

土地整治遥感监测研究进展分析

张超^{1,2} 吕雅慧³ 郟文聚^{2,4} 高璐璐³ 朱德海^{1,2} 杨建宇^{1,2}

(1. 中国农业大学土地科学与技术学院, 北京 100083; 2. 自然资源部农用地质量与监控重点实验室, 北京 100035; 3. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083; 4. 自然资源部国土整治中心, 北京 100035)

摘要: 通过回顾国内外土地整治概念及内容的发展历程,总结了新时期土地整治的基本内涵和工作需求。通过分析遥感在土地整治工作中的广泛应用,梳理了土地整治遥感监测的发展脉络,归纳了土地整治遥感监测的关键技术及其研究现状,进而给出了土地整治遥感监测相关技术及应用的发展趋势。分别从土地资源调查与保护、土地复垦与生态修复、农用地整治、宜农未利用地开发、建设用地整治及生态化土地整治等不同土地整治类型和潜力测算与风险评估、规划设计、施工监管及验收评价等土地整治项目过程等角度,对多年来遥感技术在土地整治工作中的应用情况进行了系统阐述,最后在总结技术优势与局限的基础上,提出了未来的攻关难点和发展方向,为土地整治遥感监测工作的开展提供科学参考。

关键词: 土地整治; 监测; 遥感技术

中图分类号: F301.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)01-0001-22

Analysis on Research Progress of Remote Sensing Monitoring of Land Consolidation

ZHANG Chao^{1,2} LÜ Yahui³ YUN Wenju^{2,4} GAO Lulu³ ZHU Dehai^{1,2} YANG Jianyu^{1,2}

(1. College of Land Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Key Laboratory for Agricultural Land Quality Monitoring and Control, Ministry of Natural Resources, Beijing 100035, China

3. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

4. Land Consolidation and Rehabilitation Center, Ministry of Natural Resources, Beijing 100035, China)

Abstract: By reviewing the development history of concepts and contents on land consolidation at home and abroad, the basic connotation and work needs of land consolidation in the new era were summarized. By analyzing the wide application of remote sensing in land consolidation works, the development of remote sensing monitoring of land consolidation was sorted out, the related key technologies and its research status were summarized, and then the development trend of related technologies and applications of land consolidation remote sensing monitoring were given. The application of remote sensing technology in land consolidation works for many years was systematically expounded from two angles. These two angles were different types and project stages of land consolidation. The different types of land consolidation included land resource survey and protection, land reclamation and ecological restoration, agricultural land consolidation, development of unused farming-suitable agricultural land, construction land consolidation and ecological land consolidation and so on. The different project stages of land consolidation included potential and risk measurement, engineering planning, construction supervision and acceptance evaluation and so on. Finally, the research difficulties and development direction in the future were put forward based on summarizing the technical advantages and limitations. The research result can provide scientific reference for the implementation of remote sensing monitoring of land consolidation.

Key words: land consolidation; monitoring; remote sensing technique

收稿日期: 2018-10-19 修回日期: 2018-11-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFF0206801)

作者简介: 张超(1972—),男,教授,博士生导师,主要从事遥感在土地和农业中的应用研究,E-mail: zhangchaobj@cau.edu.cn

通信作者: 郟文聚(1963—),男,研究员,博士生导师,主要从事土地整治和土地评价研究,E-mail: yunwenju@vip.sina.com

0 引言

目前各国都面临着不同类型、不同程度的土地资源问题,包括人口压力背景下的农用地生产力不足、土地不合理利用背景下的国土资源浪费、开发利用强度过大背景下的土地退化和生态变差等。中国作为人口大国和农业大国,人地矛盾问题突出。在拥有巨大粮食需求量的背景下,我国人均土地占有量不足世界平均水平的40%^[1-4]。同时,人口数量的持续增长、经济社会的快速发展和城市化水平的不断提高,已经造成了土地利用结构不合理、利用效率低下、退化严重、生态质量下降等一系列问题^[5-10]。近年来由于建设占用、生态退耕等原因,全国耕地总面积减少、平均耕地质量处于低水平且持续降低、耕地后备资源日渐不足,而通过土地整治等措施获得的新增耕地面积逐年减少,新增建设用地面积明显增加,加重了不同土地利用类型,特别是农用地和建设用地之间的矛盾。如何在建设用地供给量增加的同时,保有足够数量、优良质量和健康生态的耕地,以满足国家粮食安全的需求,成为自然资源领域的重要议题。

土地整治是缓解人地矛盾、解决土地利用问题和保障国家可持续发展的有效手段之一,我国正在大力推进土地整治政策^[11]。传统的土地信息获取和土地整治工程监测主要依赖于人工野外测量,无法满足相关工作对时效、成本及精度等方面的要求,而我国土地整治监测正处于从传统信息获取向现代化智能监测的转变过程中,遥感技术以其高效、高精度、低成本的特点,成为土地整治监管的有力依托。自十一届三中全会以来,我国针对土地整治中土地利用类型和耕地质量等别的变化监测等问题,利用遥感技术实现定期、连续的调查、预测和预报^[12];自然资源部近年形成“部级监管、省负总责、市县组织实施”的土地整治管理格局,充分利用遥感技术手段,实现了对土地整治区土地利用现状、土地质量、城镇地籍等的有效监管^[13];“一核两深三系”国土资源科技创新战略的全面实施,更将遥感技术广泛应用于耕地“三位一体”监管体系的建设中,为土地整治提供实时、精准的技术支撑,针对土壤特性反演、大规模基础信息获取和整治过程监管等问题,构建起遥感动态监测体系^[14],对于全面实施土地整治项目具有深远的意义。

遥感在土地整治监测中的应用,主要体现在全过程和全方位两方面,即充分利用国土资源领域已有的数据和工作积累,辅助以实地勘测手段,以卫星遥感、航空、无人机等多源-多尺度-多时相遥感影像

为数据源,结合遥感影像处理和分析技术,获取地表信息,通过人工智能等方法、模型,挖掘深层关键信息,最终构建土地整治遥感监测体系。该体系主要涉及到遥感影像等基础数据获取、处理、分析、建模和应用等关键步骤,重点针对潜力测算、整治过程监管、整治后效益评估等土地整治过程阶段,或对土地复垦等不同土地整治类型,实现多尺度土地信息的快速和自动化获取。其中不同类型遥感数据的处理与信息挖掘是技术要点。

目前,土地整治遥感监测技术方法已在我国实现广泛的应用,主要围绕土地整治项目高精度基础数据获取、优质工作底图绘制与实时更新、工程进度与质量监管和基本农田管护等方面展开,具有实时高效、长期动态的工作优势,但部分关键技术的研究仍处于初级阶段。本文对当前不同类型遥感技术的发展现状及其在土地整治监测中的应用进行总结和分析,旨在明确土地整治监测工作的需求与难点、梳理土地整治遥感监测的关键技术与研究现状、分析土地整治遥感监测技术的瓶颈与发展潜力,最终凝练出急需解决的关键技术问题,为土地整治遥感监测的工作开展和技术发展提供依据和参考。

1 土地整治发展概述

土地整治是人类利用自然和改造自然的措施,起源于欧洲,德国、荷兰、俄罗斯、法国等国家最早提出土地整理的概念,英国、瑞典、瑞士、比利时、日本和韩国等均根据本国情况,适时开展了相应的土地整治工作,赋予了土地整治丰富的内涵^[12]。国外的土地整治大体经历了3个发展阶段:简单的土地整理阶段(16世纪中叶至19世纪末),主要是有组织、有规划地进行地块归并、权属调整、改善农业生产条件;针对特定内容的土地整理阶段(20世纪初至20世纪50年代),主要是有效解决城市发展用地和工程建设引起的土地利用破坏等问题;综合土地整理阶段(20世纪60年代以后),主要是缩小城乡差距,改善居住环境,注重自然和景观保护,提高地区经济的发展速度,增加人民收入等^[15]。

中国现代意义的土地整治开始于1986年,多次修订的《中华人民共和国土地管理法》逐步给出了土地整治的法定内涵^[16-17]。随着研究与实践的深入,土地整治的范畴被拓展到了未利用地、损毁地、废弃地和建设用地等方面,郇文聚等^[11]系统地给出了新时期土地整治的科学界定:在一定区域内,依据土地利用总体规划,按照用地需求,对农村和城市未利用的、低效利用的、不合理利用的土地,在一定的资金支持下而采取的一系列工程技术措施。近年

的《关于强化管控落实最严格的耕地保护制度的通知》、《全国土地整治规划(2016—2020年)》、“一核两深三系”等国土资源科技创新战略与规划,进一步强化了严格的土地整治政策,使其成为保障我国粮食安全、推动新农村建设和乡村振兴、实现“藏粮于地、藏粮于技”和可持续发展的重要举措^[18-20]。我国土地整治可分为3个阶段:初步发育阶段(1987年至1998年),主要围绕农村联产承包责任制,开展对土地利用方式的优化和结构的调整;发展壮大阶段(1999年至2007年),重在开发整理新增耕地,追求耕地总量的动态平衡,在保护优质耕地的同时保障建设用地供给;综合发展阶段(2008年以后),整治范围更集中连片,整治内容更综合,整治重点向增加数量、提高质量、优化布局和改善生态并重转变,整治目标向城乡统筹发展转变^[21]。目前,我国的土地整治仍存在选址不合理、管理不规范、重数量轻质量和生态^[22]、高新技术运用有限和建设后维护难等问题^[23]。其中,“重数量轻质量和生态”问题最为突出,忽略了对农业生态环境的保护和土地整治生态效益的考量,人类面临着在实现生态环境可持续发展的同时确保粮食安全的巨大挑战^[24]。为此,国内外的土地整治逐步向多目标的方向演变,包括农业可持续、生态环境保护 and 可持续土地管理等^[25-30]。

生态化土地整治是新时期土地整治的重要发展方向,是指充分考虑整治区地域特色和空间格局,以土地可持续利用和改善农业生产条件为目标,兼具保护或恢复受损生态系统,结合田、水、路、林、村综合整治,融入生态学理论与技术、景观生态设计和生物多样性保护要求的土地整治活动^[31]。国外主要

针对景观功能衰退、水土流失和土地退化等问题,重点从政策制定、规划设计、生态敏感性、生态风险、生态效益等开展农田保护、水土保持与景观恢复技术的研究^[32]。如,荷兰在土地整治工作中将经济、生态和社会效益并重考虑,主要的生态效益指标有抵御洪水能力、水质、农田需水量等;德国土地整理工作的内容从最初单纯的追求经济效益转变到经济、社会和环境多重效益并行发展,增加了保护农村景观环境、改善农民生活居住条件等内容^[15]。我国的土地整治正处于全面推进国土综合整治的关键阶段^[33],在大力实施农村土地整治的同时,着重治理农业环境突出问题,探索并推广高效生态循环农业模式,按照整体保护—系统修复—综合治理的思维,实施山水林田湖生态保护和修复工程,将景观生态规划设计、景观功能分区、景观生态评价和生态功能系统划分等融入土地整治过程中^[31],达到构建生态安全格局、保护生物多样性和改善农业生产条件、生产环境及居住条件的目的,推动构建基于生态理念的可持续土地整治模式,兼顾农业空间和生态空间保护红线。目前,推动生态化土地整治已成为国际共识。

2 土地整治遥感监测体系研究进展

土地整治遥感监测是土地整治的重要组成部分。其体系架构如图1所示,主要分为数据获取层、数据处理层、数据分析层和监测应用层。涵盖的关键技术有:多源遥感获取技术、遥感影像预处理技术、遥感影像分类技术和遥感定量反演模型等,这些技术方法已取得一定的研究进展,但仍是遥感在土地整治中应用的研究热点和难点。

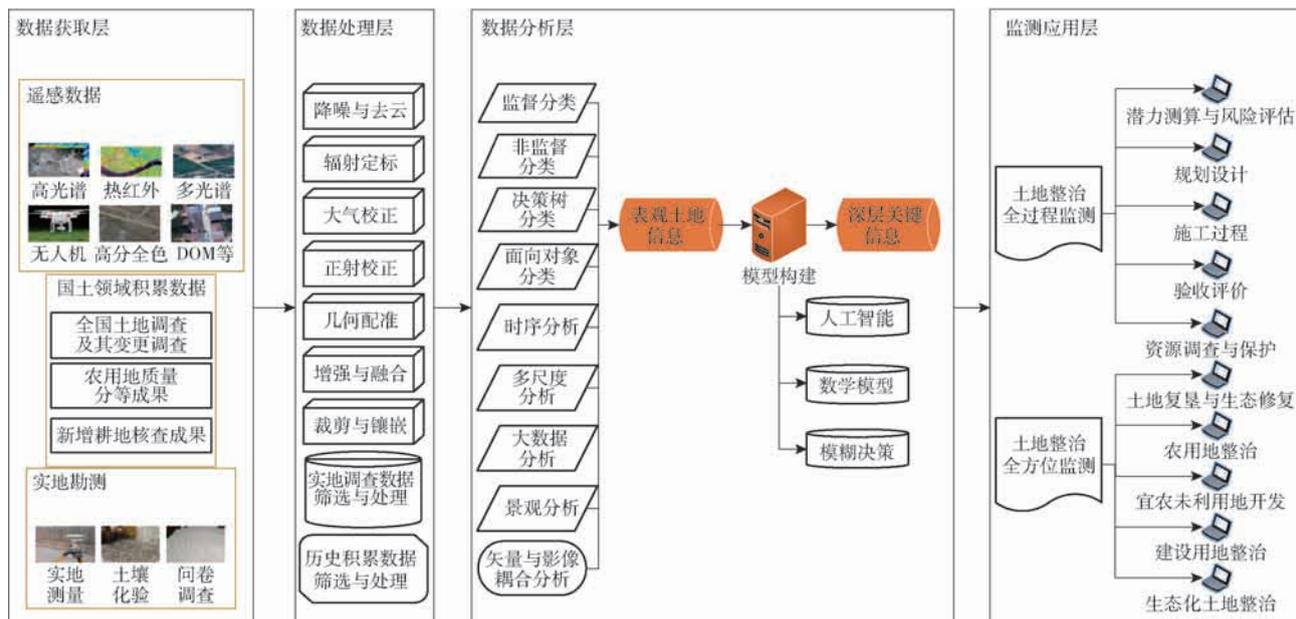


图 1 土地整治遥感监测体系架构图

Fig. 1 Structure diagram of land consolidation remote sensing monitoring system

2.1 多源遥感获取技术研究进展

多源遥感是土地整治遥感监测体系最重要的数据基础。遥感技术指通过某种传感器装置,在不与被研究对象直接接触的情况下,获取其特征信息,并对这些信息进行提取、加工、表达和应用的一门对地观测和空间探测技术。在空间信息获取方面具有优越性,扩展了资源观测的高度、深度、角度、尺度和维度,拓展了观测的视觉感官范围。具有覆盖面广、全方位、动态、实时、经济、宏观、综合、快速、多层次、多尺度、多时相、多手段、多源数据互补融合、信息量大、全天候(微波和热红外等)、不受地面条件限制、定量与定性结合以及反映地物内部信息等优势^[34]。按照传感器使用的平台可分为航天遥感技术、航空遥感技术和地面遥感技术,各有特点和适用范围,其中前两者的研究与应用更为广泛,虽然目前遥感尚不能完全取代实地勘测^[35],但航空遥感与航天遥感的结合应用,已成为土地资源空间信息获取,特别是土地整治监测的重要途径。

