

DOI: 10.5846/stxb201905301135

陈元鹏, 任佳, 王力. 基于多源遥感数据的生态保护修复项目区监测方法评述. 生态学报, 2019, 39(23): 8789-8797.

Chen Y P, Ren J, Wang L. Review on monitoring method of ecological conservation and restoration project area based on multi-source remote sensing data. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(23): 8789-8797.

基于多源遥感数据的生态保护修复项目区监测方法评述

陈元鹏¹, 任佳^{1,*}, 王力²

1 自然资源部国土整治中心, 北京 100035

2 中国科学院遥感与数字地球研究所, 北京 100094

摘要:回顾了山水林田湖草生态保护修复项目的实施背景, 针对生态保护修复项目监测监管范围广、技术难等问题, 强调了基于多源遥感数据开展项目遥感监测的重要性与必要性。从监测指标拟定、遥感地物信息提取、多源遥感数据融合、动态变化检测等方面评述了基于多源遥感数据的生态保护修复项目区监测方法, 包括基于中高空间分辨率遥感数据的地物信息提取、融合机器学习非线性混合像元分析、基于混合像元分析的时空融合等。在总结技术和工作推进方面的优势、局限基础上, 提出要结合实际工作, 持续优化国土空间生态保护修复监测指标; 充分挖掘遥感数据解析的相关算法潜力, 提升地物信息提取和混合像元分析的精度; 加强时空融合算法与变化检测方法的研究探索, 加强相关方法的实践应用; 以“山水林田湖草生态保护修复工程试点”项目为平台, 建立稳定的国土空间生态保护修复遥感监测运行机制, 加强科技创新, 形成技术标准, 指导工作开展。

关键词:生态保护修复项目; 多源遥感数据; 地物信息提取; 时空融合; 变化检测

Review on monitoring method of ecological conservation and restoration project area based on multi-source remote sensing data

CHEN Yuanpeng¹, REN Jia^{1,*}, WANG Li²

1 Land Consolidation and Rehabilitation Center, Ministry of Natural Resources, Beijing 100035, China

2 The State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China

Abstract: This paper briefly reviewed the implementation background of ecological protection and restoration project of mountains-rivers-forests-farmlands-lakes-grasslands. In view of the wide range of monitoring and technical difficulties of ecological protection and restoration projects, the importance and necessity of remote sensing monitoring based on multi-source remote sensing data were emphasized. This paper summed up the main methods, applications and research progress from aspects of the monitoring index series establishment, remote sensing information extraction, multi-source remote sensing data fusion and dynamic change detection. It covered feature extraction based on sub-meter or meter-level high spatial resolution optical remote sensing data, non-linear mixed pixel analysis based on machine learning, the quantitative inversion of ecological parameters, and the spatio-temporal fusion based on mixed pixel analysis. It is proposed that the monitoring index of ecological protection and restoration of land space should be continuously optimized in combination with the actual work. The algorithm potential of remote sensing data analysis should be fully explored to improve the precision of ground feature information extraction and mixed pixel analysis. The research and exploration of space-time fusion algorithm and change detection method should be improved to strengthen the practical application of the related methods. A stable

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41771207)

收稿日期: 2019-05-30; 修订日期: 2019-09-16

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: renjia@lrcr.org.cn

remote sensing monitoring mechanism for ecological protection and restoration of land space should be established based on the platform of ecological protection and restoration project of mountains-rivers-forests-farmlands-lakes-grasslands. Scientific and technological innovation should be strengthened to form technical standards to guide the related work.

Key Words: ecological conservation and restoration project; multi-source remote sensing data; ground feature information extraction; spatio-temporal fusion; change detection

改革开放 40 年以来,我国经济社会发展取得巨大进步,经济总量跃居世界第二,经济结构实现重大变革,基础产业和基础设施跨越式发展。但与此同时,资源和环境条件的约束边界也在步步逼近^[1],诸多生态环境问题日益显现。党的十八大以来,以习近平同志为核心的党中央高度重视生态文明建设,把生态文明建设纳入统筹推进“五位一体”总体布局和协调推进“四个全面”战略布局的重要内容。为贯彻落实习近平生态文明思想、加强生态文明建设、筑牢生态安全屏障、推进生态保护修复,2016 至 2018 年,财政部、自然资源部、生态环境部三部门联合印发文件,开展“山水林田湖草生态保护修复工程试点”,批准工程试点 25 个。试点通过实施矿山生态修复、土地整治、森林质量提升、流域水环境保护治理、水土流失治理等措施促进生态保护修复。25 个试点工程区域面积总计约 103 万 km²,覆盖范围广、监测监管难。

