liu S L, Zhao Y D, Li Y C and Xue Y L. 2011. Analysis at underwater topographic two-media photogrammetry with POS data. Science of Surveying and Mapping, 36(6): 42-45 (刘善磊, 赵银娣, 李英成, 薛艳丽. 2011. POS 数据用于双介质水下地形摄影测量的研究. 测绘科学, 36(6): 42-45) [DOI: 10.16251/j.cnki.1009-2307.2011.06.090]
- Liu Y X, Guo K, He X F, Xu W X and Feng Y K. 2017. Research progress of airborne laser bathymetry technology. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 42(9): 1185-1194 (刘焱雄, 郭锴, 何秀凤, 徐文学, 冯义楷. 2017. 机载激光测深技术及其研究进展. 武汉大学学报(信息科学版), 42(9): 1185-1194) [DOI: 10.13203/j.whugis20150779]
- Lou P Q, Fu B L, He H C, Chen J J, Wu T H, Lin X C, Liu L L, Fan D L and Deng T F. 2021. An effective method for canopy chlorophyll content estimation of marsh vegetation based on multiscale remote sensing data. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 14: 5311-5325 [DOI: 10.1109/JSTARS.2021.3081565]
- Lu L L, Qureshi S, Li Q T, Chen F and Shu L. 2022. Monitoring and projecting sustainable transitions in urban land use using remote sensing and scenario-based modelling in a coastal megacity. Ocean and Coastal Management, 224: 106201 [DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2022.106201]
- Lu T Q, Chen S B, Tu Y, Yu Y, Cao Y J and Jiang D Y. 2019. Comparative study on coastal depth inversion based on multi-source remote sensing data. Chinese Geographical Science, 29(2): 192-201 [DOI: 10.1007/s11769-018-1013-z]
- Lu T Q, Wu Z F, Ren X S, Yao H M and Shao C G. 2022. Comparative study on shallow water depth inversion based on GeoEye-1 and WorldView-2 remote sensing data. Haiyang Xuebao, 44(4): 134-142 (陆天启, 吴志芳, 任潇洒, 姚慧敏, 邵长高. 2022. 基于 GeoEye-1 和 WorldView-2 遥感数据的浅海水深反演比较研究. 海洋学报, 44(4): 134-142) [DOI: 10.12284/hyxb2022082]
- Luo J C, Hu X D, Wu T J, Liu W, Xia L G, Yang H P, Sun Y W, Xu N, Zhang X, Shen Z F and Zhou N. 2021. Research on intelligent calculation model and method of precision land use/cover change information driven by high-resolution remote sensing. National Remote Sensing Bulletin, 25(7): 1351-1373 (骆剑承, 胡晓东, 吴田军, 刘巍, 夏列钢, 杨海平, 孙营伟, 徐楠, 张新, 沈占锋, 周楠. 2021. 高分遥感驱动的精准土地利用与土地覆盖变化信息智能计算模型与方法研究. 遥感学报, 25(7): 1351-1373) [DOI: 10.11834/jrs.20219402]
- Luo S Z, Wang C, Pan F F, Xi X H, Li G C, Nie S and Xia S B. 2015. Estimation of wetland vegetation height and leaf area index using airborne laser scanning data. Ecological Indicators, 48: 550-559 [DOI: 10.1016/j.ecolind.2014.09.024]
- Luo Y M. 2016. Sustainability associated coastal eco-environmental problems and coastal science development in China. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 31(10): 1133-1142 (骆永明. 2016. 中国海岸带可持续发展中的生态环境问题与海岸科学发展. 中国科学院院刊, 31(10): 1133-1142) [DOI: 10.16418/j.issn.1000-3045.2016.10.001]
- Ma H Y, Ding X R, Ge X P and Xia J. 2016. Remote sensing and remote measuring approach to construct tidal flat terrain in the radial sand ridges. Haiyang Xuebao, 38(3): 111-122 (马洪羽, 丁贤荣, 葛小平, 夏娟. 2016. 辐射沙脊群潮滩地形遥感遥测构建. 海洋学报, 38(3): 111-122) [DOI: 10.3969/J.ISSN.0253-4193.2016.03.011]
- Mason D C, Amin M, Davenport I J, Flather R A, Robinson G J and Smith J A. 1999. Measurement of recent intertidal sediment transport in Morecambe Bay using the waterline method. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 49(3): 427-456 [DOI: 10.1006/ecss.1999.0508]
- McCarthy M J, Colna K E, El-Mezayen M M, Laureano-Rosario A E, Méndez-Lázaro P, Otis D B, Toro-Farmer G, Vega-Rodriguez M and Muller-Karger F E. 2017. Satellite remote sensing for coastal management: a review of successful applications. Environmental Management, 60(2): 323-339 [DOI: 10.1007/s00267-017-0880-x]
- Mendez-Rial R, Calvino-Cancela M and Martin-Herrero J. 2012. Anisotropic inpainting of the hypercube. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 9(2): 214-218 [DOI: 10.1109/LGRS.2011.2164050]
- Meng X Z, Liu D, Huang K, Yang G, Sun W W and Lu W H. 2021. Extraction method of *Spartina alterniflora* based on vegetation phenology characteristics: a case study of wetlands in the Changjiang River Delta. Marine Science Bulletin, 40(5): 591-600 (孟祥珍, 刘丹, 黄可, 杨刚, 孙伟伟, 卢文虎. 2021. 基于植被物候特征的互花米草提取方法研究——以长三角湿地为例. 海洋通报, 40(5): 591-600) [DOI: 10.11840/j.issn.1001-6392.2021.05.011]
- Miller R L and McKee B A. 2004. Using MODIS Terra 250 m imagery to map concentrations of total suspended matter in coastal waters. Remote sensing of Environment, 93(1/2): 259-266 [DOI: 10.1016/j.rse.2004.07.012]
- Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. 2022. Bulletin on the state of the Marine ecological environment of China in 2022 (中华人民共和国生态环境部. 2022. 2022 中国海洋生态环境状况公报)
- Misbari S and Hashim M. 2016. Change detection of submerged seagrass biomass in shallow coastal water. Remote Sensing, 8(3): 200 [DOI: 10.3390/rs8030200]