航天遥感在监测大面积、地势平坦、新增耕地较多的土地整治项目区,具有很大的优势,但受到分辨率、地形地貌、信息量、订购成本、获取周期等的约束,在土地整治监测应用中具有一定的局限性。航天遥感系统的核心是传感器,按照传感器的不同可以分为高空间分辨率光学遥感(I1)、高光谱分辨率光学遥感(I2)、高时间分辨率光学遥感(I3)、红外遥感(I4)和微波雷达遥感(I5)。I1具有最细致的地物空间信息,是土地整治区土地利用类型等基础地理信息和高精度底图获取的重要手段^[36-37];I2是当前遥感技术的前沿,具有丰富的光谱信息,能实现有机质含量等土壤理化性质的定量反演,同时可有效区别光谱相近的地物,提高土地利用类型识别精度,为土地整治提供更丰富的细节信息^[38-39];I3主要依靠中低空间分辨率的光学遥感卫星数据,具有成像周期短和时相数据积累丰富的优势,通过时间序列分析方法,实现大面积土地整治工程动态信息的精确采集和地物精确分类与变化监测^[40-41];I4具有全天时成像、识别伪装和获取对象状态的能力,主要用于辅助光学遥感实现土地整治中地物的快速解译,或用于反演地表温度等定量信息^[42-43];I5则弥补了光学遥感只能实现地表监测和白天成像的局限,合成孔径雷达(Synthetic aperture radar, SAR)是目前I5最具代表性的研究重点,通过将探地雷达与开挖实测等方法相结合,可实现对耕地土层厚度等地下信息的探测,通过调节最佳观测视角,可实现目标地物的理化特性和空间形态特征监测与反演,为土地整治工程的质量评价和验收提供有效途径^[44]。

无人机航测是目前航空遥感(I6)的主要形式之一。集成了无人驾驶飞行器、GPS导航定位及航空遥感等先进技术手段^[15],具有机动性强、小型化、专业化、成本低和高空间分辨率等优势,但受到飞行条件的限制,作为航天遥感技术的补充已逐步被运用于地形复杂区域的土地整治项目监测中^[45]。主要用于获取高分辨率数字正射影像,直观反映土地整治项目区实际情况,并绘制大比例尺土地利用现状图等基础数据,可提高土地整治项目设计的合理性和工程量计算的精度,还可通过搭载高光谱相机等获取专题信息。具体如表1所示。

2018年3月31日,我国成功发射GF-1的02、03、04号卫星,构成我国首个民用高分辨率光学业务星座,在辐射分辨率、定位精度、运行寿命、累计成像时间、重访周期、一致性成像、立体成像和大宽幅成像等方面的性能比01号星有了很大的提升,对土地整治工程遥感监测具有重要意义。2018年5月9日,我国发射的GF-5卫星是世界首颗实现对大气和陆地综合观测的全谱段高光谱卫星,可满足环境综合监测等方面的迫切需求,是中国实现高光谱分辨率对地观测能力的重要标志,可为土地整治项目区土壤参数等信息的获取提供有效支撑。

近年来,遥感卫星持续向高空间分辨率、高光谱分辨率和高时分辨率方向发展。土地整治监管工作中,遥感技术的应用向多源遥感影像结合趋势发展。如,高空间分辨率和高光谱分辨率遥感的结合,可实现地物更高精度的分类;高时间分辨率与高空间分辨率、高光谱分辨率遥感相结合,可实现土地整治区地表理化特性的精准反演和高时频变化监测^[38]。因此,多源遥感数据的融合与信息挖掘成为研究重点和技术难点。

2.2 遥感影像预处理技术研究进展

遥感影像数据预处理包括降噪、去云、辐射定标、大气校正、正射校正、几何配准、影像增强、影像融合、影像裁剪和影像镶嵌等过程。针对不同类型的遥感数据,数据预处理的侧重点不同。其中降噪、影像配准和影像融合是获取土地整治遥感监测本底数据的关键步骤,也是目前土地整治监测中遥感影像处理领域的研究热点。

噪声影响遥感影像的分析过程,干扰信息的准确获取。因此降噪对于提高土地整治区遥感数据的质量意义重大。主流的影像降噪方法主要分为3大类:传统的滤波方法,其中中值滤波对分散噪声较好的处理能力得到广泛验证,但面对较为严重和集中的椒盐噪声,其降噪能力明显下降^[46];基于小波理论的滤波方法,虽然降噪表现良好且稳定,但原理和

表 1 多源遥感的主要类型及其在土地整治中的应用

Tab. 1 Main types of multi-source remote sensing and their application in land consolidation

遥感类型	典型数据源	优点	缺点	主要应用	应用效果
11	WorldView - 2/3/4、GF - 2、SPOT - 6/7、IKONOS、QuickBird	成像细节好、空间及纹理信息丰富、边缘清晰	光谱信息有限、获取周期较长、观测范围较小、数据成本高	获取土地整治基础地理信息和高精度底图	土地利用类型的平均识别精度可达 90% 以上
12	Hyperion、GF - 5、CHRIS	光谱信息极丰富、光谱空间分辨率高、可实现定量或半定量分析	技术难点大、获取周期长、空间分辨率较低、信息存在冗余	反演土地整治中土壤理化性质等细节信息; 提高地物识别精度	土壤理化性质的反演精度最高可达 95%; 地物分类精度提高显著
13	FY 系列、GF - 4、LandSat 系列、GF - 1 星座 (01 - 04 号星)	观测范围较大、获取周期较短、成本低	空间分辨率较低、光谱信息有限	动态采集土地整治工程进展信息; 精确识别地物类型及变化	表观的土地利用变化及深层的 NPP 信息等定量化得到有效提取
14	ASTER、AVHRR、MODIS、LandSat ETM + / TM、HJ - 1A/B IRS、Landsat8 TIRS	全天时成像、识别伪装能力强、可获取对象状态	分辨率低、细节不清晰、边缘模糊	快速目视解译土地整治中的地物类型; 反演地表温度等定量信息	地物目视解译的效率提高 4 倍以上; 地表温度的误差可在 1K 以内
15	TerraSAR - X、Cosmo - skymed - 1/2/3/4、RADASAT - 2、ALOS - PALSAR2、Sentinel - 1A	全天候/全天时成像、特征反演能力强、对冰/雪/土壤等有穿透力、抗干扰能力强	空间分辨率一般较低	探测土地整治的地下信息和目标地物的空间形态及理化特征	土层厚度等地下特性的探测误差可满足工程质量检测的精度要求
16	无人机航测	空间分辨率高、机动性强、小型化、专业化、成本低	飞行环境受限	获取地形复杂土地整治区域的高分辨率数字正射影像; 精确获取基础数据并计算工程量	与面向对象技术结合, 对道路等多种地类的协同提取总精度可达 88%

算法复杂;改进的传统滤波方法,如多种改进型中值滤波器^[47-54],在降低噪声的同时,难以较完整地保留影像细节。为此,提出两种有效的改进思路:①在改进型中值滤波器的基础上加以完善^[55],如对中值滤波窗口进行去极值处理,并通过设定差异阈值的方法,改进中心像元灰度值的计算规则,提高在较严重噪声干扰下的目标信号恢复能力;或将混合的多种改进型中值滤波器与模糊神经网络相结合,集成多种滤波器优点,提高滤波性能;或将人工智能与模糊滤波器相结合,实现滤波器阈值的自动优化获取。②对多种小波变换进行多尺度混合应用,如将小波变换和 Curvelets 变换相结合^[56]、将小波变换与方向滤波器相结合^[57]等,得到的降噪影像具有更好的视觉效果和峰值信噪比,已成为当前影像降噪研究的热点。

影像配准的目的是消除或减少基准影像和待校正影像之间由于成像条件不同所引起的几何形变,从而获得具有几何一致性(最佳空间位置匹配)的两幅影像,它直接影响到土地整治区原始遥感影像的预处理效果和最终底图的精度。传统的影像配准方法主要有基于灰度^[58-59]、基于特征^[60-61]和基于模型的^[62]方法,其中前两者在研究与应用中更为广泛。基于灰度的方法原理简单且易于实现,但灰度特征不够稳定,多源影像的灰度有差异,不利于同名

控制点的选择,因此较适于同类传感器遥感影像的配准;基于特征的方法通过提取影像中共有且可靠的点、线特征来增强配准的鲁棒性和稳定性,这些特征对比例、旋转、平移等变化能够保持一致性,保证了异源传感器影像之间的特征一致性,但依赖于对影像中共同有效特征的选取,步骤较为复杂;基于模型的方法原理最严谨,但模型复杂,可迁移性和推广性不强。总体来说,传统配准方法各有利弊,因此针对传统方法的不足,陆续出现了多种改进型基于特征的配准方法,主要是利用多分辨分析变换或交叉点等算法,改进特征信息的提取与利用^[62-63],此外,基于相似性度量的配准也成为研究热点之一^[64]。

遥感影像融合是指对覆盖同一地区的不同平台、不同传感器获取的遥感影像进行综合应用的数据融合方法理论^[65],目的是产生比单一信源更精确、安全、可靠的估计和判断^[66-67],最大程度发挥多种影像数据的潜力,提高土地整治工作中信息提取的精度和效率^[68-70]。遥感影像融合的基本要求有:尽量多地保留所有源影像中的有用信息;尽量少地引入失真^[71]。融合主要在 3 个层级进行,分别是像素级、特征级和决策级。各层级融合的原理、特点与典型算法如表 2 所示,其中像素级融合是特征级和决策级融合的基础。近几年土地整治中涉及到的影

像融合需求向着更加多元化方向发展,除了常规的多光谱与全色高空间分辨率遥感影像融合外,还有多源多极化 SAR 融合(F1)、SAR 与多光谱影像的融合(F2)、SAR 与红外影像的融合(F3)、红外与多光谱影像的融合(F4)、高光谱影像波段间融合(F5)、高光谱与多光谱或全色影像融合(F6)。此外,时空融合技术(F7)成为高时间分辨率与高空间分辨率影像融合的重要手段,旨在将多源卫星遥感影像的高空间分辨率和高时间分辨率结合,生成目标研究区域内具有高频次访问的高空间分辨率遥感影像序列。多种遥感影像融合需求的实现算法及其在土地整治监测中的主要应用如表3所示。应根据土地整治工作的具体需求、原始影像特点、融合目的等,科学确定融合算法,挖掘数据中更深层的信息。如与 SAR 相关的融合问题中,纹理特征是融合与地物分类的主要依据,因此特征级融合更适用于此类问题。而像素级融合仍是当前土地整治工作中进行

遥感影像融合的主流,其中基于多分辨分解的方法在融合精度和效率方面较好:静态小波变换适合表达影像的纹理和角点等细节特征^[72], Curvelet、Contourlet 适合表达方向特性及边缘和线信息, Wedgelet 适合表达影像的轮廓信息^[73], 非下采样 Contourlet 变换综合了多分辨分析融合方法的多数优势,从而能有效提取影像的几何结构特征^[74], 形态小波变换对时频信息和形态特征均能良好描述^[75], 可以看出多种多分辨分解方法彼此之间存在功能互补的关系^[76], 因此将各类多分辨分解方法进行混合和串联应用,已成为基于变换域遥感影像融合算法的改进方向,同时进行多层级间融合算法的结合也是趋势之一。

2.3 遥感影像分类技术研究进展

土地利用类型是土地整治遥感监测的重要内容和依据,遥感影像分类技术为土地利用类型的监测提供了技术支持。中低空间分辨率多光谱影

表2 各层级遥感影像融合的原理、特点与典型算法

Tab.2 Principles, characteristics and typical algorithms of RS image fusion at various levels

融合层级	原理	信息保留能力	实时分析能力	数据计算难度	预处理难度	容错能力	融合精度	数据源包容性	典型算法
像素级	直接作用于底层像素点	优	差	大	小	差	优	差	基于空间域的融合(线性加权/假彩色/Brovey 变换/神经网络/统计模型等)、基于变换域的融合(ICA/二维 FFT/多分辨分析等) ^[77]
特征级	对各影像提取的特征信息进行综合处理与分析 ^[78]	中	中	中	中	中	中	中	聚类分析法、Bayes 理论方法、嫡法、表决法、NMF 等 ^[79]
决策级	对各影像的特征提取和识别判断结果进行联合推断 ^[80]	差	优	小	大	优	差	优	神经网络法、模糊聚类法、专家系统、贝叶斯概率推理法、Neyman - Pearson 准则、Dempster - Shafer 证据理论法、统计决策理论、模糊推理法和合情推理法等 ^[81]

表3 多种遥感影像融合需求的实现算法及其在土地整治监测中的主要应用

Tab.3 Algorithms and applications in land consolidation monitoring for multiple RS image fusion requirements

融合需求	实现算法	主要应用
F1	小波变换、非亚采样 Contourlet 变换与脉冲耦合神经网络结合、决策级	获取空间分辨率更高、信息更加丰富的 SAR 影像
F2	特征级、线性变换、乘积变换、特征级与像素级结合、空间域与变换域结合、G-S 变换、小波变换、Contourlet	获取更理想的高空间分辨率多光谱融合影像,提高土地利用分类精度和效率
F3	稀疏表示与复 Contourlet 结合	从清晰场景中突出热异常地类
F4	神经网络、小波变换、多元 Contourlet、稀疏表示、遗传算法与神经网络结合、神经网络回归模型与全色锐化结合、空间域与变换域结合、多种多分辨分解相结合、特征级、决策级、像素级与特征级结合	改进融合影像视觉效果使背景信息和目标信息协同保留
F5	加权平均、偏祖法、PCA、小波变换	实现光谱信息的互补去冗
F6	分量替换模型、光谱解混模型、遗传算法、粗糙集理论和区域特征小波包	在保留光谱信息、减少光谱失真的同时提高空间分辨率
F7	基于地物组分的融合、基于地表空间信息的融合、基于地物时相变化的融合和组合性融合	解决数据缺失的问题,实现历史影像时空挖掘,获取多时相高空间分辨率影像,对土地整治地表信息实现灵活、实时监测