验证、评估大区域尺度的生态保护修复工作成效,持续跟踪、监测工程试点建设与管护情况,需精准高效识别区域内生态环境问题、获取区域内复杂生态环境信息、监测区域内生态环境系统变化,这迫切需要引入精度高、范围广、时效性强的监测监管技术作为重要支撑手段。遥感技术具有宏观、动态、快速、可重复等特点,是国家重大战略和重大工程实施的有利保障,可有效助力生态环境系统的观测与分析,辅助生态保护修复项目区域内的多目标地物信息提取与变化检测。

在地表空间异质性较强区域,陆地表面的动态变化(如城市建设扩张、森林植被砍伐等活动),往往发生在较小的空间尺度上和较短的时间阶段内。因此,有必要基于高空间和高时间分辨率的卫星遥感数据及时监测小空间尺度上的地表覆被变化情况^[2]。由于遥感卫星自身物理性能的限制,单一卫星遥感数据的空间分辨率和时间分辨率是一对“矛盾体”,存在相互制约关系^[3],目前尚不存在一种卫星传感器能够同时提供高空间分辨率和高时间分辨率的遥感数据,因此利用单一卫星遥感影像数据观测并获取高时空分辨率的地物变化信息存在困难。

生态保护修复项目往往存在范围广、面积大、云雨多等特点(如湖南省湘江流域和洞庭湖生态保护修复项目区总面积 10km²,区域范围内云雨天气较多),并且生态修复工程措施实施时间周期较短,采用单一卫星遥感数据无法满足对其大范围、精细化的某一地物信息或某一生态指标信息的连续时空分布监测^[4]。为此,基于多源遥感数据的生态保护修复项目区监测方法研究至关重要。

1 国内外研究进展

生态保护修复项目的特点为区域广、范围大,区域内土地覆被变化具有一定尺度依赖性^[5-6],同时项目生态效益评价指标复杂多样,诸如此类项目的特殊性决定监测工作需基于卫星遥感数据,结合机器学习与混合像元分析等方法开展多目标地物信息提取;针对多源卫星遥感数据进行尺度转换与时空融合,生成高时空分辨率的时间序列遥感数据与产品;利用长时间序列遥感数据与产品,分析验证项目前期生态环境问题,检测项目实施期土地覆被的动态变化与突变情况^[7-8]。

1.1 地物信息提取

地物信息是生态环境遥感监测的重要指标,随着全球变化研究的深入,地物信息变化研究已成为全球生态环境变化研究的核心内容,生态保护修复项目遥感监测地物信息的提取内容指标主要包括土地覆被/利用类型、生物量、净初级生产力、植被覆盖度等。还包括与生态环境相关的参数类指标,如水土保持、水源涵养等

相关参数指标。

地物信息提取是基于遥感影像的目标识别^[9],机器学习是解决目标识别问题的主要方法之一^[10-11]。许多国内外学者采用机器学习方法开展了土地覆被信息分类及一系列地球生物、物理和化学参数的反演。土地覆被分类方面,Dalponte 等^[12]基于高光谱影像数据,利用支持向量机(Support Vector Machine,SVM)进行森林类型的识别并取得了较好的效果;杨红磊等^[13]利用对数主成分变换的期望最大化算法(Expectation Maximization Algorithm,EM)对土地覆被信息进行了分类处理,分类结果精度优于普通 EM 和传统的 K-means 等非监督分类方法;Rodriguez 等^[14]从训练数据集大小的敏感性以及噪声影响等方面,评价了随机森林(Random Forest,RF)方法在土地覆被分类中的有效性。相关参数信息反演方面,偏最小二乘法、随机森林与人工神经网络等方法广泛应用于地表温度 LST、叶面积指数 LAI、水深与浑浊度等变量的反演,并取得了较高精度^[15-19]。此外,近几年深度学习算法的推广应用,也一定程度上提高了地物识别的精度^[20]。现阶段,机器学习包括深度学习算法已广泛应用于地物信息的提取,过程中各类方法也得以不断完善优化。然而,由于地表的空间异质性,混合像元普遍存在于遥感影像中,一定程度影响地物识别和分类精度^[21]。

1.2 混合像元分解

由于空间分辨率的限制以及地物的复杂多样性,一个像元内往往会包含多种地物类型,称为混合像元。混合像元中不同地物光谱特征互相影响,使得像元与土地覆被类别信息一一对应的硬分类影像不能够有效表现出像元中多端元组合的细节信息。为此,需要对混合像元进行分解,通过混合像元分解生成的丰度图像能够更好保留地表空间结构和土地覆被信息^[22-23]。国内外学者对混合像元分解方法进行了大量研究^[24-27],探索提出了许多线性和非线性混合像元分解模型及其改进优化方法。如多端元混合像元分解(Multiple Endmember Spectral Mixture Analysis,MESMA)方法,该方法利用不同类型和数量的地物端元组合模拟每个像元,有效解决了“同物异谱”问题^[28-30];Ray 等^[31]提出的高次多项式模型及其改进优化模型^[32-33],在线性模型基础上,引入交叉端元来表示多次散射,较好地刻画了复杂场景的多次散射作用,提高了解混精度。基于混合像元分解得到的组分数据,不仅能够在亚像元尺度更好地刻画土地覆被信息,还能够作为自变量参与到遥感尺度转换与时空信息融合中。