- Mobley C D. 2015. Polarized reflectance and transmittance properties of windblown sea surfaces. *Applied Optics*, 54(15): 4828-4849 [DOI: 10.1364/AO.54.004828]
- Mondal I, Thakur S, Juliev M, Bandyopadhyay J and De T K. 2020. Spatio-temporal modelling of shoreline migration in Sagar Island, West Bengal, India. *Journal of Coastal Conservation*, 24(4): 50 [DOI: 10.1007/s11852-020-00768-2]
- Navarro A, Young M, Allan B, Carnell P, Macreadie P and Ierodiakonou D. 2020. The application of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) to estimate above-ground biomass of mangrove ecosystems. *Remote Sensing of Environment*, 242: 111747 [DOI: 10.1016/j.rse.2020.111747]
- Nazeer M and Nichol J E. 2016. Development and application of a remote sensing-based Chlorophyll-a concentration prediction model for complex coastal waters of Hong Kong. *Journal of Hydrology*, 532: 80-89 [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2015.11.037]
- Pahlevan N, Mangin A, Balasubramanian S V, Smith B, Alikas K, Arai K, Binding C, Bélanger S, Bindin C, Bresciani M, Giardino C, Gurlin D, Fan Y Z, Harmel T, Hunter P, Ishikawa J, Kratzer S, Lehmann M K, Ligi M, Ma R H, Martin-Lauzer F R, Olmanson L, Oppelt N, Pan Y Q, Peters S, Reynaud N, Sander de Carvalho L A, Simis S, Spyarakos E, Steinmetz F, Stelzer K, Sterckx S, Tormos T, Tyler A, Vanhellemont Q and Warren M. 2021. ACIX-Aqua: a global assessment of atmospheric correction methods for Landsat-8 and Sentinel-2 over lakes, rivers, and coastal waters. *Remote Sensing of Environment*, 258: 112366 [DOI: 10.1016/j.rse.2021.112366]
- Pahlevan N, Smith B, Schalles J, Binding C, Cao Z G, Ma R H, Alikas K, Kangro K, Gurlin D, Hà N, Matsushita B, Moses W, Greb S, Lehmann M K, Ondrusek M, Oppelt N and Stumpf R. 2020. Seamless retrievals of chlorophyll-a from Sentinel-2 (MSI) and Sentinel-3 (OLCI) in inland and coastal waters: a machine-learning approach. *Remote Sensing of Environment*, 240: 111604 [DOI: 10.1016/j.rse.2019.111604]
- Pereira O J R, Ferreira L G, Pinto F and Baumgarten L. 2018. Assessing pasture degradation in the Brazilian Cerrado based on the analysis of MODIS NDVI time-series. *Remote Sensing*, 10(11): 1761 [DOI: 10.3390/rs10111761]
- Pinheiro M, Amao-Oliva J, Scheiber R, Jaeger M, Horn R, Keller M, Fischer J and Reigber A. 2020. Dual-frequency airborne SAR for large scale mapping of tidal flats. *Remote Sensing*, 12(11): 1827 [DOI: 10.3390/rs12111827]
- Pukkala T, Kuuluvainen T and Stenberg P. 1993. Below-canopy distribution of photosynthetically active radiation and its relation to seedling growth in a boreal *Pinus sylvestris* stand. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 8(1/4): 313-325 [DOI: 10.1080/02827589309382780]
- Qi H S and Hu X B. 2019. Monte Carlo Tree Search-based intersection signal optimization model with channelized section spillover. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 106: 281-302 [DOI: 10.1016/j.trc.2019.07.017]
- Qin W H and Gerstl S A W. 2000. 3-D scene modeling of semidesert vegetation cover and its radiation regime. *Remote Sensing of Environment*, 74(1): 145-162 [DOI: 10.1016/S0034-4257(00)00129-2]
- Rangel-Buitrago N, Neal W J and De Jonge V N. 2020. Risk assessment as tool for coastal erosion management. *Ocean and Coastal Management*, 186: 105099 [DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2020.105099]
- Schiffer J M, Mael L E, Prather K A, Amaro R E and Grassian V H. 2018. Sea spray aerosol: where marine biology meets atmospheric chemistry. *ACS Central Science*, 4(12): 1617-1623 [DOI: 10.1021/acscentsci.8b00674]
- Schmid K A, Hadley B C and Wijekoon N. 2011. Vertical accuracy and use of topographic LIDAR data in coastal marshes. *Journal of Coastal Research*, 27(6A): 116-132 [DOI: 10.2112/JCOASTRES-D-10-00188.1]
- Shen H F, Li X H, Cheng Q, Zeng C, Yang G, Li H F and Zhang L P. 2015. Missing information reconstruction of remote sensing data: a technical review. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 3(3): 61-85 [DOI: 10.1109/MGRS.2015.2441912]
- Shen H F, Li X H, Zhang L P, Tao D C and Zeng C. 2014. Compressed sensing-based inpainting of aqua moderate resolution imaging spectroradiometer band 6 using adaptive spectrum-weighted sparse Bayesian dictionary learning. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52(2): 894-906 [DOI: 10.1109/TGRS.2013.2245509]
- Shen H F, Meng X C and Zhang L P. 2016. An integrated framework for the spatio-temporal-spectral fusion of remote sensing images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 54(12): 7135-7148 [DOI: 10.1109/TGRS.2016.2596290]
- Shi T Z, Chen Y Y, Liu Y L and Wu G F. 2014. Visible and near-infrared reflectance spectroscopy—an alternative for monitoring soil contamination by heavy metals. *Journal of Hazardous Materials*, 265: 166-176 [DOI: 10.1016/j.jhazmat.2013.11.059]
- Sousa A I, da Silva J F, Azevedo A and Lillebø A I. 2019. Blue Carbon stock in *Zostera noltei* meadows at Ria de Aveiro coastal lagoon (Portugal) over a decade. *Scientific Reports*, 9(1): 14387 [DOI: 10.1038/s41598-019-50425-4]
- Su F Z. 2015. *Remote Sensing Assessment of Coastal Zones*. Beijing: Science Press (苏奋振. 2015. 海岸带遥感评估. 北京: 科学出版社)
- Su F Z, Gao Y, Zhou C H, Yang X M and Fei X Y. 2011. Scale effects of the continental coastline of China. *Journal of Geographical Sciences*, 21(6): 1101-1111 [DOI: 10.1007/s11442-011-0903-0]
- Sun C, Li J L, Liu Y X, Liu Y C and Liu R Q. 2021. Plant species classification in salt marshes using phenological parameters derived from Sentinel-2 pixel-differential time-series. *Remote Sensing of Environment*, 256: 112320 [DOI: 10.1016/j.rse.2021.112320]
- Sun W W, Chen C, Liu W W, Yang G, Meng X C, Wang L H and Ren K. 2023. Coastline extraction using remote sensing: a review. *GI-Science and Remote Sensing*, 60(1): 2243671 [DOI: 10.1080/