像、高空间分辨率卫星遥感影像以及无人机影像是土地整治区地物分类主要数据源。针对影像分类技术的研究主要包括土地整治遥感分类特征、分类算法和目标应用等方面。

土地整治遥感关注的重点目标有农田、植被覆盖和基础设施等地表覆盖类型。土地整治区农田提取方面,以中低空间分辨率多光谱遥感影像为数据源时,通过将基于作物长势的初分类结果与盐碱化等专题分区信息进行复合实现对高中低产农田的识别,精度可达90%^[82];将植被指数等光谱特征的时序分析与DEM等辅助特征相结合,可以实现市域季节性变化农田的有效监测^[83];对于高空间分辨率航天遥感影像或航空遥感影像,将TV-Gabor等模型提取的几何结构特征与先验光谱信息相结合,小范围农田分类精度可达92%^[84];而对于丘陵地区等地物分类困难区域,将高空间分辨率遥感影像与面向对象分类结合,可有效识别农田地块,精度可达73%^[85];将面向对象的多尺度分割与监督型机器学习结合,可将农田识别精度提高至96%^[86];针对浅层机器学习预测能力有限的问题,基于深度信任网络的支持向量回归模型具有更好的农田识别效果^[87];在无人机影像农田信息提取的研究中,深度卷积神经网络与迁移学习机制相结合,比面向对象分类更有效,精度可达91%^[88]。更细致的农田识别演变为农作物分类的问题,目前比较成熟的方法主要是利用影像处理技术,提取形状等特征参数,通过决策树^[89]或神经网络等机器学习分类算法,实现特征的优选和作物内部细分。其中,随机森林优选特征的能力较强,神经网络和随机森林的分类效果较为稳定^[90]。土地整治区植被覆盖监测方面,具有易获取且成本低、时效高、多尺度特点的多时相-多光谱遥感数据最常用;中低空间分辨率的多光谱影像适用于大尺度植被群落的提取,但很难实现对植被物种级别的分类,而空间分辨率遥感影像更能实现植被的精细分类^[91];多平台遥感和地面调查数据相结合成为覆被变化监测的重要趋势^[92];BP神经网络等人工智能的算法比传统分类算法的表现更优秀,精度可达84%^[93]。土地整治区基础设施监测的主要对象有道路和农田灌排设施等。基于各类卷积神经网络构建的深度学习模型,识别过程高效且识别出的道路对象更光滑,精度可达98%^[94];农田灌排设施识别方面,传统方法主要是在植被指数等特征计算的基础上,应用监督分类的手段实现,但由于受到影像分辨率和特征提取的限制而精度较差,通过应用高空间分辨率遥感影像和面向对象分类相结合的方法,可有效提高精度^[95];但由于灌排沟渠

形态多样,且存在暗渠等遥感难以观测的情况,对影像分辨率要求高。因此当前整治区特征地物分类研究尺度仍有局限,分类精度仍有待提高。近年来,土地整治区的土地利用分类已从单一要素识别转变为多要素协同识别。基于高空间分辨率遥感影像,采用神经网络等机器学习方法进行小范围试验,土地利用分类整体精度可达91%^[96];随着多源遥感影像融合算法和数据挖掘技术的发展,利用深度学习模型可将多要素地物的定位和分类整体精度提高到95%以上^[97];将面向对象分类与深度卷积神经网络模型相结合,也可进行有效的土地利用多要素分类^[98]。

目前的遥感影像分类算法可分为传统算法和新型算法两类。传统算法包括监督分类(C1)和非监督分类(C2),对野外实测数据和先验知识具有较强的依赖性;新型算法主要包括面向对象分类(C3)、神经网络分类(C4)、决策树分类(C5)、专家系统分类(C6)、随机森林分类(C7)、支持向量机分类(C8)和卷积神经网络分类(C9)等,对样本质量和人工智能技术有较强的依赖性。各遥感影像分类算法的原理、具体算法和特点如表4所示。识别对象的特征决定了对数据源的需求,而识别对象的特征与数据源类型则共同决定了特征选择和分类的方法。传统算法主要用于中低空间分辨率遥感影像的大尺度地物分类,这种分类通常是保持在种群层面的“粗”分类,且精度有待提高。而新型算法对特征的依赖程度有所减小,同时对复杂地表环境具有更高的稳定性,因此分类精度较高,且能实现物种层面的细分分类^[82]。组合分类器^[99]也成为一个重要的研究方向。大量研究表明,新型算法的研发与应用有助于提高土地整治区土地利用类型的识别精度和效率,但在分类器参数等选取方面还有待进一步研究^[100]。

在土地整治区的土地利用分类研究中,常用的分类特征有:光谱特征、空间特征和时间特征等。不同数据源类型具有不同的特征。中低空间分辨率遥感影像用于分类时主要依赖光谱特征,因为其光谱特征稳定,类内方差较小、类间方差较大、不同地物光谱重叠率低,为此也更适合采用传统算法实现分类^[100];而高空间分辨率遥感影像具有更丰富的空间特征,但其光谱特征稳定性较差,因此更适合采用能解决高维特征问题的新型分类算法。光谱特征以原始影像数据和各类植被指数为主,善于区分植被和非植被等光谱差异明显的类型,但难以直接实现光谱相似地物间的细分,且植被指数有不同的适用条件。空间特征主要包括纹理、形状、大小和结构,

表4 各类遥感影像分类算法的基本原理、典型算法和特点

Tab.4 Principles, typical algorithms and characteristics of various RS image classification algorithms

分类算法	基本原理	典型算法	优点	缺点
C1	属于模式识别,根据已知训练样本选择并求取特征参数,将特征参数作为决策规则建立判别函数,实现分类	最大似然分类、最小距离分类、概率统计分类、模糊数学分类	分类精度高,准确性好	要求样本具有典型性和代表性,工作量大
C2	以不同地物在特征空间中类别特征的差异为依据,根据待分类样本特征参数的统计特征建立决策规则,实现分类	迭代自组织分类、K均值聚类分类、ISODATA法	对先验知识依赖小,工作量大	分类精度和准确性较低
C3	依据光谱、空间及纹理信息,按照均质性规则对影像进行多尺度分割,得到影像对象,通过设置特征空间对影像对象实现分类	隶属度函数法、最邻近法	在高空间分辨率影像分类中表现良好,避免椒盐效应,充分利用光谱、纹理及空间信息	对影像分割精度要求高,分割阈值等参数设置与优化困难
C4	属于非参数分类器,通过模拟人脑神经网络对信息进行分布式并行的加工、处理、存储和探索	反传网络等前向网络、BP算法等反馈网络	无需先验知识,不考虑统计分布特征,自学习、自组织,非线性映射能力强,网络结构灵活,容错力强	收敛速度慢,容易陷入局部最优解和过拟合,网路结构复杂参数设置难,推广能力差,结果解释性差
C5	属于机器学习和监督学习的范畴,利用树结构原则,定义决策树各个分支,由下而上,根据各个类别的相似程度,逐级向上聚类,实现分类	ID3、C4.5、CART	简单直观,数据无需预处理,可处理多维度输出分类问题,结果解释性较好,容错力强	容易过拟合,泛化能力差,受样本影响大,结构优化难,在复杂关系中容易失效,对先验知识依赖性强
C6	结合专家经验和人工智能技术构建知识库,实现分类		主客观相结合,分类结果更可靠	建库复杂,且推广能力差
C7	属于机器学习的范畴,通过集成学习的思想将多棵树集成的一种算法,它的基本单元是决策树,利用多棵树对样本进行训练并预测,将投票次数最多的类别指定为输出,实现分类		精度高,对高维大数据的分析能力强,数据无需预处理,能够评估各特征对分类结果的重要性,原理简单	在某些噪声较大的分类问题中易发生过拟合,信息量较大的特征会对结果产生更大的影响
C8	属于机器学习和监督学习的范畴,建立一个最优决策超平面,使得该平面两侧距离该平面最近的两类样本之间的距离最大化,实现分类		在解决小样本、非线性及高维模式识别问题中表现优秀,能够平衡模型复杂性与学习能力,避免过拟合,泛化能力强,结构风险小	训练时间长、存储空间消耗大,核函数选择和参数设置缺乏理论依据,推广性差
C9	深度前馈人工神经网络,属于深度学习和机器学习的范畴,进行逐层特征变换,将样本在原空间的特征表示变换到新的特征空间,自动学习得到层次化的特征表示,实现分类	LeNet、Alexnet、VGGNet、GoogLeNet、ResNet、SegNet	处理高维数据能力强,分类效果好、精度高	结果解释性差,原理近似于“黑匣子”,网路结构复杂且参数设置难

能够辅助解决光谱相似地物的识别问题。纹理是研究最广泛的空间特征,与光谱特征协同作用,可以达到更高的分类精度。基于灰度共生矩阵计算的纹理测度应用广泛;形状特征一般与遥感影像光谱特征多尺度分割相结合,从而减少分类的不确定性^[101]。时间特征的相关研究则刚刚起步,主要用到光谱特征和空间特征的时间变化曲线,前者主要是对各类植被指数的时序分析,后者主要针对纹理进行时序分析,相关研究还需进一步深入。此外,分类中的辅助特征,包括历史土地利用数据及区域其他相关专题资料,主要起到辅助判定的作用。具体的常用分类特征及其适用条件如表5所示。光谱特征、空间特征和时间特征的结合,可以增加特征维度,但也带

来了信息冗余,需要在特征优选和有效利用等方面作进一步研究。

总体而言,遥感分类技术的发展趋势为:从单纯的地类识别向属性特征复合分类的方向发展^[82],从粗糙“种群”分类向精细“物种”分类的方向发展,从单一分类器向多分类器集成的方向发展,从传统参数化算法向人工智能非参数化算法的方向发展^[102],同时多特征综合、多数据融合和多尺度复合也成为新时期需关注的遥感影像分类技术趋势^[103]。但是,要解决土地整治中土地利用遥感监测的问题,不仅要依靠分类算法上的创新,还要注重分类特征优化、分类器参数选取、样本高效采集与筛选等方面的研究。

表 5 几种常用分类特征及其适用条件

Tab. 5 Several common classification features and their applicable conditions

特征类型	常用特征	适用条件
光谱特征	RVI	对土壤、大气辐射效应的影响敏感,当植被覆盖度小于 30% 时不适用
	NDVI	适用于大空间尺度的植被动态监测,但对土壤背景变化敏感
	ARVI	大气实况参数难以获取
	EVI	必须含有蓝光波段
空间特征	纹理	与光谱特征互为补充能提高分类精度,但规律纹理应用广泛,自然纹理复杂度高,应用受限
	形状	应用较少,用于有明显边界的地类,依赖于数据的空间分辨率
	大小	应用较少,用于形状较为统一但大小差异较大的地类
	结构	应用较少,处于研究初期阶段,用于空间上有明显上下文关系的地物分类
时相特征	光谱特征时间变化曲线	常用植被指数时间变化曲线,主要用于农作物和落叶林等植被的分类
	空间特征时间变化曲线	常用纹理时间变化曲线,主要用于随物候期变化纹理形态也会随之变化的植被分类
辅助特征	植被物候特征	增强植被类型内部的可分性,提高分类精度
	地形	各种地类均有不同的海拔、坡度等需求,辅助光谱和纹理特征的分类效果
	土壤类型	可作为不同植被之间区分的有力依据
	历史数据	用于难以确定当前类型的地物,参考历史土地利用情况加以辅助判别

2.4 遥感定量反演模型研究进展

土地整治监测的主要内容除了土地利用变化外,还包括基于遥感影像构建数学模型对土地整治区关键地表信息的定量化反演,主要包括土壤理化生特性、土壤生态参量和农田生产力等。

土壤是土地整治的基本对象之一,土壤理化生特性是土地整治监测的重要内容,主要包含土壤含水量、土壤养分、土壤盐分、土壤重金属、土壤侵蚀模数和土壤荒漠化程度等,遥感技术在土壤特性表征方面有一定的可行性和局限性^[104]。土壤含水量反演方面,通过实测数据与光谱之间相关性分析构建的遥感监测模型,实际精度达到 60% 以上^[105],常用的遥感数据有可见光、红外和合成孔径微波雷达,其中合成孔径微波雷达较其他两者具有不易受大气影响的优势^[106],因此基于合成孔径微波雷达,尤其是多极化雷达的土壤含水量反演误差可保持在 $0.02 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 以下,基于卷积神经网络和被动微波数据同样可以实现土壤含水量高精度反演,相关性可高达 0.86 以上,误差保持在 1.12% 以下^[107];以合成孔径微波雷达和多光谱遥感影像等多源数据的协同利用为基础,结合水云模型和干旱指数可实现不同土地利用类型地表土壤含水量的估测^[108]。土壤肥力和土壤有机质含量反演方面,SVM 方法表现较好^[109];基于光谱与土壤实测数据的监测模型,实现有机质和各项养分的反演,相关性可达 0.8 以上^[110];将高光谱与多光谱影像融合建模,也是提高有机质含量反演精度的有力手段。土壤养分方面,传统采样化验方法成本高、时效差;植被指数法则通过遥感影像估算的作物长势参数间接反映土壤养分,对经验知识依赖性大,且精度无法保证^[111];土壤反射光谱对土壤养分有一定的指示作用,因此利

用高光谱数据可以实现有效估算,但数据难以保证^[112];将作物模型与时间序列遥感影像相结合进行土壤主要养分的反演,相关性可达 0.5 以上,误差在 10% 以下^[113]。土壤盐分的反演方面,将野外实测数据与遥感影像结合,通过敏感波段和光谱参量的筛选构建多元回归模型,整体精度可达 85%^[114];引入高光谱遥感影像提升光谱信息量,可提高盐渍化反演模型精度^[115-116],结合各类机器学习算法,模型的相关性可达 0.86 以上^[117];以野外实测数据为基础,融合合成孔径微波雷达等多源遥感数据和光谱特征优选的人工神经网络模型,可实现土壤盐渍化的快速精准预测,相关性可达 0.89 以上,效果优于传统的回归模型^[118]。土壤重金属含量的反演方面,目前最有效的方法主要为高光谱遥感影像的定量分析^[119]。土壤侵蚀模数和土壤荒漠化程度等在土地整治监测中相关研究较少,可采用植被指数实现建模^[120],或将 RUSEL 模型与机器学习相结合,实现有效反演^[121]。

提高耕地生产力是土地整治的重要目标之一,因此农田生产力是土地整治监测的重要内容。遥感影像、气象数据、趋势线分析和相关分析结合而成的模型表现良好;时空数据融合和 VPM 模型的结合也为农田生产力和耕地质量的反演提供了途径^[122];基于光学遥感和合成孔径微波雷达等提供的光学和极化特征,结合地面样点数据,利用多源数据协同的多元回归模型,可实现森林蓄积量的有效反演,相关性可达 0.67 以上且误差较小;充分挖掘红边波段特征,结合无人机多光谱影像的多种植被指数特征和野外实测数据,通过经验模型、多元回归模型或神经网络模型均可实现玉米等作物生物量的有效反演,进而反映农田本体的生产能力,其中神经网络模型

的效果较好,相关性可达0.83以上^[123]。

当前地表信息的反演模型向着地面实测数据与遥感影像结合、传统相关性分析与机器学习等人工智能手段相结合的方向发展,如何挖掘遥感数据的潜在信息,如何提高机器学习模型的效率和精度将是研究的重点和难点。

3 不同土地整治工作中的遥感监测

根据整治目标和对象的不同,土地整治相关工作分为土地资源调查与保护、土地复垦与生态修复、农用地整治(包括耕地质量提升和高标准农田建设)、宜农未利用地开发和建设用地整治等类型,各种类型侧重点有所不同,对遥感监测的需求不同。