1.3 遥感数据高时空融合

生态保护修复项目区普遍范围广、面积大,部分区域兼具多云雨天气,一定程度上导致遥感数据的“时空数据缺失”。为解决遥感数据的“时空矛盾”,遥感时空信息融合技术受到很大的关注^[3]。Malenovsky 等^[34]利用小波融合技术对 MODIS 和 Landsat 影像进行了时空融合,提高了 MODIS 时间序列影像的空间分辨率;Gao 等^[35]和 Zhu 等^[36]提出了时空自适应反射率融合模型(Spatial and temporal adaptive reflectance fusion model,STARFM)及其增强模型(ESTARFM),构建了一个带权重的低空间分辨率像元反射率与高空间分辨率像元反射率的关系模型;Ling 等^[37]提出了时空超分辨率融合方法(Spatial-temporal super-resolution fusion model,STSRFM),基于土地覆被信息进行时空融合。通过时空融合生成的空缺时刻的高分辨率数据,弥补了某些情况下的数据不足,形成时间连续的可用于定量反演的有效遥感数据,为长时间序列的地物信息分析、监测和反演提供了数据保障^[38-39]。

1.4 遥感时间序列影像变化检测

生态保护修复项目工程措施实施周期短,管护周期长,基于遥感时间序列影像开展变化检测有助于项目监测监管。遥感影像变化检测根据不同的变化形式,分为异常信息检测与土地覆被变化检测^[40]。常用的方法包括双时相监测方法,即将土地覆被变化检测作为双时相变化检测问题的扩展^[41],还包括基于时间序列模型的变化检测方法,如 Mithal 等^[42]提出了一种基于子序列分割的变化检测方法,通过拟合一个非参数模型将时间序列分割为多个均匀的子序列,分割的时相位置就是潜在发生变化的时刻;Geng 等^[8]基于 MODIS NDVI 数据,利用 BFAST 算法(Breaks for Additive Season and Trend,BFAST)探索了祁连山地区植被突变的时空特征及其潜在的驱动因素,有效识别出植被断点变化的时间、位置与幅度;Wang 等^[43]利用 BFAST 方法对内蒙古

干旱区的时空分布与变化进行了分析探索,有效识别出了内蒙古东北部地区的干旱趋势。

2 基于多源遥感数据的监测方法要点

基于多源遥感数据的生态保护修复项目监测方法包含以下几方面:参阅文献资料,结合实际工作拟定监测指标与任务;围绕监测指标,基于不同分辨率遥感数据并结合地面监测数据,采用机器学习与混合像元分析等方法,提取地物信息与组分数据,反演与监测指标相关的参数;以多时相、多源遥感影像生成的地物信息为基础,开展多源遥感数据高时空融合,重构时间序列遥感数据产品;基于时间序列遥感数据产品,开展项目区地物信息亚像元级变化检测,实现对项目区生态保护情况、修复措施的识别与评价^[44-46],技术路线如下图 1 所示。

