

山水林田湖草生态保护修复项目遥感监测及 辅助绩效评价

王力¹, 黄妮¹, 牛铮^{1,2}, 罗明^{3,4}, 陈元鹏^{3,4}, 郭义强^{3,4}, 雷雅会⁵,
扶卿华⁶, 应凌霄^{3,4}

1. 中国科学院空天信息创新研究院 遥感科学国家重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 自然资源部土地整治重点实验室, 北京 100083;

4. 自然资源部国土整治中心, 北京 100035;

5. 中国地质大学(北京)土地科学技术学院, 北京 100083;

6. 珠江水利委员会珠江水利科学研究院, 广州 510611

摘要: 山水林田湖草生态保护修复是保障国家生态安全的重要举措, 科学合理的生态保护修复项目监测和绩效评价方法, 有助于保障生态保护修复工程的顺利实施和生态保护修复成果的可持续发展。本研究采用文献综述和案例分析相结合的方法, 论述了遥感技术在山水林田湖草生态保护修复项目监测和绩效评价中的具体应用。从关注区域生态系统格局和质量两方面出发, 选择遥感数据获取的土地覆盖类型、植被长势、水质参数作为评价指标, 整体实现了山水林田湖草各生态要素的监测; 从维护和提升区域生态系统服务出发, 选择水源涵养、水土保持、生态系统承载力等指标, 论述了遥感数据在辅助山水林田湖草生态保护修复项目绩效评价中的作用。最后指出积极探索新的遥感数据挖掘方法, 并结合遥感技术与传统的调查方法, 有望形成更客观、更快速且具备可执行性的山水林田湖草生态保护修复项目监测及绩效评价体系。

关键词: 生态保护修复, 山水林田湖草, 遥感监测, 绩效评价

引用格式: 王力, 黄妮, 牛铮, 罗明, 陈元鹏, 郭义强, 雷雅会, 扶卿华, 应凌霄. 2022. 山水林田湖草生态保护修复项目遥感监测及辅助绩效评价. 遥感学报, 26(8): 1547-1561

Wang L, Huang N, Niu Z, Luo M, Chen Y P, Guo Y Q, Lei Y H, Fu Q H and Ying L X. 2022. Remote sensing technology for monitoring and auxiliary performance evaluation of ecological protection and restoration projects for mountains, rivers, forests, farmlands, lakes, and grasslands. National Remote Sensing Bulletin, 26(8): 1547-1561 [DOI: 10.11834/jrs.20220002]

山水林田湖草生态保护修复以生命共同体理念为指导, 依据国土空间规划和生态保护修复等专项规划, 以保障国家生态屏障和重点生态功能区健康安全为目标, 在景观尺度上, 统筹考虑山上山下、地上地下、陆地海洋以及流域上下游, 优化国土空间布局, 调整土地利用结构和关系, 对退化、受损和毁坏的生态系统进行恢复活动(罗明等, 2019); 山水林田湖草生态保护修复关系到生态文明建设和美丽中国建设进程, 关系到国家生态安全和中华民族永续发展(吴钢等,

2019)。山水林田湖草生态保护修复工程试点于2016年开始启动, 在全国24个省(自治区、直辖市)共有25个山水林田湖草生态保护修复工程试点。这25个试点(约111万km²的国土面积)大多分布于生态安全战略格局骨架区域, 并且基本都属于国家重点生态功能区, 对维护国家生态安全、提升区域生态功能具有重要意义(罗明等, 2019)。山水林田湖草生态保护修复工程项目内容繁杂、工程量巨大, 涵盖了矿山、水环境、森林、农田、湖泊、草原、湿地、海洋、农村、城市等

收稿日期: 2020-02-12; 预印本: 2021-05-12

基金项目: 国家重点研发计划项目(编号:2016YFC0502501); 国家自然科学基金(编号:41871347)