3.1 土地资源调查与保护中的遥感监测

土地资源调查是土地整治的重要基础。将遥感与数据处理、地学分析等手段相结合,可用于地表信息获取、土地面积量测、大比例尺数字制图、辅助规划设计和专题基础资料获取等工作,同时航空遥感影像已广泛应用于土地资源详查,高分辨率航天遥感技术也推动了从定性分析向定性与定量相结合分析的新时期。

国际上,美国利用农业遥感实现灾害监测预警,从而有效降低经济损失;日本国土整治效果较好,1974年开始制定“国土情报整治事业”,明确规定土地利用、土地条件等10类调查项目采用遥感判读与遥感制图的方法;英国的土地利用调查与制图对国际国土整治与乡土调查影响深远,主要利用遥感影像实现地物自动分类与判读;法国国家地理院的国土整治有较大的国际影响力,在欧洲航天局支持下设计高分辨率的SPOT遥感卫星,用于测制服务于国土资源调查与规划的各类专题图;匈牙利运用遥感信息编制国土规划设计所用的多尺度地图集;加拿大基于遥感技术历时120年建立了用于国土管理的“土地信息库”,利用多光谱遥感影像快速获取土地覆盖和土地利用图;墨西哥等发展中国家,将遥感技术用于国土资源调查与地形、地质、土地利用、土壤等基础资料制图;巴拿马引进侧视雷达飞机用于编制国土资源地图。

在我国,地形、地类、地貌、地籍等基础信息可通过对高空间分辨率卫星遥感影像和航空、无人机遥感影像的智能化分析获取,为各项资源、环境、土地利用及灾害相关工作提供实时基础底图;土地利用变化、耕地质量变化等地表动态信息的采集和专题信息的获取,可依赖多源-多尺度-多时相卫星和航空遥感影像的融合实现^[124]。如矿区土地生态损伤及重建关键信息的快速提取,可通过遥感数据与非

遥感数据耦合^[125]实现;土地整治相关的土地利用分类及变化监测,可基于高空间或高光谱遥感影像,通过面向对象分类^[126]与机器学习或时间序列特征分析^[127]相结合的方法实现;土地退化评价及动态监测,可通过遥感影像统计学特征时序分析^[128]与层次分析相结合^[129]或多时相图谱分析实现;土地利用格局的分析可通过3S集成技术^[130]实现;土地整治信息现场勘查系统的开发可通过集成3S与语音识别技术^[131]实现;项目区的土壤特性监测可通过遥感影像光谱反演的方法实现,尤其是高光谱遥感数据^[132];区域受灾情况监测可通过利用红外遥感、多光谱影像分析及计算机影像处理等方法实现^[133];空心村、农村建设用地、主要工矿废弃地和未利用地分布情况的监测等,亦可通过遥感手段实现^[134]。综上,构建“天、地、网”一体化土地整治综合监管技术体系,辅助现场调查,可实现土地整治全程监管。

3.2 土地复垦与生态修复中的遥感监测

土地复垦与生态修复已成为推动生态文明建设的重要措施,主要围绕退化土地治理(包括盐碱地、污染土地、荒漠化土地、土壤侵蚀、土壤质地退化等问题)、荒废土地利用(包括矿山修复、工矿废弃地复垦等)和生态环境整治(包括退耕还林还草等)等主题展开。而遥感技术已成为高效识别、提取损毁土地信息,摸清损毁土地底数,验证、评估复垦工作成效,持续跟踪复垦土地实施管护情况的重要手段^[135]。

国际上的相关研究主要包括:利用遥感影像进行海岸带划分与土地复垦土地利用变化监测^[136],利用多时相遥感或植被指数特征分析进行生物量积累等土地复垦成效监测^[137-140]。近年来,生态整治与修复成为研究热点,相关研究采用区域内地貌、水文、地质、土壤理化性质、植被盖度等指标,通过主成分分析法来描述区域生物多样性及状况,以此来表明整治区域土地及生态修复状况^[141]。

在我国,矿山修复是土地复垦与生态修复最重要和最常见的内容,首要的整治目标有山体修复、隐患排除、平整土地、绿化环境、恢复生态等内容,整治工作以复垦复绿为主线,并进行生态农业的开发利用。遥感技术为长期监测矿区变化提供了可能,土地破坏前后的地形变化监测,可通过航片生成的DEM实现;复垦前后的土地利用变化和植被恢复状况监测可通过对多时相高分影像进行目视解译或植被指数等特征分析或人工神经网络与目视解译相结合的方法实现^[142-145];复垦面积等数据的精确测算可通过对遥感数据的解译分析实现;矿区复垦农田

重金属元素砷、锌、铜、铬和铅等含量的测定,可通过高光谱等遥感定量化反演的方法实现^[146-147];泥石流等矿区灾害监测及整治方案的确定,可通过多源-多时相遥感与数字影像处理相结合的方法实现;矿区复垦带来的生物多样性恢复等生态重建效应定量化研究,可通过遥感影像解译的方法实现^[148];矿山开发及环境治理的相关基础数据获取可通过地质环境遥感监测的方法实现;矿山地质环境恢复监测,可通过对多源高分遥感影像进行专题信息提取或进行植被光谱信息分析的方法实现^[148];矿区土地破坏、压占、复垦场的直观展示可通过将遥感影像与GIS、三维虚拟现实相结合的方法实现^[149];复垦区作物种植结构的合理调整,可通过利用遥感目视解译获取作物种植信息的方法实现^[150]。盐碱地治理也是当前的研究热点,盐碱地提取和盐碱化程度分析,可通过多尺度遥感影像地物特征信息(颜色、大小、位置、水文地貌等)与目视解译相结合的方法实现^[151];土壤盐分的反演,可在高光谱与多光谱遥感融合的基础上,通过BP神经网络等人工智能分析的方法实现^[152]。退耕还林还草是环境整治的重要内容,生态安全水平及格局的变化监测,可在构建评价指标体系的基础上,通过遥感和GIS分析相结合的方法实现^[153]。

3.3 农用地整治中的遥感监测

农用地整治旨在提高现有农田的农业生产能力和韧性,其重点难点是实现土壤肥力和基础设施工程建设的权衡。目前,国内外对农用地整治遥感监测方面的研究较少,其中对田块平整、灌排沟渠工程等基础设施的宏观建设情况关注较多,很少从土壤质量、土壤环境等微观角度进行监测研究。

农用地整治带来的产能提升定量化研究,可通过时间序列遥感影像的植被指数分析与SVM等机器学习手段相结合的方法实现;整治中涉及到的涵洞、土壤质量等隐蔽型质量检测问题,可通过高分辨率正射影像与探地雷达等相结合的方法实现。在我国,高标准农田建设是最广泛的农用地整治项目,盲目的田间工程建设易造成土地质量退化及土壤污染,因此急需关注重金属含量等土壤环境的状况,针对传统重金属测定方法成本高、环保性差、范围有限等问题,采用高光谱遥感技术反演高标准农田建设区域土壤重金属含量,基于相关性分析构建土壤重金属的高光谱反演模型,为快速有效地监测高标准基本农田建设区域土壤生态状况提供技术支持^[147]。

3.4 宜农未利用地开发中的遥感监测

宜农未利用地开发的重点是将未使用的土地或

自然土地等非耕地转化为耕地,它是获得新增耕地的有效手段之一。国外学者并没有给予过多的关注与研究,国内则主要围绕新增耕地和有效新增耕地的遥感面积测算展开。海文静等^[154]针对新增耕地面积与新增有效耕地面积之间存在界定不清、混淆使用等问题,界定了土地整治项目新增有效耕地的概念,采用文献资料分析、灰色系统GM(1,1)模型测算及遥感影像抽样调查等方法,构建了有效耕地面积的测算模型。

3.5 建设用地整治中的遥感监测

国内外对建设用地整治的关注重点明显不同,国外主要研究城市土地整治及景观变化的遥感监测方法,而国内重点围绕农村建设用地整治的遥感监测展开。

国际上,BENZA等^[155]基于LandSat ETM+和ERS-2SAR数据,结合SAR的纹理提取和光谱混合分析(Spectral mixture analysis, SMA),完成基于模式的场景识别,利用决策树的方法生成城市环境地图,实现建筑、植被和其他土地覆盖等分类,为西非国家加纳南部地区的城市化进程和城市景观变化监测提供思路。

在我国,农村居民点整治及其空间布局与优化已成为建设用地整治的研究热点,在增加区域用地指标、改善村庄居住环境等方面有积极意义。目前关于建设用地整治遥感监测的研究主要围绕农村居民点整治增加可利用土地面积潜力测算和景观格局变化监测的角度展开^[156-157]。农村居民点整治潜力可通过将正射影像人工解译、GIS平台和实地调研数据相结合,构建测算模型的方法测算^[158],或者在遥感获取土地利用分类的基础上,通过构建整治潜力评价技术体系的方式实现测算^[159]。

3.6 生态化土地整治中的遥感监测

国外对土地整治的生态效益、环境影响、景观格局等方面关注较早,多年来重点围绕退化土地、污染土地的综合治理展开工作,因此生态化土地整治的研究成果,主要体现在土地复垦与生态修复等方面。

在我国,土地整治处于推动新景观生态格局的阶段^[160],土地整治中的生态模式、生态设计、规划方法等研究已为生态化土地整治提供了一定的科学基础,包括土地整治与景观生态相融合的整治规划理念等,但如何在土地整治过程中既满足生产和生活需要,又将工程布局可能产生的生态问题降到最低,如何在整治工程生态适宜性评价的基础上,给出生态化土地整治的规划方向与工程重点,都是目前土地整治研究和实践过程中涉及较少的内容^[21],而相关研究的实现均离不开遥感技术的支撑。将无人

机影像与实测数据相结合,是获取区域景观格局特征的有效手段,结合生态功能分区,可为生态化土地整治规划提供数据基础和策略方向^[31];多时相遥感数据影像特征的合理利用,则为矿山地质环境恢复治理情况的动态监测提供了信息来源^[161];3S技术与基于遥感的景观特征指标结合利用,是生态走廊和生态城市建设规划的重要战略要点^[162];在遥感影像分类和景观特征获取的基础上,结合影像处理、形态学分析、数学预测模型和相关性分析等手段,可实现对土地整治区景观格局变化的有效监测^[163]。

4 土地整治项目过程中的遥感监测

土地整治项目包括规划设计、施工、竣工验收、效益评价和建后监管等过程。遥感技术可用于全过程监测,为各阶段的实施提供高精度影像,为工程建设信息的获取提供准确数据支撑,效率更高、数据更有效、展示更直观、监控内容更全面。2013年以来,自然资源部国土整治中心及部分省市土地整治管理部门,先后利用卫星遥感及无人机低空遥感在土地整治项目开工前、完工后获取影像,在提高项目的设计和管理水平、强化监测监管活动等方面取得了良好的效果^[165]。

4.1 土地整治潜力测算与风险评估中的遥感监测

土地整治适宜性评价已成为土地整治潜力测算和风险评估的有效手段,也是评判当前土地整治工程是否实现“有利生产,方便生活,兼顾生态”目标的重要依据,更是土地整治理论与规划、工程布局方面亟待解决的重要命题^[21],当前的研究也多围绕这一主题展开。

生态适宜性评价是土地整治规划的基础之一,卫星遥感与无人机航拍相结合的方式,能够高精度提取道路等地类信息,作为关键评价指标获取的基础。在构建生态适宜性评价模型的基础上,测算生态布局潜力指数,为土地整治规划的开展提供科学依据^[21];在具体指标获取方面,利用遥感技术实现坡度坡向、土壤有机质含量、土壤质地、有效土层厚度和土壤侵蚀度等信息的获取已被广泛应用^[33];针对土地石漠化区或土地损毁区,基于遥感影像可以实现植被覆盖度、岩石露头率等关键因子信息^[165],同时提取土地利用与土地损毁信息,确定综合生态风险值及其等级空间分布,并划定土地利用功能分区^[166]。

4.2 土地整治规划设计中的遥感监测

可行性分析是土地整治项目规划的前提,卫星影像、无人机航测和三维场景构建技术的结合,可为项目提供精准的基础空间数据和专题图件,进一步

分析项目区地形、地质、区域基础设施条件、自然资源条件和土地利用现状,更客观高效节约成本,指导土地整治可行性决策^[17];通过低空无人机航摄影像等遥感数据和土地整治项目区土地利用现状图之间的对比,可对项目区的地形地貌等具体情况进行整体认知,为立项审批、工程量预判和预算设计提供真实、科学的依据^[13]。

针对农村基础设施不适应现代农业生产需求的现状,利用遥感技术辅助农村土地综合整治项目的规划设计,弥补了土地利用现状图作为编制底图的不足,快速低成本地获取高分影像,得到土地整治区域直观、详实的地物分布情况;在分析土地利用现状的基础上,测算研究区土地整治潜力并进行功能分区,依此制定更加科学的规划方案;将高分辨率遥感影像和无人机影像相结合作为调查结果的更新数据源,可为土地整治区域面积监督(即对已整理区域的面积检验监督)、土地整治潜力分析(即对未整理区的潜力估算)以及土地整治区域优化选址(考虑生态效益和环境要素关系)研究,提供科学支撑^[167]。

4.3 土地整治施工监管中的遥感监测

在施工阶段,阶段性地利用无人机对项目区进行航拍,能低成本地进行精确工程量测算,掌握工程进度和实施情况^[168]。但现有研究以土地整治工程遥感识别方法为主,对于如何从遥感影像中提取工程信息,进一步对工程进度进行分析和评价的研究较少。在土地整治项目中期或重要节点,对比实时高分辨率遥感影像与土地利用现状、土地整治规划图之间的差异,获取工程进度情况及施工范围、施工面积、土地利用结构变化、工程量等具体数据,实现项目针对性监督,避免损失并提高监管效率^[17]。

当前高分辨率卫星遥感数据可以实现对项目(片)的区位、建设规模、新增耕地面积、水利设施、道路、防护林、工矿及居民点用地等工程指标的有效获取^[169];多时相高分辨率遥感数据能够在实现土地整治工程地物信息提取的基础上构建评价模型,以综合掌握项目实施进展,尤其是在土地复垦项目中实现土地覆被动态监测^[170];其中项目区灌排工程及道路等线状地物的自动化识别一直是研究的难点,通过将高分辨率影像、面向对象分类及形态学处理手段相结合的方式实现自动化检测,目前已有所突破^[171-172]。

4.4 土地整治项目验收评价中的遥感监测

在土地整治项目的竣工验收阶段,利用遥感技术提供的项目效果图进行存档。通过将无人机获取的实时项目区高分辨率影像与图件资料进行叠加对

比,测算工程量,高精度勾绘地类界线,并统计面积、辨识农田基础设施和项目区真实状况,从而直观分析工程施工与设计的一致性,检验项目的真实性和最终成效,快速验收工程质量和建设情况^[173],尤其是实现对重点工程区的量化分析,目前研究已较为广泛。