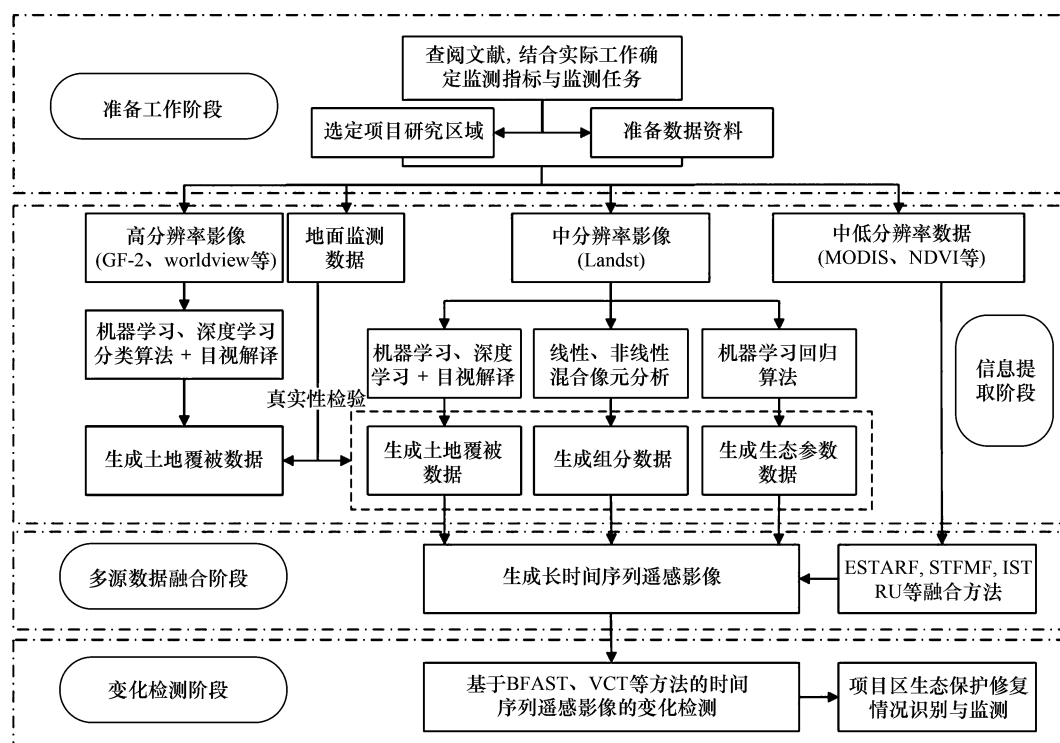


图 1 技术路线图

Fig.1 Technology roadmap

2.1 生态保护修复工程监测指标

生态保护修复工程涉及“山水林田湖草”多个生态要素,其监测指标具有复杂性和多样性的特点,拟定监测指标与任务是工作首要目标。参考相关生态保护修复工程监测评估指标体系^[47],梳理出共性指标类别包括 4 大类:生态系统宏观结构、生态系统质量、生态系统服务、生态系统变化影响因素。具体指标包括一级指标 11 项,二级指标 25 项,其中可用遥感数据直接获取的指标 8 项,采用遥感数据结合地面监测数据可获取的指标 8 项,具体如下表 1。从监测指标可看出,64%的指标要直接或间接依靠遥感数据进行监测,可见遥感技术在生态保护修复工程监测中至关重要。

2.2 基于中高空间分辨率遥感数据的项目区信息提取

基于中高空间分辨率遥感影像的项目区信息提取包括:基于亚米(或米)级高空间分辨率光学遥感数据,通过机器学习、深度学习与目视解译相结合的地物信息提取方法,生成土地覆被数据,对研究区域内生态修复相关信息实现高精度识别;基于中等空间分辨率遥感影像(以 Landsat 系列卫星遥感数据为主),通过线性与非线性混合像元分解方法的比较验证,实现研究区域内地物组分信息的有效提取;基于 Landsat 系列卫星遥感

数据,结合地面实测数据,开展植被覆盖、水源涵养、湖泊水面等监测指标的定量化反演。根据实地调查监测获取的样点信息,结合高空间分辨率遥感数据的解译成果进行真实性检验。中高空间分辨率光学遥感影像信息提取示意结果见图 2,混合像元分解示意结果见图 3。

表 1 生态保护修复工程监测指标
Table 1 The monitoring index series of ecological protection and restoration projects

指标类别 Indicator categories	一级指标 First-level index	二级指标 Second-level index	数据源 Data origin	
生态系统宏观结构 Ecosystem macrostructure	生态系统宏观结构	生态系统分类面积	遥感数据	
		变化率	遥感数据	
		动态度	遥感数据	
生态系统质量 Ecosystem quality	植被状况	植被覆盖度	遥感数据	
		植被生物量	遥感数据、地面监测数据	
		植被净初级生产力(NPP)	遥感数据	
	宏观生态状况	土地覆被状况指数	遥感数据	
		土地覆被转类指数	遥感数据	
	物种多样性	物种丰富度	地面监测数据	
	环境质量	地表水环境质量	地面监测数据、遥感数据	
		土壤环境质量	地面监测数据	
		环境空气质量	地面监测数据、遥感数据	
	生态系统服务 Ecosystem service	水源涵养	水源涵养量	地面监测数据、遥感数据
土壤保持		土壤侵蚀模数	地面监测数据、遥感数据	
		土壤保持量	地面监测数据、遥感数据	
		河流径流含沙量	地面监测数据、遥感数据	
防风固沙		风蚀模数	地面监测数据	
		防风固沙量	地面监测数据	
		水供给	河流径流量	地面监测数据
			湖泊面积	遥感数据
			湖泊水量	地面监测数据、遥感数据
			地下水资源量	地面监测数据
	生态系统变化的影响因素 The influencing factors of ecosystem change	气候变化	气温	地面监测数据
降水			地面监测数据	
人类活动		生态保护修复工程	调查统计数据	