第一作者简介: 王力, 研究方向为全球变化与碳循环遥感。E-mail: wangli@radi.ac.cn

通信作者简介: 牛铮, 研究方向为全球变化遥感。E-mail: niuzheng@radi.ac.cn

多种类型的修复治理(王军和钟莉娜, 2019; 李红举等, 2019)。这些工程的实施, 开始取得生态、社会和经济等多重效益, 但也存在监测评价管理科学性不足的问题(罗明等, 2019)。科学客观的监测与评价有助于明确生态环境问题的产生机制, 使得生态保护修复措施取得最优效益, 是山水林田湖草生态保护修复工程顺利实施的保障。

采用常规地面测量方法来进行山水林田湖草生态保护修复工程监测和绩效评价, 存在主观性太强、周期时间长、人工及成本较高等局限性, 并且难以在区域尺度上对监测要素进行快速提取, 使得监测结果和绩效评价缺乏时效性(Andrés-Costa等, 2017; 刀谓等, 2018)。遥感技术以其宏观、实时、快速、动态、客观的特点, 被国内外学者广泛应用于生态保护修复项目的监测和绩效评价中, 例如: 热带雨林恢复(Qin等, 2019; Wu等, 2020)、Nature-based 稀树草原恢复(Moustakas等, 2019)、大规模生态恢复工程区的植被恢复(Tong等, 2018; Niu等, 2019), 而且, 应用于生态保护修复工程监测中的指标, 64%是可以由遥感数据进行直接或间接监测的(陈元鹏等, 2019)。前人的研究为基于遥感数据的山水林田湖草生态保护修复工程监测和绩效评价提供了技术参考, 但是目前大部分研究只是针对山、水、林、田、湖、草等单一生态要素进行监测和评价, 难以满足山水林田湖草生态保护对生态系统整体保护、系统治理的需求。

本研究针对前人研究中存在的问题, 综合考虑山、水、林、田、湖、草等多种生态要素, 提出了一个基于遥感数据的山水林田湖草生态保护修复项目监测和绩效评价技术路线。采用文献综述和具体案例分析相结合的方法, 详细论述了遥感技术在山水林田湖草生态保护修复项目监测和绩效评价中的应用。该研究的开展对于保障山水林田湖草生态保护修复工程的顺利实施, 以及工程效益的可持续性具有技术指导性意义。

1 基于遥感数据的山水林田湖草生态保护修复项目监测和绩效评价技术路线

基于遥感数据的山水林田湖草生态保护修复项目监测和绩效评价以“山水林田湖草生命共同体”的理念(成金华和尤喆, 2019)及生态系统

生态学为理论支撑, 注重生态因子之间的相互作用及生态环境的整体性。本研究具体的技术路线如图1所示。通过收集山水林田湖草生态保护修复项目工程区的多源数据——包括多源遥感数据(不同时间、空间和光谱的遥感数据)和多源观测数据(定点、实地调查采样数据、智能设备观测数据), 利用各种遥感反演和信息提取的方法, 从关注生态系统格局和质量出发, 获取了能综合反映山水林田湖草各生态要素的指标信息(土地覆盖类型、植被长势、水质)。这些指标的选择参考了全国生态环境10年变化(2000年—2010年)遥感调查的评估指标(欧阳志云等, 2014; Ouyang等, 2016), 可以服务于山水林田湖草生态保护修复项目的实施进度监测, 同时还可以应用于山水林田湖草生态修复项目实施完后的绩效评价。从提升区域生态系统服务的角度出发, 本文选择了一系列指标进行山水林田湖草生态保护修复项目的绩效评价(水源涵养、水土保持、生态系统承载力、固碳功能、生态系统服务价值等)。