- 15481603.2023.2243671]
- Sun W W, Hou T T, Chen C, Yang G, Chen B J, Meng X C and Ren K. 2024. Mapping China's coastal aquaculture ponds expansion with sentinel-2 images during 2017-2021. *International Journal of Digital Earth*, 17(1): 2297943 [DOI: 10.1080/17538947.2023.2297943]
- Sun W W, Yang G, Chen C, Chang M H, Huang K, Meng X C and Liu L Y. 2020. Development status and literature analysis of China's earth observation remote sensing satellites. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 24(5): 479-510 (孙伟伟, 杨刚, 陈超, 常明会, 黄可, 孟祥珍, 刘良云. 2020. 中国地球观测遥感卫星发展现状及文献分析. *遥感学报*, 24(5): 479-510) [DOI: 10.11834/jrs.20209464]
- Sun W W, Yang G, Huang Y L, Mao D H, Huang K, Zhu L, Meng X C, Feng T, Chen C and Ge Y. 2024. First wetland mapping at 10-m spatial resolution in South America using multi-source and multi-feature remote sensing data. *Science China Earth Sciences*, 67(10): 3252-3269 (孙伟伟, 杨刚, 黄玉玲, 毛德华, 黄可, 朱琳, 孟祥超, 冯添, 陈超, 葛咏. 2024. 基于多源多特征遥感数据的南美洲 10 米空间分辨率湿地制图. *中国科学: 地球科学*, 54(10): 3305-3322) [DOI: 10.1360/N072023-0255]
- Takamura T. 2004. Overview of SKYNET and its activities. *Optica Purpurea Y Aplicada*, 37(3): 3303-3308
- Tang J W, Ye S F, Chen X C, Yang H L, Sun X H, Wang F M, Wen Q and Chen S B. 2018. Coastal blue carbon: concept, study method, and the application to ecological restoration. *Science China Earth Sciences*, 61(6): 637-646 (唐剑武, 叶属峰, 陈雪初, 杨华蕾, 孙晓红, 王法明, 温泉, 陈少波. 2018. 海岸带蓝碳的科学概念, 研究方法以及在生态恢复中的应用. *中国科学: 地球科学*, 48(6): 661-670) [DOI: 10.1360/n072017-00341]
- Teng Y, Zou B and Ye X M. 2022. Study on the chlorophyll *a* concentration retrieved from HY-1C satellite coastal zone imager data. *Haiyang Xuebao*, 44(5): 25-34 (滕越, 邹斌, 叶小敏. 2022. HY-1C 卫星海岸带成像仪叶绿素 *a* 浓度反演研究. *海洋学报*, 44(5): 25-34) [DOI: 10.12284/hyxb2022052]
- Tian J Y, Wang L, Li X J, Gong H L, Shi C, Zhong R F and Liu X M. 2017. Comparison of UAV and WorldView-2 imagery for mapping leaf area index of mangrove forest. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 61: 22-31 [DOI: 10.1016/j.jag.2017.05.002]
- Tian J Y, Wang L, Yin D M, Li X J, Diao C Y, Gong H L, Shi C, Mennenti M, Ge Y, Nie S, Ou Y, Song X N and Liu X M. 2020. Development of spectral-phenological features for deep learning to understand *Spartina alterniflora* invasion. *Remote Sensing of Environment*, 242: 111745 [DOI: 10.1016/j.rse.2020.111745]
- Tian W and Dong Y X. 2023. Research progress on wave-beach-dune interactions. *Tropical Geography*, 43(9): 1665-1677 (田伟, 董玉祥. 2023. 波浪—海滩—沙丘相互作用研究进展. *热带地理*, 43(9): 1665-1677) [DOI: 10.13284/j.cnki.rddl.003729]
- Tian Y C, Huang H, Zhou G Q, Zhang Q, Tao J, Zhang Y L and Lin J L. 2021. Aboveground mangrove biomass estimation in Beibu Gulf using machine learning and UAV remote sensing. *Science of the Total Environment*, 781: 146816 [DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.146816]