2.3 项目区多源遥感数据高时空融合

项目区多源遥感数据高时空融合,应根据研究区位,搜索生态保护修复项目实施期间与历史时期的存档系列遥感数据,筛查出“缺失”或“云污染”遥感数据的空间位置与时间节点。以多时相、多源遥感数据生成的地物信息数据为基础,采用增强时空自适应反射率融合(ESTARFM)、时空组分信息融合(Spatial temporal fraction map fusion model,STFMF)、时空反射率解混改进融合(Improved spatial temporal reflectance unmixing model,ISTRUM)等模型,开展多源遥感数据高时空融合,同时探讨不同方法的优劣性。通过方法的优选试验,生成研究区“缺失”和“云污染”遥感数据的替代数据,联合存档影像重构项目区时间序列连续、空间分辨率较高的遥感数据产品。

2.4 基于时间序列遥感影像的项目区变化检测

结合项目区规划与实施方案,基于重构的时间序列遥感数据产品,采用季节趋势的断点检测(Breaks for additive seasonal and trend,BFAST)、LandTrendr 扰动检测、植被变化跟踪(Vegetation change tracker,VCT)等方法,开展项目区地物信息的变化检测,通过对地物信息突变数量、时间、强度的检测以识别生态问题、生态修复措施,实现生态保护修复项目区的有效监测。

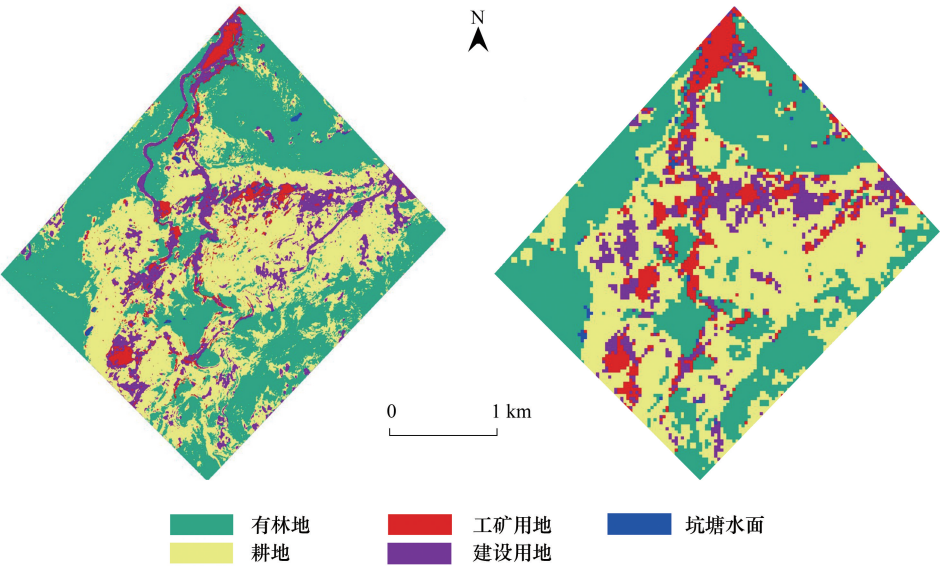


图 2 中高空间分辨率光学遥感影像信息提取结果

Fig.2 Optical remote sensing image information extraction results based on moderate and high spatial resolution