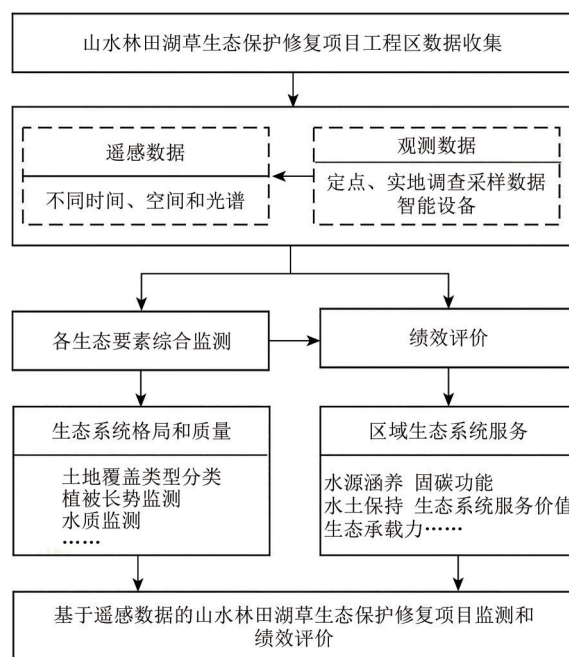


图1 基于遥感数据的山水林田湖草生态保护修复项目监测和绩效评价技术路线

Fig. 1 Technical route of monitoring and performance evaluation of ecological restoration project of mountains, rivers, forests, farmlands, lakes, and grasslands based on remote sensing data

表1以云南省抚仙湖山水林田湖草生态保护修复工程试点项目的遥感监测为例, 阐明了本研究

选取的土地覆盖类型、植被长势、水质参数在项目实施过程中的监测，以及作为评价指标与水源涵养、水土保持、生态系统承载力等指标，在项目绩效评价中的可能应用。抚仙湖山水林田湖草生态保护修复工程试点项目的总体目标是以抚仙湖 I 类优质水资源保护为目标，针对流域突出的生态问题，强力推进流域生态格局优化与空间管

控，加大退化土地整治。为了实现这一目标，共划分了 4 大类工程：修山扩林工程、调田节水和控污治河工程、生境修复工程和治水保湖工程。针对这 4 大类工程，共有 19 个评价指标，其中 14 个指标可以通过遥感监测获取，并能进一步辅助生态修复工程的绩效评价。

表 1 云南省抚仙湖山水林田湖草生态保护修复工程试点项目总体目标、项目类别、评价指标,以及可以通过遥感监测获取的指标、绩效评价方法

Table 1 The overall objectives, project categories, evaluation indicators of the pilot project of ecological protection and restoration project of mountains, rivers, forests, farmlands, lakes, and grasslands in Fuxian Lake of Yunnan Province, as well as indicators and performance evaluation methods that can be obtained through remote sensing monitoring

总体目标	工程类别	评价指标	可进行项目过程监测的遥感指标	可采用的绩效评价方法
以抚仙湖 I 类优质水资源保护为目标,针对流域突出的生态问题,强力推进流域生态格局优化与空间管控,加大退化土地整治	修山扩林	矿区修复面积	土地覆盖类型	土地覆盖类型变化
		水土流失治理面积	土地覆盖类型	水土保持评估
		新增水源涵养面积	土地覆盖类型	水源涵养功能
		治理石漠化面积	植被长势	土地覆盖类型变化、植被长势
		流域植被覆盖率	植被长势	土地覆盖类型变化、植被长势
	调田节水和控污治河	土地整治面积	土地覆盖类型	土地覆盖类型变化
		主要入湖河流断面水质	水质参数	水质参数
		抚仙湖(星云湖)城镇污水收集处理率	—	—
		城镇生活垃圾处置率	—	—
		农村生活污水收集处理率	—	—
		农村生活垃圾处理率	—	—
		畜禽粪便资源化率	—	—
	生境修复	缓冲带修复比例	土地覆盖类型	土地覆盖类型变化
		新增湿地恢复面积	土地覆盖类型	土地覆盖类型变化
	治水保湖	COD 排放削减量	水质参数	站点监测为主、水质参数辅助
		TN 排放削减量	水质参数	站点监测为主、水质参数辅助
		TP 排放削减量	水质参数	站点监测为主、水质参数辅助
		抚仙湖水质	水质参数	站点监测为主、水质参数辅助
			星云湖水质	水质参数