- Tian Y C, Huang Y L, Tao J, Zhang Q, Wu B, Zhang Y L, Huang H, Liang M Z and Zhou G Q. 2019. Estimating the net primary productivity of typical mangrove and archipelago ecosystems in the Beibu gulf based on unmanned aerial vehicle imagery. *Tropical Geography*, 39(4): 583-596 (田义超, 黄远林, 陶进, 张强, 吴彬, 张亚丽, 黄鹤, 梁铭忠, 周国清. 2019. 基于无人机影像的北部湾典型岛群红树林生态系统净初级生产力估算. *热带地理*, 39(4): 583-596) [DOI: 10.13284/j.cnki.rddl.003161]
- Topouzelis K, Makri D, Stoupas N, Papakonstantinou A and Katsanevakis S. 2018. Seagrass mapping in Greek territorial waters using Landsat-8 satellite images. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 67: 98-113 [DOI: 10.1016/j.jag.2017.12.013]
- Vermote E F, Tanré D, Deuzé J L, Herman M, Morcrette J J and Kotchenova S Y. 2006. Second simulation of a satellite signal in the solar spectrum-vector (6SV). 6S User Guide Version: 1-55.
- Wan L M, Lin Y Y, Zhang H S, Wang F, Liu M F and Lin H. 2020. GF-5 hyperspectral data for species mapping of mangrove in Mai Po, Hong Kong. *Remote Sensing*, 12(4): 656 [DOI: 10.3390/rs12040656]
- Wang C S, Li Q Q, Liu Y X, Wu G F, Liu P and Ding X L. 2015. A comparison of waveform processing algorithms for single-wavelength LiDAR bathymetry. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 101: 22-35 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2014.11.005]
- Wang J B, Zheng X Y and Gou A L. 2023. On the mechanism of managed retreat in disaster risk area of the coastal zone in US. *Science and Technology Review*, 41(17): 64-77 (王江波, 郑小艳, 苟爱萍. 2023. 美国海岸带灾害风险区管理撤退机制. *科技导报*, 41(17): 64-77) [DOI: 10.3981/j.issn.1000-7857.2023.17.008]
- Wang L, Sousa W P, Gong P and Biging G S. 2004. Comparison of IKONOS and QuickBird images for mapping mangrove species on the Caribbean coast of Panama. *Remote Sensing of Environment*, 91(3/4): 432-440 [DOI: 10.1016/j.rse.2004.04.005]
- Wang X Q and Zhang L J. 2012. The study on water depth, inversion based on spectral similarity. *Laser Journal*, 33(3): 39-40 (王新强, 张丽娟. 2012. 基于光谱相似性进行水深探测的研究. *激光杂志*, 33(3): 39-40) [DOI: 10.3969/j.issn.0253-2743.2012.03.021]
- Wang Y X, Gan Y Q, Deng Y M and Xie X J. 2020. Land-ocean interactions and their eco-environmental effects in the coastal zone: current progress and future perspectives. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 39(1): 1-10 (王焰新, 甘义群, 邓娅敏, 谢先军. 2020. 海岸带海陆交互作用过程及其生态环境效应研究进展. *地质科技通报*, 39(1): 1-10) [DOI: 10.19509/j.cnki.dzkg.2020.0101]
- Wimmer C, Siegmund R, Schwabisch M and Moreira J. 2000. Generation of high precision DEMs of the Wadden Sea with airborne interferometric SAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote*