土地整治项目验收后,一般从社会效益、经济效益和生态效益等方面开展绩效评价。通过遥感手段辅助开展项目绩效评价工作,能使结果更具信服力^[113]。经济效益主要表现为农业生产力的提高,已有研究多从土壤质量、土地质量或生产力的提升角度展开^[174-178]。生产力改善可以利用时间序列植被指数分析或植被指数与产量相关性分析的方法评估^[179-181];张兵等^[182]提出了利用高分辨率遥感影像对土地整治成果进行监测的完整技术方法和操作流程;多时相-多尺度的遥感数据则为精准提取面积、长度等关键工程量指标、定性分析整理后土壤改良情况等提供了基础数据;将高分辨率遥感影像的光谱与纹理信息,与矢量数据相结合,集成面向对象分类、决策树分类和形态学处理等手段,构建多尺度评价指标体系,可实现土地整治中田块形态变化和农田林网建设等建设成效的评价^[183-184]。

土地整治的社会效益和生态效益目前多以定性分析为主,如社会效益主要体现在土地整治后农民生活水平的提高,具体可通过农民满意程度调查获取,定量分析评价的研究较少,尤其是生态效应还存在滞后、难以量化等问题。因此土地整治生态效益遥感监测和评价成为研究难点。在遥感影像分类的基础上,结合“压力-状态-响应”模型,能够实现土地沙漠化预警;生态环境状况遥感指数(Ecological and environmental conditions remote sensing index, EI)等已被证明是反映自然植被增长趋势、土地整治生态效益的有效表征^[185];时间序列遥感植被指数的变化也能间接体现土地整治前后的生态状况和退耕还林工程实施的效果^[16];地形高程、植被指数、地表温度和土壤湿度等指标的耦合,是实现大尺度和中尺度矿区复垦的效益评价的有力基础^[186];多源-多时相高分遥感影像与面向对象地表景观分类的结合,更是成为土地整治效果景观格局变化的重要评估依据。

5 展望

不同类型的遥感技术具有不同的特点,适用于不同的土地整治监测问题,其中多光谱、高光谱和无人机技术的结合应用广泛,能够实现土地整治区地形地貌、土壤状况、地物类型等空间信息的有效获

取,为土地整治项目的各阶段提供了客观、精准、高效、便捷、多尺度的基础数据;按照数据分析方式的不同,可分为单时相分析和多时相分析,尤其利用多时相遥感影像,进行植被指数等时间序列特征分析,能够实现土地利用变化、地表覆被变化等动态基础信息获取,为土地整治项目的全过程提供了长期、实时的监测依据;按照数据组织形式的不同,可分为单一数据源应用和多源数据融合应用,其中多源遥感融合可实现不同类型数据的优势互补,充分挖掘数据中的隐含信息,目前已成为遥感应用的重要趋势,可为土地整治提供更加深入、全面的信息。经过多年发展,遥感技术为土地整治监测提供了日益丰富的技术支持。

但土地整治遥感监测仍具有明显的局限性:在数据源方面,获取高质量的高分辨率卫星或航拍遥感影像的经济成本和时间成本较高,受项目经费和整治区环境条件的影响明显,且部分土地整治区只能依靠航拍来获取基础数据,信息源和数据分析手段均受到限制;在工作基础方面,区域化、实验型的探索虽然取得了一定成效,但面向省域乃至更大范围的土地整治遥感监测,尚未形成稳定长效的工作机制,且尚未建立完善的土地整治多尺度立体遥感监测技术体系;在技术攻关方面,土地整治遥感监测技术所涉及的环节众多,监测数据、监测内容、监测区域等都存在较大差异性,对应的技术路线也因此存在不同,如涵洞、暗渠等体型较小或较为隐蔽的整治工程及其质量的遥感监测工作实现难度大,相应的关键技术瓶颈亟待突破。

针对当前土地整治遥感监测中面临的突出问题,要用系统性思维,从整体的角度逐一攻关。针对数据源和信息获取手段单一的问题,要着力研发普适性更强、更多源高效的卫星传感器设备,并基于计算机科学研究相应的影像处理与分析技术,提高遥感信息的获取和分析能力,实现土地整治工作的“天上看、地上查、网上管”的全方位监管;针对土地整治监管工作基础和背景支撑薄弱的问题,要建立长效机制,推进行业交流,在区域性试点研究和优化的基础上,实现成果转化与推广,做到经验交流与技术积累并重,提升土地整治监测效率,并形成行业技术标准;针对技术问题,要充分发挥3S技术集成的优势,将数据获取、处理、分析和决策的环节综合考虑,在传统手段的基础上,充分挖掘人工智能、多源遥感影像融合和时间序列分析等技术与方法在遥感信息提取中的应用潜力,突破影像处理、地物分类、变化检测等方面的技术瓶颈,使遥感技术在土地整治监测工作中发挥更大的效用。

参 考 文 献

- [1] SKINNER M W, KUHN R G, JOSEPH A E. Agricultural land protection in China: a case study of local governance in Zhejiang Province[J]. *Land-use Policy*, 2001, 18(4): 329–340.
- [2] TILMAN D, CASSMAN K G, MATSON P A, et al. Agricultural sustainability and intensive production practices[J]. *Nature*, 2002, 418(6898): 671–677.
- [3] HEERINK N, QU F, KUIPER M, et al. Policy reforms, rice production and sustainable land-use in China: a macro-micro analysis[J]. *Agric. Syst.*, 2007, 94(3): 784–800.
- [4] JIANG G, WANG X, YUN W, et al. A new system will lead to an optimal path of land consolidation spatial management in China[J]. *Land Use Policy*, 2015, 42(42): 27–37.
- [5] SETO K C, KAUFMANN R K, WOODCOCK C E. Landsat reveals China's farmland reserves, but they're vanishing fast[J]. *Nature*, 2000, 406(6792): 121.
- [6] ZHAO W Z, XIAO H L, LIU Z M, et al. Soil degradation and restoration as affected by land-use change in the semiarid Bashang Area, Northern China[J]. *Catena*, 2005, 59(2): 173–186.
- [7] TAN M, LI X, XIE H, et al. Urban land expansion and arable land loss in China: a case study of Beijing–Tianjin–Hebei region[J]. *Land-use Policy*, 2005, 22(3): 187–196.
- [8] GAO J, LIU Y. Determination of land degradation causes in Tongyu County, Northeast China via land cover change detection[J]. *Int. J. Appl. Earth Observ. Geoinform.*, 2010, 12(1): 9–16.
- [9] WANG J, CHEN Y Q, SHAO X M, et al. Land-use changes and policy dimension driving forces in China: present, trend and future[J]. *Land-use Policy*, 2012, 29(4): 737–749.
- [10] 鄧文聚, 高璐璐, 张超, 等. 从生态文明视角看我国土地利用的变化及影响[J]. *环境保护*, 2018, 46(20): 31–35.
- YUN Wenju, GAO Lulu, ZHANG Chao, et al. The change and influence of land use in China from the perspective of ecological civilization[J]. *Environmental Protection*, 2018, 46(20): 31–35. (in Chinese)
- [11] 鄧文聚, 杨晓艳, 石英. 土地整理概念的科学界定[J]. *资源与产业*, 2008, 10(5): 1–2.
- YUN Wenju, YANG Xiaoyan, SHI Ying. Scientific definition of land consolidation concept[J]. *Resources & Industries*, 2008, 10(5): 1–2. (in Chinese)
- [12] 李北方, 胡如忠, 张曾祥. 遥感技术为国土资源调查开辟广阔前景[J]. *遥感信息*, 1986(4): 7–8.
- LI Beifang, HU Ruzhong, ZHANG Zengxiang. Remote sensing technology opens up broad prospects for land and resources survey[J]. *Remote Sensing Information*, 1986(4): 7–8. (in Chinese)
- [13] 李少帅. “天眼”看整治——对土地整治遥感监测工作的思考[J]. *中国土地*, 2014(11): 45–46.
- LI Shaoshuai. “Tianyan” seeing renovation—thinking on remote sensing monitoring of land remediation[J]. *China Land*, 2014(11): 45–46. (in Chinese)
- [14] 张超, 乔敏, 鄧文聚, 等. 耕地数量、质量、生态三位一体综合监管体系研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2017, 48(1): 1–6. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170101&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.01.001.
- ZHANG Chao, QIAO Min, YUN Wenju, et al. Trinity comprehensive regulatory system about quantity, quality and ecology of cultivated land[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(1): 1–6. (in Chinese)
- [15] 张文博. 无人机航测技术在土地综合整治中的应用研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2013.
- ZHANG Wenbo. Application of aerial survey technology of drones in comprehensive land improvement[D]. Changsha: Changsha University of Science and Technology, 2013. (in Chinese)
- [16] 邵金强, 罗斐. 3S技术在土地综合整治项目中的应用探讨[J]. *科技信息*, 2014(8): 163.
- SHAO Jinqiang, LUO Fei. Application of 3S technology in land comprehensive improvement project[J]. *Science and Technology Information*, 2014(8): 163. (in Chinese)
- [17] ZHANG Q Q, LUO H B, YAN J M. Integrating biodiversity conservation into land consolidation in hilly areas—a case study in southwest China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(6): 274–278.
- [18] 孟宪素, 李少帅. 遥感技术在土地整理复垦开发项目监管工作中的应用实践[J]. *资源与产业*, 2009, 11(2): 66–70.
- MENG Xiansu, LI Shaoshuai. Application of remote sensing technology in the supervision of land consolidation and reclamation development projects[J]. *Resources & Industries*, 2009, 11(2): 66–70. (in Chinese)
- [19] 胡振琪, 梁宇生, 巩玉玲, 等. 2016年土地科学研究重点进展评述及2017年展望——土地工程与技术分报告[J]. *中国土地科学*, 2017(3): 70–79.
- HU Zhenqi, LIANG Yusheng, GONG Yuling, et al. Review of the key progress of land science research in 2016 and the outlook for 2017—land engineering and technology sub-reports[J]. *China Land Science*, 2017(3): 70–79. (in Chinese)
- [20] 张晓燕. 关于加快推进土地整治科技创新的思考[J]. *中国土地*, 2017(3): 20–22.
- ZHANG Xiaoyan. Thoughts on accelerating the scientific and technological innovation of land consolidation[J]. *China Land*, 2017(3): 20–22. (in Chinese)
- [21] 谭少军, 邵景安. 基于生态适宜性评价的西南丘陵区土地整治工程布局研究[J]. *地理研究*, 2018, 37(4): 659–677.
- TAN Shaojun, SHAO Jingan. Research on the layout of land consolidation engineering in southwest hilly area based on ecological suitability evaluation[J]. *Geographical Research*, 2018, 37(4): 659–677. (in Chinese)
- [22] SUSH Q, LIN B S, ZENG X T. The environmental protection problem and its solution in land consolidation project[J]. *The Ecological Environment*, 2006, 15(4): 881–884.
- [23] 戴建清. 基于遥感的土地整理评价可行性研究[J]. *城市勘测*, 2007(2): 47–48.
- DAI Jianqing. Feasibility study of land consolidation evaluation based on remote sensing[J]. *Urban Survey*, 2007(2): 47–48. (in Chinese)
- [24] LU Y, JENKINS A, FERRIER R C, et al. Addressing China's grand challenge of achieving food security while ensuring

- environmental sustainability[J]. *Science Advances*, 2015,1(1):e1400039.
- [25] CRECENTE R, ALVAREZ C, FRA U. Economic, social and environmental impact of land consolidation in Galicia[J]. *Land-use Policy*, 2002, 19(2):135-147.
- [26] BRINK A V D. Land consolidation and the emergence of the metropolitan landscape[J]. *Modern Land Consolidation*, 2004: 89-98.
- [27] VAN D M P, LEMMEN C, UIMONEN M. Modern land consolidation: multipurpose approach for sustainable development[J]. *GIM International*, 2005,19(1):51-53.
- [28] MIRANDA D, CRECENTE R, ALVAREZ M F. Land consolidation in inland rural Galicia, NW Spain, since 1950: an example of the formulation and use of questions, criteria and indicators for evaluation of rural development policies[J]. *Land-use Policy*, 2006,23(4):511-520.
- [29] CAY T, AYTEN T, ISCAN F. Effects of different land reallocation models on the success of land consolidation projects: social and economic approaches[J]. *Land-use Policy*, 2010,27(2):262-269.
- [30] PA*SAKARNIS G, MORLEY D, MALIENE V. Rural development and challenges establishing sustainable land-use in Eastern European countries[J]. *Land-use Policy*, 2013,30(1):703-710.
- [31] 蔡朕. 西南丘陵山区生态化土地整治规划设计研究[D]. 重庆:西南大学, 2014.
CAI Zhen. Research on the planning and design of ecological land remediation in Southwest Hilly Areas[D]. Chongqing: Southwest University, 2014. (in Chinese)
- [32] PA*SAKARNIS G, MALIENE V. Towards sustainable rural development in Central and Eastern Europe: applying land consolidation[J]. *Land-use Policy*, 2010,27(2):545-549.
- [33] 夏方舟, 杨雨濛, 严金明. 中国国土综合整治近40年内涵研究综述:阶段演进与发展变化[J]. *中国土地科学*, 2018, 32(5):78-85.
XIA Fangzhou, YANG Yumeng, YAN Jinming. The connotation research review on integrated territory consolidation of China in recent four decades: staged evolution and developmental transformation[J]. *China Land Sciences*, 2018,32(5):78-85. (in Chinese)
- [34] 赖云, 祁琼. 无人机航测在土地整治项目核查验收中的应用[J]. *地理空间信息*, 2014(5):20-22.
LAI Yun, QI Qiong. Application of UAV aerial survey in verification and acceptance of land remediation projects[J]. *Geospatial Information*, 2014(5):20-22. (in Chinese)
- [35] 胡振琪, 陈涛. 基于ERDAS的矿区植被覆盖度遥感信息提取研究——以陕西省榆林市神府煤矿区为例[J]. *西北林学院学报*, 2008, 23(2):164-167,183.
HU Zhenqi, CHEN Tao. Remote sensing information extraction of vegetation coverage based on ERDAS—taking Shenfu Coal Mine Area of Yulin City, Shaanxi Province as an example[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2008,23(2):164-167,183. (in Chinese)
- [36] 韩周炳, 何龙飞. 无人机航摄技术在土地整治项目中的应用[J]. *智能城市*, 2018,14(6):900-901.
HAN Zhoubing, HE Longfei. Application of UAV aerial photography technology in land remediation projects [J]. *Smart City*, 2018,14(6):900-901. (in Chinese)
- [37] 顾振伟, 张超, 杨建宇, 等. 基于高分辨率遥感影像的灌排沟渠提取方法[J]. *农业工程*, 2014, 4(3):64-67.
GU Zhenwei, ZHANG Chao, YANG Jianyu, et al. Extraction method of irrigation and drainage ditch based on high resolution remote sensing image[J]. *Agriculture Engineering*, 2014, 4(3): 64-67. (in Chinese)
- [38] 孙小芳. 结合目标分割的高光谱城市地物分类[J]. *国土资源遥感*, 2017,29(3):171-175.
SUN Xiaofang. Classification of hyperspectral urban land objects based on target segmentation[J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2017,29(3):171-175. (in Chinese)
- [39] 王宏胜, 李永树, 吴玺, 等. 结合空间分析的面向对象无人机影像土地利用分类[J]. *测绘工程*, 2018(2):57-61.
WANG Hongsheng, LI Yongshu, WU Xi, et al. Land use classification of object-oriented UAV image based on spatial analysis [J]. *Surveying and Mapping Engineering*, 2018(2):57-61. (in Chinese)
- [40] 孙斌. 退化土地遥感识别与评价技术研究[D]. 北京:中国林业科学研究院, 2016.
SUN Bin. Research on remote sensing identification and evaluation technology of degraded land [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2016. (in Chinese)
- [41] 杜国明, 李响, 于凤荣, 等. 基于遥感的2000—2009年三江平原北部耕地变化特征分析[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(1):225-229.
DU Guoming, LI Yun, YU Fengrong, et al. Change characteristics analysis of farmland in Northern Sanjiang Plain in 2000—2009 based on remote sensing[J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(1): 225-229. (in Chinese)
- [42] 王启亮. 红外遥感技术在崇明县土地利用现状调查中的应用[J]. *运城高专学报*, 2000,18(6):29-30.
WANG Qiliang. Application of color infrared remote sensing technology in the survey of soil use status in Chongming County [J]. *Journal of Yuncheng College of Technology*, 2000, 18(6): 29-30. (in Chinese)
- [43] 林珩. 二滩电站建设中水库淹没损失的遥感估算[J]. *资源科学*, 1984,6(4):66-74.
LIN Hui. Remote sensing estimation of reservoir inundation loss in the construction of Ertan Hydropower Station[J]. *Resources Science*, 1984,6(4):66-74. (in Chinese)
- [44] 花东文, 韩霖昌, 张扬, 等. 基于探地雷达方法的新增耕地土层厚度估测——以南泥湾土地整治项目为例[J]. *西部大开发(土地开发工程研究)*, 2016(1):36-41.
HUA Dongwen, HAN Jinchang, ZHANG Yang, et al. Estimation of new cultivated soil thickness based on ground penetrating radar method—taking Nanniwan land improvement project as an example [J]. *West Development (Land Development Engineering Research)*, 2016(1):36-41. (in Chinese)
- [45] 王旭辉. 遥感技术及在城市国土规划中的应用[J]. *上海国土资源*, 2014,35(1):88-91.
WANG Xuhui. Remote sensing technology and its application in urban land planning[J]. *Shanghai Land Resources*, 2014,35(1):88-91. (in Chinese)