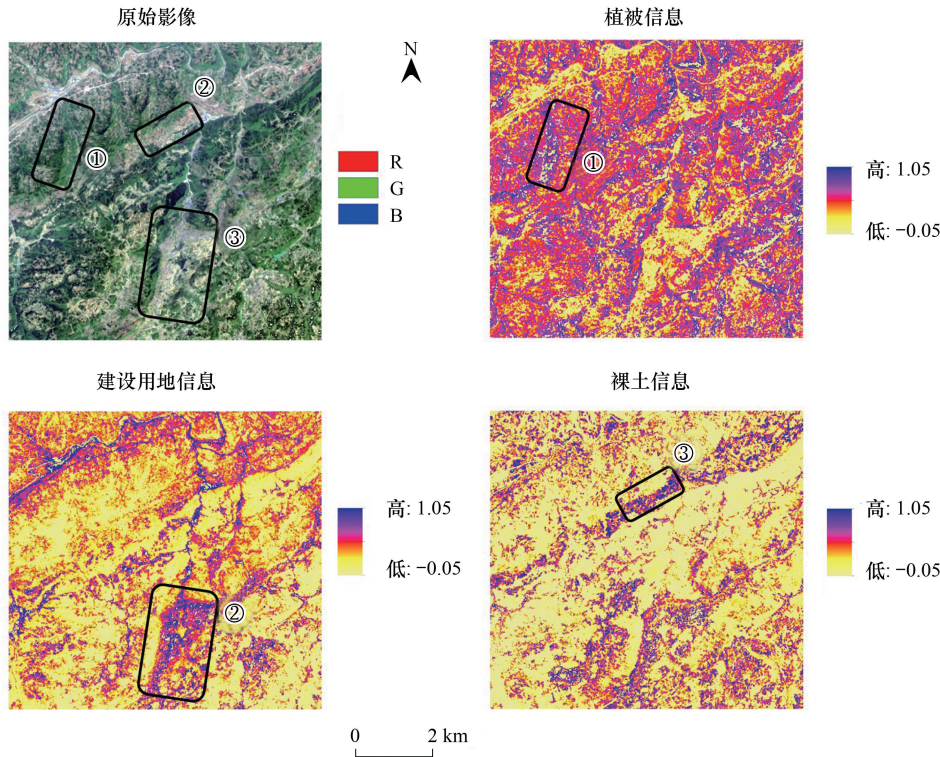


图 3 混合像元分解结果

Fig.3 Pixel unmixing results

2.5 基于多源数据的生态效益评价

基于时间序列遥感数据产品,辅以其他多源监测数据如气象、水文、土壤、人口、经济等,利用 InVEST、ARIES 等模型,对项目区的生态系统分布结构与变化、生态系统质量与变化、生态问题与变化、生态系统服务与变化、生态效益等参量进行评价,评价其状态、变化趋势及驱动力。基于生态产品价值实现理念,运用直接

市场价值、替代市场价值、模拟市场评估等方法,结合生态效益等评价结果,完成生态产品价值核算,为生态产品价值实现提供基础数据,促进生态文明体制改革、加快转变经济发展方式、实现经济社会与资源环境协调发展。

3 基于多源遥感数据的监测方法发展与展望

国土空间生态修复工作开展以来,自然资源管理部门积极探索创新生态保护修复监测技术方法,但在“天地网”一体化监测,尤其是遥感监测的理论技术、应用实践创新研究中,深度尚显不足,面向高空间分辨率遥感数据的地物信息提取技术手段相对不够多元,基于多源遥感数据互补的项目区地物信息变化检测方法研究与应用有待加强。在解算技术方面,机器学习、光谱分析、尺度转换、空间解混等理论与技术方法的研究与应用仍有待深入。在数据统筹方面,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,信息源和数据分析手段均受限制。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,但面向更大范围的国土空间生态保护修复遥感监测,尚未形成稳定长效的工作机制,尚未建立完善的多尺度遥感监测技术体系。在技术创新方面,生态保护修复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,相应的关键技术瓶颈亟待突破^[48-52]。

针对技术研究的不足,未来应从以下几方面加强研究与探索:一是随着科技进步与可获取数据的增多,应结合实际工作持续优化国土空间生态保护修复的监测指标体系,形成监测与评价指标库;二是充分挖掘遥感数据解析的相关算法潜力,如深度学习与混合像元分解模型等的优化,兼顾效率的同时提升地物信息提取的精度,充分利用非线性混合像元分解模型加强对地物信息亚像元级别的分析;三是加强时空融合算法与变化检测方法的研究探索,提高算法精度,加强相关方法在生态保护修复项目遥感监测中的实践应用,有效助力实际工作开展。

针对工作推进的不足,要以“山水林田湖草生态保护修复工程试点”项目为平台,一是建立生态保护修复工程野外监测台站,有效获取野外调查与观测数据;二是结合监测评价指标体系、相关科学技术方法,因地制宜形成基于多源遥感数据的监测方法;三是加强部门协同联动,建立稳定的遥感监测运行机制,在区域性试点研究实践的基础上,逐步提升形成国土空间生态保护修复监测监管运行机制;四是加强技术攻关与科技创新,形成行业乃至国家技术标准,指导相关监测监管工作的有效开展。

参考文献(References):

- [1] 王然. 中国省域生态文明评价指标体系构建与实证研究. 武汉: 中国地质大学, 2016.
- [2] Zhang Y H, Foody G M, Ling F, Li X D, Ge Y, Du Y, Atkinson P M. Spatial-temporal fraction map fusion with multi-scale remotely sensed images. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 213(10): 162-181.
- [3] 刘建波, 马勇, 武易天, 陈甫. 遥感高时空融合方法的研究进展及应用现状. *遥感学报*, 2016, 20(5): 1038-1049.
- [4] Willis K S. Remote sensing change detection for ecological monitoring in United States protected areas. *Biological Conservation*, 2015, 182(2): 233-242.
- [5] 陈睿山, 蔡运龙. 土地变化科学中的尺度问题与解决途径. *地理研究*, 2010, 29(7): 1244-1256.
- [6] 王鹏新, 吴高峰, 白雪娇, 刘峻明. 基于 Landsat 数据的条件植被温度指数升尺度转换方法. *农业机械学报*, 2015, 46(7): 264-271.
- [7] Watts L M, Laffan S W. Effectiveness of the BFAST algorithm for detecting vegetation response patterns in a semi-arid region. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 154(15): 234-245.
- [8] Geng L Y, Che T, Wang X F, Wang H B. Detecting spatiotemporal changes in vegetation with the BFAST model in the Qilian Mountain region during 2000-2017. *Remote Sensing*, 2019, 11(2): 103.
- [9] Dash J, Ogutu B O. Recent advances in space-borne optical remote sensing systems for monitoring global terrestrial ecosystems. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 2016, 40(2): 322-351.
- [10] 梅建新. 基于支持向量机的高分辨率遥感影像的目标检测研究. 武汉: 武汉大学, 2004.
- [11] Melgani F, Bruzzone L. Classification of hyperspectral remote sensing images with support vector machines. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, 42(8): 1778-1790.