- Sensing, 38(5): 2234-2245 [DOI: 10.1109/36.868881]
- Wu Z F. 1998. The role of coastal zones in Earth system science. *Geo-Information*, (3/4): 52-57 (吴志峰. 1998. 海岸带在地球系统科学研究中的作用. *地球信息*, (3/4): 52-57)
- Xia Z L, Guo X N and Chen R S. 2020. Automatic extraction of aquaculture ponds based on Google Earth Engine. *Ocean and Coastal Management*, 198: 105348 [DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2020.105348]
- Xiong Y, Huang R Y and Yu K F. 2022. Estimation of coral reef area from multi-temporal and multi-spectral satellite images: a case study on Lingyang Reef, Xisha Islands. *Haiyang Xuebao*, 44(8): 151-168 (熊媛, 黄荣永, 余克服. 2022. 基于多时相多光谱遥感影像的珊瑚礁面积估算方法研究——以西沙群岛羚羊礁为例. *海洋学报*, 44(8): 151-168) [DOI: 10.12284/hyxb2022138]
- Xu F, Zhang Y, Zhai L, Liu J and Gu X H. 2020. Extraction method of intertidal mangrove by using Sentinel-2 image. *Bulletin of Surveying and Mapping*, (2): 49-54 (徐芳, 张英, 翟亮, 刘佳, 谷祥辉. 2020. 基于 Sentinel-2 的潮间红树林提取方法. *测绘通报*, (2): 49-54) [DOI: 10.13474/j.cnki.11-2246.2020.0043]
- Xu M X, Zhou S L, Ding W, Wu S H and Wu W. 2011. Hyperspectral reflectance models for predicting soil organic matter content in coastal tidal land area, northern Jiangsu. *Transactions of the CSAE*, 27(2): 219-223 (徐明星, 周生路, 丁卫, 吴绍华, 吴巍. 2011. 苏北沿海滩涂地区土壤有机质含量的高光谱预测. *农业工程学报*, 27(2): 219-223) [DOI: 10.3969/j.issn.1002-6819.2011.02.037]
- Yang B, Sun X F, Liu L, Zhang L, Han Z, Guo S L, Li X Y, Fu H and Liu Y. 2023. Summary of hot spots in the coastal ecological restoration technology in 2022. *Science and Technology Review*, 41(1): 249-260 (杨波, 孙晓峰, 刘昱, 张磊, 韩祯, 郭世麒, 李小艳, 付辉, 刘妍. 2023. 2022 年海岸带生态修复科技热点回眸. *科技导报*, 41(1): 249-260)
- Yang G, Huang K, Sun W W, Meng X C, Mao D H and Ge Y. 2022. Enhanced mangrove vegetation index based on hyperspectral images for mapping mangrove. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 189: 236-254 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2022.05.003]
- Yang L J, Wang D Y, Jiang J, Li W M and Shi J F. 2018. Using remote sensing identification multi-feature line construction of tidal flat DEM. *Bulletin of Surveying and Mapping*, (8): 32-36 (杨立君, 王得玉, 姜杰, 李文梅, 施佳凤. 2018. 多元特征线遥感识别的滩涂 DEM 构建. *测绘通报*, (8): 32-36) [DOI: 10.13474/j.cnki.11-2246.2018.0240]
- Yang L J, Xiao Y, Jiang J, Chen Y X, Gu Y and Zhang S T. 2021. Remote sensing method for extracting topographic information on tidal flats using spatial distribution features. *Marine Geodesy*, 44(5): 408-431 [DOI: 10.1080/01490419.2021.1925791]
- Yang X M, Zhou C H, Luo J C, Su F Z, Du Y Y and Liu B Y. 2002. Construction and implementation of RS integrated application information system of China's coastal zone and offshore. *Acta Oceanologica Sinica*, 24(5): 36-45 (杨晓梅, 周成虎, 骆剑承, 苏奋振, 杜云艳, 刘宝银. 2002. 我国海岸带及近海卫星遥感应用信息系统构建和运行的基础研究. *海洋学报*, 24(5): 36-45) [DOI: 10.3321/j.issn:0253-4193.2002.05.005]