- [46] PITAS I, VENETSANOPOULOS A N. Nonlinear digital filters: principles and applications[M]. Boston, MA: Kluwer, 1990.
- [47] GONZALES R C, WOODS R E. Digital image processing[M]. Addison · Wesley, 1992.
- [48] KO S J, LEE Y H. Center weighted median filters and their applications to image enhancement[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems, 1991, 38(9): 984 – 993.
- [49] LEE Y H, KASSAM S A. Generalized median filtering and related nonlinear filtering techniques[J]. IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing, 1985, 33(3): 672 – 283.
- [50] BROWNRIGG D R K. Generation of representative members of a RrSst weighted median filter class[J]. IEE Proceedings Part E Communications, Radar and Signal Processing, 1986, 33(5): 445 – 448.
- [51] LIN H, WILLSON A N. Median filter with adaptive length[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems, 1988, 35(6): 675 – 690.
- [52] SUN T, NEUVO Y. Detail-preserving median based filters in image processing[J]. Pattern Recognition Letters, 1994, 15(3): 341 – 347.
- [53] ABREU E, LIGHTSTONE M, MITR S K, et al. A new efficient approach for the removal of impulse noise from highly corrupted images[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1996, 5(6): 1012 – 1025.
- [54] HWANG H, HADDAD R A. Adaptive median filter: new algorithms and results[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1995, 4(4): 499 – 502.
- [55] 李树涛. 多传感器影像信息融合方法与应用研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2001.
LI Shutao. Multi-sensor image information fusion method and application research[D]. Changsha: Hunan University, 2001. (in Chinese)
- [56] STARCK J L, DONOHO D L, CANDÈS E J. Very high quality image restoration by combining wavelets and Curvelets[J]. Proc of SPIE, 2001, 4478: 9 – 19.
- [57] ESLAMI R, RADHA H. New image transforms using hybrid wavelets and directional filter banks: analysis and design[J]. Proc of IEEE Int Conf Image Processing, 2005(1): 733 – 736.
- [58] XIE Z. Image registration using hierarchical B-Splines[D]. USA Arizona State University, 2002.
- [59] HANAIZUMI H, FUJIURA S. An automated method for registration of satellite remote sensing images[C]//Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS'93, 1993: 1348 – 1350.
- [60] WONG A, CLAUSI D A. ARRSI: automatic registration of remote-sensing images[J]. IEEE Trans. on GRS, 2007, 45(5): 1483 – 1493.
- [61] RANDRIANARISOA V, YANG X J, SHENG Y, et al. Robust automatic ground image feature extraction for multisensor image registration[J]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2001, 4385: 129 – 139.
- [62] 裴璐乾. SAR、红外、可见光影像配准及融合算法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2011.
PEI Luqian. Research on SAR, infrared, visible image registration and fusion algorithm[D]. Xian: Xidian University, 2011. (in Chinese)
- [63] 陈洁. 红外与可见光影像融合算法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
CHEN Jie. Research on infrared and visible image fusion algorithm[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013. (in Chinese)
- [64] 张倩, 张荣, 刘政凯. 基于相似性度量的高分辨率 SAR 影像无监督分割[J]. 中国科学技术大学学报, 2010, 40(2): 123 – 128.
ZHANG Qian, ZHANG Rong, LIU Zhengkai. Unsupervised segmentation of high resolution SAR images based on similarity measures[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2010, 40(2): 123 – 128. (in Chinese)
- [65] 姚为, 韩敏. 热红外与多光谱遥感影像的神经网络回归融合方法研究[J]. 中国影像图形学报, 2010, 15(8): 1278 – 1284.
YAO Wei, HAN Min. Research on neural network regression fusion method of thermal infrared and multi-spectral remote sensing images[J]. Journal of Image and Graphics, 2010, 15(8): 1278 – 1284. (in Chinese)
- [66] 韩玲, 吴汉宁, 杜子涛. 多源遥感影像数据融合方法在地学中的应用[J]. 地球科学与环境学报, 2005, 27(3): 78 – 81.
HAN Ling, WU Hanning, DU Zitao. Application of multi-source remote sensing image data fusion method in geosciences[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2005, 27(3): 78 – 81. (in Chinese)
- [67] 衢霖, 邵芸, 范湘涛. 雷达遥感的地质应用及其进展[J]. 遥感技术与应用, 2002, 17(5): 269 – 275.
QU Lin, SHAO Yun, FAN Xiangtao. Geoscience application of radar remote sensing and its progress[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2002, 17(5): 269 – 275. (in Chinese)
- [68] POHL C, VAN-GENDEREN J L. Multisensor image fusion in remote sensing concepts, methods, and applications[J]. International Journal of Remote Sensing, 1998, 19(5): 823 – 854.
- [69] 高文涛, 汪小钦, 凌飞龙. 基于纹理的雷达与多光谱遥感数据小波融合研究[J]. 中国图象图形学报, 2008, 13(7): 1341 – 1347.
GAO Wentao, WANG Xiaoqin, LING Feilong. Wavelet fusion research of texture-based radar and multi-spectral remote sensing data[J]. Journal of Image and Graphics, 2008, 13(7): 1341 – 1347. (in Chinese)
- [70] 敬忠良, 肖刚, 李振华. 影像融合: 理论与应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.
- [71] BUTT P J, ADELSON E H. Merging images through pattern decomposition[J]. Proceedings of SPIE, 1985, 575: 173 – 182.
- [72] NASON G P, SILVERMAN B W. The stationary wavelet transform and some statistical applications[J]. Wavelets and Statistics, 1995.
- [73] DONOHO D L. Wedgelet: nearly minimax estimation of edges[J]. The Annals of Statistics, 1999, 27(3): 859 – 897.
- [74] CUNHA A L D, ZHOU J P, DO M N. The nonsubsampled contourlet transform: theory, design, and applications[J]. IEEE Trans. on Image Processing, 2006, 15(10): 3089 – 3101.
- [75] WANG Z, MA Y. Medical image fusion using m-PCNN[J]. Information Fusion, 2008, 9(2): 176 – 185.
- [76] LI S T, SHAW-TAYLOR J. Comparison and fusion of multiresolution features for texture classification[J]. Pattern

- Recognition Letter, 2005, 26(5): 633 - 638.
- [77] 王宏, 敬忠良, 李建勋. 多分辨率影像融合的研究与发展[J]. 控制理论与应用, 2004, 21(4): 145 - 151.
WANG Hong, JING Zhongliang, LI Jianxun. Research and development of multi-resolution image fusion[J]. Control Theory and Application, 2004, 21(4): 145 - 151. (in Chinese)
- [78] 刘贵喜. 多传感器影像融合方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2001.
LIU Guixi. Research on multi-sensor image fusion method[D]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology, 2001. (in Chinese)
- [79] 徐青, 邢帅, 耿则勋, 等. 遥感影像融合与分辨率增强技术[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 68 - 84.
- [80] 贾永红. 多源遥感影像数据融合技术[M]. 北京: 测绘出版社, 2005: 4.
- [81] 钟庆新. 多源遥感影像融合相关技术研究[D]. 长沙: 中南大学, 2009.
ZHONG Qingxin. Research on multi-source remote sensing image fusion related technology [D]. Changsha: Central South University, 2009. (in Chinese)
- [82] 乔玉良. 黄土地区高中低产农田成因及遥感分类方法研究——以山西省定襄县为例[J]. 遥感学报, 2002, 6(1): 70 - 74.
QIAO Yuliang. Study on the genesis and remotely sensing classification method of high, central and low production in loess areas—a case study from Dianjing County, Shanxi Province[J]. Journal of Remote Sensing, 2002, 6(1): 70 - 74. (in Chinese)
- [83] 张超, 王纪华, 赵春江, 等. 利用多时相遥感影像监测季节性裸露农田[J]. 农业工程学报, 2005, 21(11): 90 - 94.
ZHANG Chao, WANG Jihua, ZHAO Chunjiang, et al. Monitoring the Beijing naked cropland in winter and spring with multi-temporal remotely sensed images[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(11): 90 - 94. (in Chinese)
- [84] 黄秋燕, 肖鹏峰, 冯学智, 等. 一种基于 TV - Gabor 模型的高分辨率遥感影像农田信息提取方法[J]. 遥感信息, 2014, 29(2): 77 - 82.
HUANG Qiuyan, XIAO Pengfeng, FENG Xuezhi, et al. A method of farmland information extraction based on TV - Gabor model for high resolution remote sensing image[J]. Remote Sensing Information, 2014, 29(2): 77 - 82. (in Chinese)
- [85] 陈杰, 陈铁桥, 梅小明, 等. 基于最优尺度选择的高分辨率遥感影像丘陵农田提取[J]. 农业工程学报, 2014, 30(5): 99 - 107.
CHEN Jie, CHEN Tiejiao, MEI Xiaoming, et al. Hilly farmland extraction from high resolution remote sensing imagery based on optimal scale selection[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(5): 99 - 107. (in Chinese)
- [86] 江东, 丁方宇, 郝蒙蒙, 等. 农田遥感识别方法与应用[J]. 甘肃科学学报, 2017, 29(2): 43 - 47.
JIANG Dong, DING Fangyu, HAO Mengmeng, et al. Remote sensing identification method and application of farmland[J]. Journal of Gansu Sciences, 2017, 29(2): 43 - 47. (in Chinese)
- [87] 王洪, 刘伟铭. 深度信任支持向量回归的耕地面积预测方法[J]. 郑州大学学报(理学版), 2016, 48(1): 121 - 126.
WANG Hong, LIU Weiming. Cultivated area prediction method based on deep trust support vector regression[J]. Journal of Zhengzhou University(Natural Science Edition), 2016, 48(1): 121 - 126. (in Chinese)
- [88] 鲁恒, 付萧, 贺一楠, 等. 基于迁移学习的无人机影像耕地信息提取方法[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(12): 274 - 279. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20151237&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.12.037.
LU Heng, FU Xiao, HE Yinan, et al. Cultivated land information extraction from high resolution UAV images based on transfer learning[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(12): 274 - 279. (in Chinese)
- [89] 王利军, 郭燕, 贺佳, 等. 基于决策树和 SVM 的 Sentinel - 2A 影像作物提取方法[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(9): 146 - 153. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180917&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.09.017.
WANG Lijun, GUO Yan, HE Jia, et al. Classification method by fusion of decision tree and SVM based on Sentinel - 2A image[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(9): 146 - 153. (in Chinese)
- [90] 郭东锋, 闫宁, 胡海洲, 等. 基于机器学习算法的烤烟香型分类研究[J]. 江西农业学报, 2016, 28(2): 43 - 48.
GUO Dongfeng, YAN Ning, HU Haizhou, et al. Classification of flue-cured tobacco flavor based on machine learning algorithm [J]. Journal of Jiangxi Agricultural University, 2016, 28(2): 43 - 48. (in Chinese)
- [91] 闫利, 江维薇. 多光谱遥感影像植被覆盖分类研究进展[J]. 国土资源遥感, 2016, 28(2): 8 - 13.
YAN Li, JIANG Weiwei. Progress in vegetation coverage classification of multispectral remote sensing images[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2016, 28(2): 8 - 13. (in Chinese)
- [92] 赵旦, 张森, 于名召, 等. 汶川地震灾后农田和森林植被恢复遥感监测[J]. 遥感学报, 2014, 18(4): 958 - 970.
ZHAO Dan, ZHANG Miao, YU Mingzhao, et al. Remote sensing monitoring of farmland and forest vegetation restoration after Wenchuan earthquake[J]. Journal of Remote Sensing, 2014, 18(4): 958 - 970. (in Chinese)
- [93] 刘旭升. 基于人工神经网络的森林植被遥感分类研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2004.
LIU Xusheng. Remote sensing classification of forest vegetation based on artificial neural network [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2004. (in Chinese)
- [94] 吴宗胜, 傅卫平, 韩改宁. 基于深度卷积神经网络的道路场景理解[J]. 计算机工程与应用, 2017, 53(22): 8 - 15.
WU Zongsheng, FU Weiping, HAN Gaining. Road scene understanding based on deep convolutional neural network[J]. Computer Engineering and Applications, 2017, 53(22): 8 - 15. (in Chinese)
- [95] 乔贤哲, 张超, 杨建宇, 等. 高分辨率遥感影像中农田灌溉设施的提取[J]. 测绘通报, 2012(增刊1): 372 - 374.
QIAO Xianzhe, ZHANG Chao, YANG Jianyu, et al. Extraction of farmland irrigation facilities in high resolution remote sensing imagery[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2012(Supp. 1): 372 - 374. (in Chinese)
- [96] 段新成. 基于 BP 人工神经网络的土地利用分类遥感研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2008.
DUAN Xincheng. Remote sensing of land use classification based on BP artificial neural network [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2008. (in Chinese)