- [12] Dalponte M, Bruzzone L, Gianelle D. Fusion of hyperspectral and LIDAR remote sensing data for classification of complex forest areas. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(5): 1416-1427.
- [13] 杨红磊, 彭军还, 李淑慧, 师芸. 基于对数-主成分变换的 EM 算法用于遥感影像分类. *测绘学报*, 2010, 39(4): 378-382, 403-403.
- [14] Rodriguez-Galiano V F, Ghimire B, Rogan J, Chica-Olmo M, Rigol-Sanchez J P. An assessment of the effectiveness of a random forest classifier for land-cover classification. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2012, 67: 93-104.
- [15] Fischer C, Busch W. Monitoring of environmental changes caused by hard-coal mining//*Proceedings of Remote Sensing for Environmental Monitoring, GIS Applications, and Geology*. Toulouse, France: SPIE, 2002: 64-72.
- [16] Yang G J, Pu R L, Huang W J, Wang J H, Zhao C J. A novel method to estimate subpixel temperature by fusing solar-reflective and thermal-infrared remote-sensing data with an artificial neural network. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(4): 2170-2178.
- [17] Chen Z Q, Shi R H, Zhang S P. An artificial neural network approach to estimate evapotranspiration from remote sensing and AmeriFlux data. *Frontiers of Earth Science*, 2013, 7(1): 103-111.
- [18] Xiao Z Q, Liang S L, Wang J D, Chen P, Yin X J, Zhang L Q, Song J L. Use of general regression neural networks for generating the GLASS leaf area index product from time-series MODIS surface reflectance. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(1): 209-223.
- [19] Pan Z G, Glennie C, Legleiter C, Overstreet B. Estimation of water depths and turbidity from hyperspectral imagery using support vector regression. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2015, 12(10): 2165-2169.
- [20] 门计林, 刘越岩, 张斌, 周繁. 多结构卷积神经网络特征级联的高分影像土地利用分类. *武汉大学学报: 信息科学版*. (2018-09-20). <http://www.cnki.net/KCMS/detail/42.1676.TN.20180920.1421.003.html>.
- [21] 陈晋, 马磊, 陈学泓, 饶玉晗. 混合像元分解技术及其进展. *遥感学报*, 2016, 20(5): 1102-1109.
- [22] Adams J B, Smith M O, Johnson P E. Spectral mixture modeling: a new analysis of rock and soil types at the Viking Lander 1 Site. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1986, 91(B8): 8098-8112.
- [23] Keshava N, Mustard J F. Spectral unmixing. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2002, 19(1): 44-57.
- [24] García-Haro F J, Gilabert M A, Meliá J. Linear spectral mixture modelling to estimate vegetation amount from optical spectral data. *International Journal of Remote Sensing*, 1996, 17(17): 3373-3400.
- [25] Bachmann C M, Ainsworth T L, Fusina R A, Montes M J, Bowles J H, Korwan D R, Gillis D B. Bathymetric retrieval from hyperspectral imagery using manifold coordinate representations. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(3): 884-897.
- [26] Chen J, Richard C, Honeine P. A novel kernel-based nonlinear unmixing scheme of hyperspectral images//*Proceedings of 2011 Conference Record of the Forty Fifth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*. Pacific Grove, CA, USA: IEEE, 2011: 1898-1902.
- [27] Agathos A, Li J, Petcu D, Plaza A. Multi-GPU implementation of the minimum volume simplex analysis algorithm for hyperspectral unmixing. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2014, 7(6): 2281-2296.
- [28] 马孟莉, 朱艳, 李文龙, 姚霞, 曹卫星, 田永超. 基于分层多端元混合像元分解的水稻面积信息提取. *农业工程学报*, 2012, 28(2): 154-159.
- [29] 王浩, 吴炳方, 李晓松, 卢善龙. 流域尺度的不透水面遥感提取. *遥感学报*, 2011, 15(2): 388-400.
- [30] 廖春华, 张显峰, 刘羽. 基于多端元光谱分解的干旱区植被覆盖度遥感反演. *应用生态学报*, 2012, 23(12): 3243-3249.
- [31] Ray T W, Murray B C. Nonlinear spectral mixing in desert vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 1996, 55(1): 59-64.
- [32] Fan W Y, Hu B X, Miller J, Li M X. Comparative study between a new nonlinear model and common linear model for analysing laboratory simulated-forest hyperspectral data. *International Journal of Remote Sensing*, 2009, 30(11): 2951-2962.
- [33] Halimi A, Altmann Y, Dobigeon N, Tourneret J Y. Nonlinear unmixing of hyperspectral images using a generalized bilinear model. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(11): 4153-4162.
- [34] Eisavi V, Homayouni S, Yazdi A M, Alimohammadi A. Land cover mapping based on random forest classification of multitemporal spectral and thermal images. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2015, 187(5): 291.
- [35] Gao F, Masek J, Schwaller M, Hall F. On the blending of the Landsat and MODIS surface reflectance: predicting daily Landsat surface reflectance. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44(8): 2207-2218.
- [36] Zhu X L, Chen J, Gao F, Chen X H, Masek J G. An enhanced spatial and temporal adaptive reflectance fusion model for complex heterogeneous regions. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(11): 2610-2623.
- [37] Ling F, Li W B, Du Y, Li X D. Land cover change mapping at the subpixel scale with different spatial-resolution remotely sensed imagery. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2011, 8(1): 182-186.
- [38] Bhandari S, Phinn S, Gill T. Preparing landsat image time series (LITS) for monitoring changes in vegetation phenology in Queensland, Australia. *Remote Sensing*, 2012, 4(6): 1856-1886.
- [39] Walker J J, De Beurs K M, Wynne R H. Dryland vegetation phenology across an elevation gradient in Arizona, USA, investigated with fused