注：遥感技术不能支持的指标以“—”表示。

2 基于遥感数据的山水林田湖草生态保护修复项目监测

区域生态系统涵盖山、水、林、田、湖、草等自然生态各要素（刘世梁等，2019）。本研究以“山水林田湖草生命共同体”（成金华和尤喆，2019；吴钢等，2019）为中心思想，主要关注各生态要素组成的区域生态系统的格局和质量，论述遥感数据在山水林田湖草生态保护修复项目监测中的应用。对于生态系统格局的研究，从生态

系统分类出发，利用遥感数据获取项目区土地覆盖类型，以此来分析各生态要素的数量结构和空间布局；对于区域生态系统质量的研究，从植被长势、水质两方面开展基于遥感数据的植被长势时空变化分析和水环境质量监测。

本研究选取了土地覆盖类型、植被长势和水质参数这 3 个指标，论述其在山水林田湖草生态保护修复项目监测中的应用，主要基于以下两个原因：（1）基于遥感数据获取的土地覆盖类型、植被长势和水质参数具有很强的普适性，已经成功

应用于山水林田湖草生态保护修复试点项目——陕西省黄土高原生态保护修复、河北省国家山水林田湖草生态修复、江西省赣州市山水林田湖草生态保护与修复和福建省闽江流域山水林田湖草生态修复等试点工程项目中。(2) 基于遥感数据获取土地覆盖类型、植被长势和水质参数的方法较为成熟, 且在近几年取得了一系列技术方法上的突破, 并具有巨大的发展空间, 例如: 随着高空间分辨率遥感数据获取周期缩短、深度学习等机器学习算法广泛应用, 土地覆盖分类的分辨率、时效性、精度和自动化水平逐步提高 (Tong 等, 2020; Zhang 等, 2019; 许泽宇 等, 2022); 近年来遥感大数据云平台处理技术的突破, 使得遥感数据可以快速实现长时间尺度植被长势的连续监测 (Song 等, 2018; 裴杰 等, 2018; Huang 等, 2020); 水质参数的遥感反演也逐步从实验室、科学方法走向业务化应用 (丁梦娇 等, 2019; Sagan 等, 2020; 刘曼 等, 2021)。

2.1 土地覆盖类型遥感提取

土地覆盖类型信息是描述区域生态系统类型组成的重要基础数据, 对揭示山、水、林、田、湖、草等生态要素的空间变化规律和评价生态保护修复工程区的生态环境具有重要意义 (刘纪远和布和敖斯尔, 2000)。前人的研究大多以遥感影像为数据源, 通过人机交互解译、监督分类等方法, 提取土地覆盖类型信息, 但这些方法费时费力, 很难实现生态保护修复项目工程区土地覆盖亚类和三级以上地类的高效、准确提取。随着空间科学技术的飞速发展, 基于遥感数据的土地覆盖分类研究也向着更高层次的人工智能化方向发展 (邸凯昌 等, 2000; 骆剑承 等, 2001; Gidudu 和 Heinz, 2007)。单一的人工智能分类方法被证明在中低分辨率土地覆盖分类中具有很好的精度 (Rodríguez-Galiano 等, 2012; 裴欢 等, 2018; 戴声佩 等, 2021), 但是针对高分辨率遥感影像分类会造成很多与实际理解不相符的破碎斑块。针对这一问题, 面向对象的分类方法也被广泛引入到遥感分类中 (Zhang 等, 2018; 朱晓霞 等, 2021; Vizzari, 2022)。作为一种面向对象的影像分割技术, 其最重要的特点就是分类的最小单元是由影像分割后得到的同质影像对象 (图斑), 而不再是单个像素, 可以实现较高层次的遥感图像分类和