- [97] 陈睿敏, 孙胜利. 基于深度学习的红外遥感信息自动提取[J]. 红外, 2017, 38(8): 37-43.
CHEN Ruimin, SUN Shengli. Automatic extraction of infrared remote sensing information based on deep learning[J]. Infrared, 2017, 38(8): 37-43. (in Chinese)
- [98] MURTHY C S, RAJUPV, BADRINATH K V S. Classification of wheat crop with multi-temporal images: performance of maximum likelihood and artificial neural networks[J]. International Journal of Remote Sensing, 2003, 24(23): 4871-4890.
- [99] 蓝晓丹. 面向对象的 SPOT5 遥感影像多分类器森林分类研究[D]. 南宁: 广西大学, 2010.
LAN Xiaodan. Multiple classifier combination forest classification of SPOT5 remote sensing image based on object-oriented approach[D]. Nanning: Guangxi University, 2010. (in Chinese)
- [100] 白穆, 刘慧平, 乔瑜, 等. 高分辨率遥感影像分类方法在 LUCC 中的研究进展[J]. 国土资源遥感, 2010(1): 19-23.
BAI Mu, LIU Huiping, QIAO Yu, et al. Research progress of high resolution remote sensing image classification method in LUCC[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2010(1): 19-23. (in Chinese)
- [101] 陈秋晓, 骆剑承, 周成虎, 等. 基于多特征的遥感影像分类方法[J]. 遥感学报, 2004, 8(3): 239-245.
CHEN Qiuxiao, LUO Jiancheng, ZHOU Chenghu, et al. Classification of remotely sensed imagery using multi-features based approach[J]. Journal of Remote Sensing, 2004, 8(3): 239-245. (in Chinese)
- [102] 吕雅慧, 郎文聚, 张超, 等. 基于 TOPSIS 和 BP 神经网络的高标准农田综合识别[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(3): 196-204. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180324&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.03.024.
LÜ Yahui, YUN Wenju, ZHANG Chao, et al. Multi-characteristic comprehensive recognition of well-facilitated farmland based on TOPSIS and BP neural network[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(3): 196-204. (in Chinese)
- [103] 张超, 乔敏, 刘哲, 等. 基于时序光谱和高分纹理分析的制种玉米田遥感识别[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(5): 218-225. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180525&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.05.025.
ZHANG Chao, QIAO Min, LIU Zhe, et al. Seed maize field identification based on analysis of remote sensing timing spectrum and high resolution texture[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5): 218-225. (in Chinese)
- [104] YUFENG G E, THOMASSON J A, SUI R. Remote sensing of soil properties in precision agriculture: a review[J]. Frontiers of Earth Science, 2011, 5(3): 229-238.
- [105] 李建龙, 蒋平, 刘培君, 等. 利用遥感光谱法进行农田土壤水分遥感动态监测[J]. 生态学报, 2003, 23(8): 40-46.
LI Jianlong, JIANG Ping, LIU Peijun, et al. The study on dynamic monitoring soil water contents using remote sensing optical method[J]. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(8): 40-46. (in Chinese)
- [106] 郑兴明, 赵凯, 李晓峰, 等. 利用微波遥感土壤水分产品监测东北地区春涝范围和程度[J]. 地理科学, 2015, 35(3): 334-339.
ZHENG Xingming, ZHAO Kai, LI Xiaofeng, et al. Monitoring the range and degree of springing in Northeast China by using microwave remote sensing soil moisture products[J]. Scientia Geographica Sinica, 2015, 35(3): 334-339. (in Chinese)
- [107] 谭建灿, 毛克彪, 左志远, 等. 基于卷积神经网络和 AMSR2 微波遥感的土壤水分反演研究[J]. 高技术通讯, 2018(5): 399-408.
TAN Jiancan, MAO Kebiao, ZUO Zhiyuan, et al. Research on soil moisture inversion based on convolutional neural network and AMSR2 microwave remote sensing[J]. High Technology Letters, 2018(5): 399-408. (in Chinese)
- [108] 孙丽, 王飞, 李保国, 等. 基于多源数据的武陵山区干旱监测研究[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(1): 246-252. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140138&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.01.038.
SUN Li, WANG Fei, LI Baoguo, et al. Study on drought monitoring of Wuling Mountain Area based on multi-source data[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(1): 246-252. (in Chinese)
- [109] 黄婷. 基于支持向量机的土壤基础肥力评价和土壤有机质含量预测研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2015.
HUANG Ting. Soil basic fertility evaluation and prediction of soil organic matter content based on support vector machine [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- [110] 陈煦. 基于光谱分析的农田土壤养分测定方法研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.
CHEN Xu. Study on soil nutrient determination method based on spectral analysis[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2015. (in Chinese)
- [111] 潘瑜春, 王纪华, 陆安祥, 等. 基于小麦长势遥感监测的土壤氮素累积估测研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(9): 58-63.
PAN Yuchun, WANG Jihua, LU Anxiang, et al. Estimation of soil nitrogen accumulation based on remotely-sensed monitoring of winter-wheat growth status[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(9): 58-63. (in Chinese)
- [112] 刘焕军, 张新乐, 郑树峰, 等. 黑土有机质含量野外高光谱预测模型[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(12): 3355-3358.
LIU Huanjun, ZHANG Xinle, ZHENG Shufeng, et al. Field hyperspectral prediction model for organic matter content in black soil[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2010, 30(12): 3355-3358. (in Chinese)
- [113] 蒙继华, 程志强, 王小明. WOFOST 模型与遥感数据同化的土壤速效养分反演[J]. 遥感学报, 2018, 22(4): 546-558.
MENG Jihua, CHENG Zhiqiang, WANG Yiming. Simulating soil available nutrients by a new method based on WOFOST model and remote sensing assimilation[J]. Journal of Remote Sensing, 2018, 22(4): 546-558. (in Chinese)
- [114] 张素铭, 赵庚星, 王卓然, 等. 滨海盐渍区土壤盐分遥感反演及动态监测[J]. 农业资源与环境学报, 2018, 35(4): 349-358.
ZHANG Suming, ZHAO Gengxing, WANG Zhuoran, et al. Remote sensing inversion and dynamic monitoring of soil salt in coastal saline area[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2018, 35(4): 349-358. (in Chinese)

- [115] 王爽,丁建丽,王璐,等.基于地表光谱建模的区域土壤盐渍化遥感监测研究[J].干旱区地理,2016,39(1):190-198.
WANG Shuang, DING Jianli, WANG Lu, et al. Remote sensing monitoring of soil salinization based on surface spectral modeling[J]. Arid Land Geography, 2016, 39(1):190-198. (in Chinese)
- [116] 彭杰,刘焕军,史舟,等.盐渍化土壤光谱特征的区域异质性及盐分反演[J].农业工程学报,2014,30(17):167-174.
PENG Jie, LIU Huanjun, SHI Zhou, et al. Regional heterogeneity of hyperspectral characteristics of salt-affected soil and salinity inversion[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(17):167-174. (in Chinese)
- [117] 安德玉,邢前国,赵庚星.基于HICO波段的滨海土壤盐分遥感反演研究[J].海洋学报,2018,40(6):51-59.
AN Deyu, XING Qianguo, ZHAO Gengxing. Hyperspectral remote sensing of soil salinity for coastal saline soil in the Yellow River Delta based on HICO bands [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2018, 40(6):51-59. (in Chinese)
- [118] 冯雪力,刘全明.基于多源遥感协同反演的区域性土壤盐渍化监测[J/OL].农业机械学报,2018,49(7):127-133.
http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180716&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.07.016.
FENG Xueli, LIU Quanming. Regional soil salinity monitoring based on multi-source collaborative remote sensing data [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(7):127-133. (in Chinese)
- [119] 张静静,周卫红,邹萌萌,等.高光谱遥感监测大面积土壤重金属污染的研究现状、原理及展望[J].江苏农业科学,2018,46(12):9-13.
ZHANG Jingjing, ZHOU Weihong, ZOU Mengmeng, et al. Research status, principles and development trend of hyperspectral remote sensing for monitoring heavy metal pollution in large-area soils[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2018, 46(12):9-13. (in Chinese)
- [120] KUANG S A, TIAN S F, CHENG B. Remote sensing monitoring of land desertification in the agriculture and graziery mixed area[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2002, 14(2):10-14.
- [121] 王雪璐.青藏高原三江源高寒草地生态系统土壤侵蚀研究[D].兰州:兰州大学,2016.
WANG Xuelu. Soil erosion of alpine grassland ecosystem in Sanjiangyuan, Qinghai-Tibet Plateau [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2016. (in Chinese)
- [122] 牛忠恩,闫慧敏,黄玫,等.基于MODIS-OLI遥感数据融合技术的农田生产力估算[J].自然资源学报,2016,31(5):875-885.
NIU Zhongen, YAN Huimin, HUANG Mei, et al. Agricultural productivity estimation with MODIS-OLI fusion data[J]. Journal of Natural Resources, 2016, 31(5):875-885. (in Chinese)
- [123] 肖武,陈佳乐,笄宏志,等.基于无人机影像的采煤沉陷区玉米生物量反演与分析[J/OL].农业机械学报,2018,49(8):169-180.
http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180820&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.08.020.
XIAO Wu, CHEN Jiale, YAN Hongzhi, et al. Inversion and analysis of maize biomass in coal mining subsidence area based on UAV images [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(8):169-180. (in Chinese)
- [124] 马佳妮,张超,吕雅慧,等.多源遥感数据支撑的耕地质量监测与评价[J].中国农业信息,2018,30(3):14-22.
MA Jiani, ZHANG Chao, LÜ Yahui, et al. Monitoring and evaluation of cultivated land quality supported by multi-source remote sensing[J]. China Agricultural Informatics, 2018, 30(3):14-22. (in Chinese)
- [125] 毕如田,白中科.基于遥感影像的露天煤矿区土地特征信息及分类研究[J].农业工程学报,2007,23(2):77-82.
BI Rutian, BAI Zhongke. Land characteristic information and classification in opencast coal mine based on remote sensing images[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(2):77-82. (in Chinese)
- [126] 张超,李智晓,李鹏山,等.基于高分辨率遥感影像分类的城镇土地利用规划监测[J/OL].农业机械学报,2015,46(11):323-329.
http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20151144&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.11.044.
ZHANG Chao, LI Zhixiao, LI Pengshan, et al. Urban rural land use plan monitoring based on high spatial resolution remote sensing imagery classification [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(11):323-329. (in Chinese)
- [127] 朱永森,曾永年,张猛.基于HJ卫星数据与面向对象分类的土地利用/覆盖信息提取[J].农业工程学报,2017,33(14):258-265.
ZHU Yongsen, ZENG Yongnian, ZHANG Meng. Extract of land use/cover information based on HJ satellites data and object-oriented classification [J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(14):258-265. (in Chinese)
- [128] 孙中平,白金婷,史园莉,等.基于高分影像的面向对象土地利用变化检测方法研究[J/OL].农业机械学报,2015,46(增刊):297-303.
http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2015S047&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.S0.047.
SUN Zhongping, BAI Jinting, SHI Yuanli, et al. Object-oriented detection of land use changes based on high spatial resolution remote sensing image [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(Suppl.):297-303. (in Chinese)
- [129] 杜子涛,杨小明,颜树强,等.奈曼旗土地退化遥感监测研究[J].农业工程学报,2012,28(3):154-161.
DU Zitao, YANG Xiaoming, YAN Shuqiang, et al. Study on land degradation monitoring in Naiman county using remote sensing [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(3):154-161. (in Chinese)
- [130] 薛剑,郟文聚,杜国明,等.基于遥感的现代与传统农业区域土地利用格局差异分析[J].农业工程学报,2012,28(24):245-251.
XUE Jian, YUN Wenju, DU Guoming, et al. Difference analysis of land use patterns in modern and traditional agricultural region based on remote sensing [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(24):245-251. (in Chinese)
- [131] YAO X, ZHU D, YE S, et al. A field survey system for land consolidation based on 3S and speech recognition technology [J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2016, 127:659-668.