- MODIS and Landsat data. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 144(5): 85-97.
- [40] 赵忠明, 孟瑜, 岳安志, 黄青青, 孔赞珑, 袁媛, 刘晓奕, 林蕾, 张蒙蒙. 遥感时间序列影像变化检测研究进展. *遥感学报*, 2016, 20(5): 1110-1125.
- [41] Malaviya S, Munsu M, Oinam G, Joshi P K. Landscape approach for quantifying land use land cover change (1972-2006) and habitat diversity in a mining area in Central India (Bokaro, Jharkhand). *Environmental Monitoring and Assessment*, 2010, 170(1/4): 215-229.
- [42] Mithal V, O'Connor Z, Steinhäuser K, Boriah S, Kumar V, Potter C S, Klooster S A. Time series change detection using segmentation: a case study for land cover monitoring. *Proceedings of 2012 Conference on Intelligent Data Understanding*. Boulder, CO, USA: IEEE, 2012: 63-70.
- [43] Wang Y F, Liu G X, Guo E L. Spatial distribution and temporal variation of drought in Inner Mongolia during 1901-2014 using Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *Science of the Total Environment*, 2019, 654(11): 850-862.
- [44] Lamb A D. Earth observation technology applied to mining-related environmental issues. *Mining Technology*, 2000, 109(3): 153-156.
- [45] Legg C A. Applications of remote sensing to environmental aspects of surface mining operations in the United Kingdom. *Institution of Mining & Metallurgy*, ed. *Remote Sensing: An Operational Technology for the Mining and Petroleum Industries*. Dordrecht: Springer, 1990: 159-164.
- [46] Liu J T, Feng Q L, Gong J H, Zhou J P, Li Y. Land-cover classification of the Yellow River Delta wetland based on multiple end-member spectral mixture analysis and a Random Forest classifier. *International Journal of Remote Sensing*, 2016, 37(8): 1845-1867.
- [47] 邵全琴, 樊江文, 刘纪远, 黄麟, 曹巍, 徐新良, 葛劲松, 吴丹, 李志强, 巩国丽, 聂学敏, 贺添, 王立亚, 邴龙飞, 李其江, 陈卓奇, 张更权, 张良侠, 杨永顺, 杨帆, 周万福, 刘璐璐, 祁永刚, 赵国松, 李愈哲. 三江源生态保护和建设一期工程生态成效评估. *地理学报*, 2016, 71(1): 3-20.
- [48] Malenovsky Z, Bartholomeus H M, Acerbi-Junior F W, Schopfer J T, Painter T H, Epema G F, Bregt A K. Scaling dimensions in spectroscopy of soil and vegetation. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2007, 9(2): 137-164.
- [49] 董文全, 蒙继华. 遥感数据时空融合研究进展及展望. *国土资源遥感*, 2018, 30(2): 1-11.
- [50] 黄波, 赵涌泉. 多源卫星遥感影像时空融合研究的现状及展望. *测绘学报*, 2017, 46(10): 1492-1499.
- [51] 李营, 杨一鹏, 殷守敬, 杨海军, 朱海涛, 赵爽, 郭会敏. 国内环境遥感监测指标验证方法研究进展. *中国环境监测*, 2015, 31(4): 141-145.
- [52] 张超, 吕雅慧, 邴文聚, 高璐璐, 朱德海, 杨建宇. 土地整治遥感监测研究进展分析. *农业机械学报*, 2019, 50(1): 1-22.