目标地物提取 (陈云浩 等; 2006)。图2为基于高空间分辨率的卫星遥感数据, 采用图像分割的方法获取的2015年广东省定子滩产卵场周边土地覆盖类型数据, 通过客观分析该区域生态保护修复工程实施前各土地覆盖类型的面积比例和空间分布格局, 为科学合理地制定河道修复工程规划提供详细的数据支持与决策参考。

从1999年开始, 世界上的各个国家就陆续发射高空间分辨率的卫星遥感数据, 而且近几年高空间分辨率卫星的数量明显增加 (石卫平, 2000; 李静, 2007)。这些高空间分辨率的卫星遥感数据具有亚米级的空间分辨率, 重访周期高达1天, 可以对生态保护修复工程区的土地覆盖类型进行近实时动态监测。图3展示了重庆市某一矿山生态保护修复工程实施不同阶段的高空间分辨率遥感影像图, 通过目视判读的方法也很容易识别生态保护修复工程区各生态要素的变化, 以此来判断项目实施的进度。

除了通过直观的目视判读的方法从高空间分辨率影像中识别生态保护修复工程区的各生态要素以外, 深度学习作为图像识别领域重要的技术手段, 在地表特征地物精确提取方面展现出了巨大的潜力, 这也为利用高空间分辨率遥感数据来开展生态保护修复工程区进度监测提供了重要的技术支撑。例如: 刘文涛等 (2018) 使用深度学习方法从高空间分辨率影像中提取了建筑物屋顶, 并通过特征复用和特征增强等设计深度卷积神经网络, 实现建筑物的自动精确提取; Bupphawat 等 (2017) 提出了一种基于深度学习技术的高空间分辨率遥感图像土地覆盖制图方法, 可以实现亚像元尺度土地覆盖类型的提取; Tong 等 (2020) 提出了一种深度卷积神经网络方法, 该方法可以用于高精度提取不同时空分辨率遥感影像的土地覆盖类型信息。我们利用深度学习方法从国产高分二号卫星影像上提取了建筑物信息, 发现深度学习方法可以精确的提取出道路、已建好的建筑物和正在建设的建筑物 (Wang 等, 2019)。

2.2 植被长势遥感监测

植被长势是区域生态系统质量的重要指示器 (王柯 等, 2019)。基于遥感数据估算的植被指数、植被覆盖度、叶面积指数和植被生产力等参数可以定量地表征地表植被长势 (Yuan 等, 2017; Chen 等,

2013; Xiao等, 2019), 其中, 植被指数获取的不确定性较低, 也是遥感领域中用来表征地表植被长势状况的一个简单、有效的度量参数。众多植被指数中, 归一化植被指数 NDVI (Normalized Difference

Vegetation Index) 是最为广泛使用的一种植被指数, 与植被长势呈正相关关系 (Rokni 和 Musa, 2019)。针对生态保护修复工程区植被长势的监测, 可以综合利用低、中、高这3种空间分辨率NDVI的优势。