- [132] 南锋, 朱洪芬, 毕如田. 黄土高原煤矿区复垦农田土壤有机质含量的高光谱预测[J]. 中国农业科学, 2016, 49(11): 2126-2135.
NAN Feng, ZHU Hongfen, BI Rutian. Hyperspectral prediction of soil organic matter content in the reclamation cropland of coal mining areas in the Loess Plateau[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(11): 2126-2135. (in Chinese)
- [133] 郭旭东, 苏亚丽, 吴长江, 等. 耕地暴雨灾情动态信息的遥感提取[J]. 地理空间信息, 2018, 16(3): 57-60.
GUO Xudong, SU Yali, WU Changjiang, et al. Remote sensing extraction for dynamic information of farmland storms[J]. Geospatial Information, 2018, 16(3): 57-60. (in Chinese)
- [134] 贾文涛, 刘昊博, 陈正. 土地整治综合监管技术体系研究[C]//中国土地学会年会, 杭州, 2013.
JIA Wentao, LIU Haobo, CHEN Zheng. Research on comprehensive supervision technology system for land remediation [C] // Annual Meeting of China Land Society, Hangzhou, 2013. (in Chinese)
- [135] 陈元鹏, 周旭. 浅议遥感技术在土地复垦监测中的应用[J]. 中国土地, 2017(7): 35-37.
CHEN Yuanpeng, ZHOU Xu. Discussion on the application of remote sensing technology in land reclamation monitoring[J]. China Land, 2017(7): 35-37. (in Chinese)
- [136] HALOUNOVÁ L. Reclamation areas and their development studied by vegetation indices[J]. International Journal of Digital Earth, 2008, 1(1): 155-164.
- [137] EL-KAWY O R A, RØD J K, ISMAIL H A, et al. Land use and land cover change detection in the western Nile delta of Egypt using remote sensing data[J]. Applied Geography, 2011, 31(2): 483-494.
- [138] ERENER A. Remote sensing of vegetation health for reclaimed areas of Seyitömer open cast coal mine[J]. International Journal of Coal Geology, 2011, 86(1): 20-26.
- [139] SEN S, ZIPPER C E, WYNNE R H, et al. Identifying revegetated mines as disturbance/recovery trajectories using an interannual landsat chronosequence[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2015, 78(3): 223-235.
- [140] CHASMER L, BAKER T, CAREY S K, et al. Monitoring ecosystem reclamation recovery using optical remote sensing: Comparison with field measurements and eddy covariance[J]. Brain Dev, 2018(642): 436-446.
- [141] EVELYNE T, KARA W, BENOIT L, et al. Biophysical indicators based on spatial hierarchy for informing land reclamation: the case of the Lower Athabasca River (Alberta, Canada) [J]. Ecological Indicators, 2016(72): 173-184.
- [142] 苏伟, 孙中平, 李道亮, 等. 基于多时相 Landsat 遥感影像的海州露天煤矿排土场植被时空特征分析[J]. 生态学报, 2008, 29(11): 5860-5868.
SU Wei, SUN Zhongping, LI Daoliang, et al. Monitoring of temporal and spatial change of vegetation in waste dump of Haizhou opencast coal mine area using multi-temporal Landsat remote [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 29(11): 5860-5868. (in Chinese)
- [143] 黄元仿, 张世文, 张立平, 等. 露天煤矿土地复垦生物多样性保护与恢复研究进展[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(8): 72-82. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150812&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.08.012.
HUANG Yuanfang, ZHANG Shiwen, ZHANG Liping, et al. Research progress on conservation and restoration of biodiversity in land reclamation of opencast coal mine[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(8): 72-82. (in Chinese)
- [144] 张耀, 周伟. 利用多时相遥感影像动态监测矿区植被覆盖变化——以山西省平朔露天煤矿为例[J]. 西北林学院学报, 2016, 31(4): 206-212.
ZHANG Yao, ZHOU Wei. Dynamic monitoring of vegetation cover change in mining areas using multi-temporal remote sensing images: a case study of Pingyu Open-pit Coal Mine in Shanxi Province[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2016, 31(4): 206-212. (in Chinese)
- [145] 寇晓蓉, 白中科, 杜振州, 等. 黄土区大型露天煤矿企业土地复垦质量控制研究[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(5): 957-965.
KOU Xiaorong, BAI Zhongke, DU Zhenzhou, et al. Land reclamation quality completion standards for large opencast coal mine enterprises in Loess areas[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2017, 36(5): 957-965. (in Chinese)
- [146] TAN Kun, YE Yuanyuan, DU Peijun, et al. Estimation of heavy metal concentrations in reclaimed mining soils using reflectance spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014, 34(12): 3317-3322.
- [147] 张秋霞, 张合兵, 刘文锴, 等. 高标准基本农田建设区域土壤重金属含量的高光谱反演[J]. 农业工程学报, 2017, 33(12): 230-239.
ZHANG Qiuxia, ZHANG Hebing, LIU Wenkai, et al. Inversion of heavy metals content with hyperspectral reflectance in soil of well-facilitated capital farmland construction areas[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(12): 230-239. (in Chinese)
- [148] 安志宏, 程玉书, 汪宝存, 等. 辽源市矿山地质环境恢复治理遥感监测与整治模式一体化研究[J]. 地质力学学报, 2017, 23(4): 631-637.
AN Zhihong, CHENG Yushu, WANG Baocun, et al. A study on the integration of remote sensing monitoring and regulation model in restoration and treatment of mine geological environment in Liaoyuan[J]. Journal of Geomechanics, 2017, 23(4): 631-637. (in Chinese)
- [149] 叶宝莹, 白中科, 包妮沙. 矿区土地复垦遥感动态监测体系构建[C]//纪念中国农业工程学会成立30周年暨中国农业工程学会2009年学术年会, 晋中, 2009.
YE Baoying, BAI Zhongke, BAO Nisha. Construction of remote sensing dynamic monitoring system for land reclamation in mining area [C] // Commemorating the 30th Anniversary of China Agricultural Engineering Society and the 2009 Annual Conference of China Agricultural Engineering Society, Jinzhong, 2009. (in Chinese)
- [150] 于凤荣, 杜国明, 薛剑, 等. 黑龙江省垦区大豆和玉米重茬遥感监测研究——以友谊农场为例[J]. 农业现代化研究, 2013, 34(2): 248-252.
YU Fengrong, DU Guoming, XUE Jian, et al. A remote sensing monitoring research on continuous and alternate cropping of soybeans and corn in Heilongjiang Reclamation Region with friendship farm as an example[J]. Research of Agricultural

- Modernization, 2013, 34(2): 248 - 252. (in Chinese)
- [151] 吴年新. 遥感技术在盐碱地整治规划中的应用[J]. 城市地理, 2015(14):258.
WU Nianxin. Application of remote sensing technology in salt and alkali land remediation planning[J]. City Geography, 2015(14):258. (in Chinese)
- [152] 厉彦玲, 赵庚星, 常春艳, 等. OLI 与 HSI 影像融合的土壤盐分反演模型[J]. 农业工程学报, 2017, 33(21):173 - 180.
LI Yanling, ZHAO Gengxing, CHANG Chunyan, et al. Soil salinity retrieval model based on OLI and HSI image fusion[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(21):173 - 180. (in Chinese)
- [153] 侯大伟, 刘艳, 孙华. 退耕还林背景下寒地山区土地生态安全格局动态变化[J]. 农业工程学报, 2017, 33(18): 267 - 276.
HOU Dawei, LIU Yan, SUN Hua. Analysis on dynamic change of ecological security pattern of land in cold mountainous region under background of grain for green project[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(18):267 - 276. (in Chinese)
- [154] 海文静, 刘学录, 任君. 土地整治中新增耕地认定及有效耕地面积测算[J]. 云南农业大学学报(自然科学版), 2018, 33(3):539 - 546.
HAI Wenjing, LIU Xuelu, REN Jun. Identification of newly cultivated land and estimation of effective cultivated land area in land remediation[J]. Journal of Yunnan Agricultural University(Natural Science), 2018,33(3):539 - 546. (in Chinese)
- [155] BENZA M, WEEKS J R, STOW D A, et al. A pattern-based definition of urban context using remote sensing and GIS[J]. Remote Sensing of Environment, 2016, 183:250 - 264.
- [156] 邹亚锋, 吕昌河, 白臻昊, 等. 不同整治模式下的农村居民点整治潜力测算[J]. 国土资源遥感, 2016, 28(4):191 - 196.
ZOU Yafeng, LÜ Changhe, BAI Zhenhao, et al. Calculation of land consolidation potential of rural residential land on different models of land consolidation[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2016, 28(4): 191 - 196. (in Chinese)
- [157] 屠爽爽, 龙花楼, 刘永强, 等. 农村居民点整治潜力测算方法研究进展与展望[J]. 自然资源学报, 2015, 30(11): 1956 - 1968.
TU Shuangshuang, LONG Hualou, LIU Yongqiang, et al. Research progress and prospects of rural residential remediation potential measurement methods[J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(11): 1956 - 1968. (in Chinese)
- [158] 宋伟, 陈百明, 姜广辉. 中国农村居民点整理潜力研究综述[J]. 经济地理, 2010, 30(11):1871 - 1877.
SONG Wei, CHEN Baiming, JIANG Guanghui. A review of the research on the potential of rural settlements in China [J]. Economic Geography, 2010, 30(11): 1871 - 1877. (in Chinese)
- [159] 朱晓华, 陈秧分, 刘彦随, 等. 空心村土地整治潜力调查与评价技术方法——以山东省禹城市为例[J]. 地理学报, 2010, 65(6):736 - 744.
ZHU Xiaohua, CHEN Yangfen, LIU Yansui, et al. Technique and method of rural land consolidation potential investigation and assessment: a case study of Yucheng City, Shandong Province[J]. Acta Geographica Sinica, 2010, 65(6): 736 - 744. (in Chinese)
- [160] YAN J, XIA F, BAO H X H. Strategic planning framework for land consolidation in China: a top-level design based on SWOT analysis[J]. Habitat International, 2015, 48:46 - 54.
- [161] 姚维岭, 荆青青, 周英杰, 等. 基于遥感动态监测的山东省矿山地质环境恢复治理典型模式分析[J]. 矿产勘查, 2015, 6(5):627 - 634.
YAO Weiling, JING Qingqing, ZHOU Yingjie, et al. Analysis on typical pattern of mine geological environment restoration and governance based on remote sensing dynamic monitoring in Shandong [J]. Mineral Exploration, 2015, 6(5): 627 - 634. (in Chinese)
- [162] WU K, SHAN L, JING W, et al. Developing a planning model for the construction of ecological corridors for low-carbon ecological cities: a case study of the Shenzhen International Low-Carbon City[J]. Adv. Mater. Res., 2013, 841: 2823 - 2829.
- [163] CHENG L, XIA N, JIANG P, et al. Analysis of farmland fragmentation in China Modernization Demonstration Zone since "reform and openness": a case study of South Jiangsu Province[J]. Sci. Rep., 2015, 5:11797.
- [164] 徐秀云, 陈向, 刘宝梅. 微型无人机助力土地整治项目监管[J]. 测绘通报, 2017(3):86 - 90.
XU Xiuyun, CHEN Xiang, LIU Baomei. Supervision of land renovation project by micro-UAV[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2017(3):86 - 90. (in Chinese)
- [165] 马能, 黄义忠, 尹红梅. 基于遥感与地理信息系统的石漠化发育区土地整治适宜性评价[J]. 浙江农业科学, 2018, 59(8):1464 - 1468.
MA Neng, HUANG Yizhong, YIN Hongmei. Suitability evaluation of land rehabilitation in rocky desertification development area based on remote sensing and geographic information system[J]. Zhejiang Agricultural Sciences, 2018,59(8):1464 - 1468. (in Chinese)
- [166] 常青, 刘丹, 刘晓文. 矿业城市土地损毁生态风险评价与空间防范策略[J]. 农业工程学报, 2013, 29(20):245 - 254.
CHANG Qing, LIU Dan, LIU Xiaowen. Ecological risk assessment and spatial prevention tactic of land destruction in mining city[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(20):245 - 254. (in Chinese)
- [167] 冯秀丽, 王珂, 施拥军, 等. 基于遥感的土地整理研究[J]. 科技通报, 2006, 22(2):258 - 262.
FENG Xiuli, WANG Ke, SHI Yongjun, et al. Land consolidation study based on RS [J]. Bulletin of Science and Technology, 2006, 22(2): 258 - 262. (in Chinese)
- [168] 张超, 蒋一军, 罗明, 等. 土地整理遥感监测系统的设计与实现[J]. 地理信息世界, 2009, 7(2):72 - 77.
ZHANG Chao, JIANG Yijun, LUO Ming, et al. Design and development of land consolidation remote sensing monitoring system [J]. Geomatics World, 2009, 7(2): 72 - 77. (in Chinese)
- [169] 李少帅, 鄢文聚, 曹文静, 等. 基于田块尺度的高标准农田建设空间形态判别研究[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(7):112 - 118. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180714&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.07.014.
LI Shaoshuai, YUN Wenju, CAO Wenjing, et al. Spatial morphology identification of well-facilitated farmland construction

- based on patch scale[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(7):112-118. (in Chinese)
- [170] LENNEY M P, WOODCOCK C E, COLLINS J B, et al. The status of agricultural lands in Egypt: the use of multi temporal NDVI features derived from Landsat TM[J]. Remote Sensing Environment, 1996(56): 8-20.
- [171] 韩文霆, 张立元, 张海鑫, 等. 基于无人机遥感与面向对象法的田间渠系分布信息提取[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(3): 205-214. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170326&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.03.026.
- HAN Wenting, ZHANG Liyuan, ZHANG Haixin, et al. Extraction method of sublateral canal distribution information based on UAV remote sensing[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017,48(3):205-214. (in Chinese)
- [172] 张超, 王志浩, 杨建宇, 等. 基于Canny算子的农田线状工程地物自动提取方法[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(2): 270-275. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150239&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.02.039.
- ZHANG Chao, WANG Zhihao, YANG Jianyu, et al. Farmland linear project feature auto-extraction method based on Canny algorithm[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(2):270-275. (in Chinese)
- [173] 顾呈剑. 无人机航测技术辅助土地整治项目规划设计和监管研究[D]. 南昌:江西财经大学, 2016.
- GU Chengjian. Planning, design and supervision of UAV aerial survey technology aided land remediation project[D]. Nanchang:Jiangxi University of Finance and Economics, 2016. (in Chinese)
- [174] DENG X, HUANG J, ROZELLE S, et al. Cultivated land conversion and potential agricultural productivity in China[J]. Land-use Policy, 2006, 23(4): 372-384.
- [175] GAO X, WU K N, CHEN X Z, et al. Feasible potential of cultivated land quality promoted by land consolidation project[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(16): 233-240.
- [176] LUO M F, ZHAO C W. Comparison of the cultivated land quality before and after the land consolidation: a case study of Guanling Autonomous County[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2013, 34(6): 127-131.
- [177] SONG W, LIU M L. Farmland conversion decreases regional and national land quality in China[J]. Land Degrad. Dev., 2016, 28(2): 459-471.
- [178] 洪长桥, 金晓斌, 陈昌春, 等. 基于多源遥感数据融合的土地整治区产能动态监测:方法与案例[J]. 地理研究, 2017, 36(9):1787-1800.
- HONG Changqiao, JIN Xiaobin, CHEN Changchun, et al. Dynamically monitoring productivity of cultivated land enrolled in land consolidation programs based on fusing multi-source remote sensing data: methodology and a case study[J]. Geographical Research, 2017, 36(9): 1787-1800. (in Chinese)
- [179] LOBELL D B. The use of satellite data for crop yield gap analysis[J]. Field Crops Res., 2013, 143(SI): 56-64.
- [180] JIN X, SHAO Y, ZHANG Z, et al. The evaluation of land consolidation policy in improving agricultural productivity in China[J]. Scientific Reports, 2017, 7(1):2792.
- [181] DU X, ZHANG X, JIN X. Assessing the effectiveness of land consolidation for improving agricultural productivity in China[J]. Land Use Policy the International Journal Covering All Aspects of Land Use, 2018, 70:360-367.
- [182] 张兵, 崔希民, 赵彦博, 等. 基于High-1卫星影像的土地整治遥感监测方法研究与实践[J]. 农业工程学报, 2015, 31(20):225-233.
- ZHANG Bing, CUI Ximin, ZHAO Yanbo, et al. Method and application of remote sensing monitoring in land consolidation based on High-1 satellite image[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(20):225-233. (in Chinese)
- [183] 张超, 刘佳佳, 陈英义, 等. 土地整治区田块空间形态变化遥感监测与评价[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(1): 104-111. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170114&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.01.014.
- ZHANG Chao, LIU Jiajia, CHEN Yingyi, et al. Remote sensing monitor and evaluation on patch morphology changing in land consolidation areas[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(1):104-111. (in Chinese)
- [184] 吕雅慧, 张超, 郎文聚, 等. 高分辨率遥感影像农田林网自动识别[J/OL]. 农业机械学报, 2018,49(1):157-163. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180120&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.01.020.
- LÜ Yahui, ZHANG Chao, YUN Wenju, et al. Automatic recognition of farmland shelterbelts in high spatial resolution remote sensing data[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(1):157-163. (in Chinese)
- [185] 韩己文, 刘忠, 于学谦, 等. 沙化土地整治背景下的沙漠化监测预警[J]. 农业工程学报, 2017, 33(10):271-277.
- HAN Yiwen, LIU Zhong, YU Xueqian, et al. Desertification monitoring and early warning under the background of desertification land improvement[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(10):271-277. (in Chinese)
- [186] 张寅玲, 白中科, 陈晓辉, 等. 基于遥感技术的露天矿区土地复垦效益评价[J]. 中国矿业, 2014(6):71-75.
- ZHANG Yuling, BAI Zhongke, CHEN Xiaohui, et al. Benefit evaluation of land reclamation in open-pit mining area based on remote sensing technology[J]. China Mining Magazine, 2014(6): 71-75. (in Chinese)