- Yao L L, Wang X P, Zhang J H, Yu X, Zhang S C and Li Q. 2023. Prediction of sea surface chlorophyll-a concentrations based on deep learning and time-series remote sensing data. *Remote Sensing*, 15(18): 4486 [DOI: 10.3390/rs15184486]
- Ye Y H, Lin S Y, He Y L, Wang D D, Chen X Y and Ni G Y. 2021. Restoration framework of coastal ecosystems in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area. *Acta Ecologica Sinica*, 41(23): 9186-9195 (叶有华, 林珊玉, 何玉琳, 王丹丹, 陈晓意, 倪广艳. 2021. 粤港澳大湾区海岸带生态系统修复框架. *生态学报*, 41(23): 9186-9195) [DOI: 10.5846/stxb202005011074]
- Yin D M and Wang L. 2019. Individual mangrove tree measurement using UAV-based LiDAR data: possibilities and challenges. *Remote Sensing of Environment*, 223: 34-49 [DOI: 10.1016/j.rse.2018.12.034]
- You Y, Zhai P W, Kattawar G W and Yang P. 2009. Polarized radiance fields under a dynamic ocean surface: a three-dimensional radiative transfer solution. *Applied optics*, 48(16): 3019-3029 [DOI: 10.1364/AO.48.003019]
- Yu C, Chen L F, Su L, Fan M and Li S S. 2011. Kriging interpolation method and its application in retrieval of MODIS aerosol optical depth//*Proceedings of 2011 19th International Conference on Geoinformatics*. Shanghai: IEEE: 1-6 [DOI: 10.1109/GeoInformatics.2011.5981052]
- Yunus A P, Masago Y and Hijioka Y. 2020. COVID-19 and surface water quality: improved lake water quality during the lockdown. *Science of the Total Environment*, 731: 139012 [DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.139012]
- Zhai P W, Hu Y X, Chowdhary J, Trepte C R, Lucker P L and Josset D B. 2010. A vector radiative transfer model for coupled atmosphere and ocean systems with a rough interface. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 111(7/8): 1025-1040 [DOI: 10.1016/j.jqsrt.2009.12.005]
- Zhang D, Shi K, Wang W J, Wang X W, Zhang Y L, Qin B Q, Zhu M Y, Dong B L and Zhang Y B. 2024a. An optical mechanism-based deep learning approach for deriving water trophic state of China's lakes from Landsat images. *Water Research*, 252: 121181 [DOI: 10.1016/j.watres.2024.121181]
- Zhang L, Ouyang Y Z and Teng H Z. 2017. Applications of aerial photogrammetry and airborne LiDAR in remote sensing monitoring of coastal zones. *Hydrographic Surveying and Charting*, 37(6): 62-65 (张靓, 欧阳永忠, 滕惠忠. 2017. 航测与机载 LiDAR 技术在海岸带遥感中的应用. *海洋测绘*, 37(6): 62-65) [DOI: 10.3969/j.issn.1671-3044.2017.06.016]
- Zhang N, Li H, Zhang J B, Chen J Y, Wu H B and Gong Z. 2023. Study of the spatial and temporal distributions of tidal flat surface sediment based on multitemporal remote sensing. *Frontiers in Ma-*

- rine Science, 10: 1109146 [DOI: 10.3389/fmars.2023.1109146]
- Zhang P, Ruan H M, Dai P D, Zhao L R and Zhang J B. 2020. Spatio-temporal river flux and composition of nutrients affecting adjacent coastal water quality in Hainan Island, China. *Journal of Hydrology*, 591: 125293 [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125293]
- Zhang S, Tian J, Lu X, Tian Q J, He S, Lin Y L, Li S, Zheng W, Wen T, Mu X Y, Zhang J and Li Y R. 2024b. Monitoring of chlorophyll content in local saltwort species *Suaeda salsa* under water and salt stress based on the PROSAIL-D model in coastal wetland. *Remote Sensing of Environment*, 306: 114117 [DOI: 10.1016/j.rse.2024.114117]
- Zhang T, Hu S S, He Y, You S C, Yang X M, Gan Y H and Liu A X. 2021. A fine-scale mangrove map of China derived from 2-meter resolution satellite observations and field data. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(2): 92 [DOI: 10.3390/ijgi10020092]
- Zhang Z, Ma Y, Zhang J Y, Liang J and Zhang J. 2015. Research on the water depth detection model based on LiDAR echo signal simulation. *Journal of Ocean Technology*, 34(6): 13-18 (张震, 马毅, 张靖宇, 梁建, 张杰. 2015. 基于水体回波信号仿真的激光雷达水深探测模型研究. *海洋技术学报*, 34(6): 13-18)
- Zhao D M, Zhen J N, Zhang Y H, Miao J, Shen Z, Jiang X P, Wang J J, Jiang J C, Tang Y Z and Wu G F. 2023. Mapping mangrove leaf area index (LAI) by combining remote sensing images with PROSAIL-D and XGBoost methods. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 9(3): 370-389 [DOI: 10.1002/rse2.315]
- Zhao Y Q and Huang B. 2017. Integrating modis and MTSAT-2 to generate high spatial-temporal-spectral resolution imagery for real-time air quality monitoring//*Proceedings of 2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*. Fort Worth: IEEE: 6122-6125 [DOI: 10.1109/IGARSS.2017.8128406]
- Zhao Y X, Yan C H, Lu S, Wang P, Qiu G Y and Li R L. 2019. Estimation of chlorophyll content in intertidal mangrove leaves with different thicknesses using hyperspectral data. *Ecological Indicators*, 106: 105511 [DOI: 10.1016/j.ecolind.2019.105511]
- Zhen J N, Jiang X P, Xu Y, Miao J, Zhao D M, Wang J J, Wang J Z and Wu G F. 2021. Mapping leaf chlorophyll content of mangrove forests with Sentinel-2 images of four periods. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 102: 102387 [DOI: 10.1016/j.jag.2021.102387]
- Zhou G W, Li Y C, Ren Y X, Sheng L, Ye D M, Fan F Y and Bai J. 2015. Research of two-media underwater reefs depth measurement experiment based on low-altitude UAV. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 44(5): 548-554, 562 (周高伟, 李英成, 任延旭, 盛琳, 叶冬梅, 范风云, 白洁. 2015. 低空无人机双介质水下礁盘深度测量试验与分析. *测绘学报*, 44(5): 548-554, 562) [DOI: 10.11947/j.AGCS.2015.20140259]
- Zhu X T, Guo H W, Huang J J, Tian S and Zhang Z J. 2023. A hybrid decomposition and Machine learning model for forecasting Chlorophyll-a and total nitrogen concentration in coastal waters. *Journal of Hydrology*, 619: 129207 [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2023.129207]
- Zhuo W, Shi R H, Wu N, Zhang C and Tian B. 2021. Spectral response and the retrieval of canopy chlorophyll content under interspecific competition in wetlands—case study of wetlands in the Yangtze River Estuary. *Earth Science Informatics*, 14(3): 1467-1486 [DOI: 10.1007/s12145-021-00630-5]

Review of coastal zone remote sensing research : Development, opportunities and challenges

SUN Weiwei¹, CHEN Chao², FU Bolin³, MENG Xiangchao⁴, HE Shuangyan⁵, LI Dong⁶, HU Yabin⁷, HOU Xiyong⁶, REN Guangbo⁷, YANG Gang¹

1. Department of Geography and Spatial Information Techniques, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2. School of Geography Science and Geomatics Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China;

3. College of Geomatics and Geoinformation, Guilin University of Technology, Guilin 541006, China;

4. School of Information Science and Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

5. Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan 316021, China;

6. Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Science, Yantai 264003, China;

7. First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China

Abstract: The coastal zone is an ecologically crucial zone where land and ocean interact, collecting a considerable amount of matter and energy. However, this area is currently facing unprecedented challenges due to intensified human activities, global climate change, and species invasion. Remote sensing science and technology provide effective means for the comprehensive and systematic monitoring of coastal zone resources, ecosystems, and environmental conditions. However, our understanding of key scientific issues relative to remote sensing applications in coastal zones remains unclear. Several issues and challenges are encountered in the design of remote sensing sensors, the interaction mechanisms between electromagnetic waves and surface objects, remote sensing data

processing and information extraction, quantitative retrieval of ecological parameters, and the cross-application of remote sensing across various fields of coastal zones. Considering the uniqueness of coastal zones and the advantages of remote sensing technology, this paper analyzes the current status of domestic and foreign research on coastal remote sensing, using data from the Web of Science and CNKI databases. It explores the scientific and technological issues in coastal remote sensing, summarizes research progress, identifies opportunities and challenges, and discusses potential future development directions. Results show the following: (1) Considering the characteristics of high spatial and temporal heterogeneity, changing climate, and complex surface factors in the coastal zone, developing a new generation of remote sensing payloads is necessary. These payloads should feature specific spectral characteristics, observation modes, orbital modes, and orbital inclinations to provide support for large-scale, high-frequency monitoring and fine-scale detection of natural resources in the coastal zone. (2) Aiming to accurately analyze the physical and optical characteristics of the coastal zone environment, geoscience big data is integrated with numerical simulation technology to develop precise models of the scattering and absorption characteristics of atmospheric and marine materials and clarify radiation transmission process across the atmosphere-land-water interface. (3) Comprehensive methods should be developed to improve remote sensing image quality under complex coastal zone imaging conditions. through remote sensing AI model and cloud computing technology, to achieve high-precision and intelligent extraction of remote sensing information across the entire coastal zone. (4) Existing radiation transfer, light energy utilization, and process models should be optimized to analyze the radiation transfer mechanisms of coastal surface elements. A “mechanism-data” dual-driven quantitative inversion model of surface parameters, powered by an opportunistic AI model, is introduced to address inversion accuracy errors caused by differences in the radiation characteristics of multi-source sensors, as well inconsistencies in observation angles and observation times. (5) The cross-application of land-sea integration, ecological restoration, and disaster prevention and reduction in coastal zones has seen marked advancements, promoting deeper interdisciplinary integration and contributing to the development of a more comprehensive scientific and technological system. This paper can serve as a reference for understanding the key scientific challenges in coastal remote sensing and for identifying future directions in its development.

Key words: remote sensing of coastal zone, scientific issues, design of sensors, interaction between ground objects and electromagnetic waves, information extraction, quantitative inversion of remote sensing parameters, practice of interdisciplinary, challenge and opportunity

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 42471404, 42122009, 42171311, 42371341, 41971296, 42101336, 42201354, 42271340)