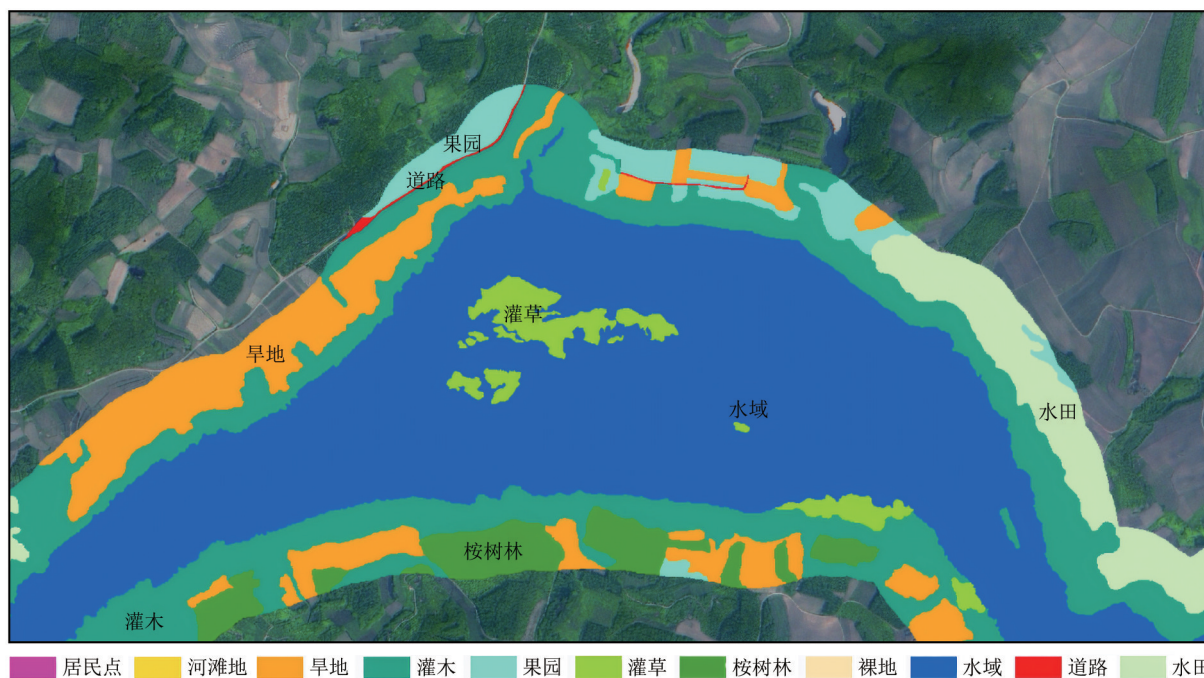


图2 2015年广东省定子滩产卵场周边土地覆盖类型的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of land cover types around the Spawning Ground of Ding Zi Tan in Guangdong Province in 2015



(a) 修复前(2016年3月)

(b) 修复中(2017年4月)

(c) 修复后(2018年8月)

(a) Mine before restoration (2016-03)

(b) Mine under restoration (2017-04)

(c) Mine after restoration (2018-08)

图3 重庆市某一矿山修复区的高空间分辨率影像图

Fig. 3 High spatial resolution image of a mine restoration area in Chongqing

低空间分辨率遥感数据具有大尺度、长时间序列、高效率、低成本的特点, 可以高效确定植被发生明显变化的区域以及变化对应的精细时间节点。例如: Jiang等(2017)基于1984年—2013年的GIMMS NDVI (0.083°×0.083°) 数据分析了中亚地区植被的变化, 发现1991年苏联解体后因为弃牧导致哈萨克斯坦东部、吉尔吉斯斯坦和塔吉克斯坦部分地区的牧场植被覆盖度明显改

善; Song等(2018)利用0.05°×0.05°空间分辨率的NOAA AVHRR NDVI遥感数据监测了近34年来全球土地覆盖的变化情况, 发现中国和欧洲区域大规模的植树造林活动是该区域森林增加的关键驱动力, 而热带地区的森林砍伐和农田开垦, 是导致该区域农田大面积增加的直接原因。基于1982年—2016年0.05°×0.05°空间分辨率的NOAA AVHRR NDVI数据, 分析了全国25个山水林田湖

草生态保护工程试点项目区和第一批10个项目区森林、低矮植被和裸地及建筑用地三种生态要素在项目开展前34年的变化情况,该结果可以为生态

保护修复工程提供长时序的生态本底依据,也可作为在工程完成后开展绩效评价的对比数据(图4)。



图4 基于1982年—2016年低空间分辨率遥感数据的山水林田湖草生态保护修复试点工程区植被长势变化趋势分析
Fig. 4 Analysis of vegetation growth trend in the pilot project area of mountains, rivers, forests, farmlands, lakes, and grasslands ecological protection and restoration based on 1982—2016 low spatial resolution remote sensing data

中空间分辨率遥感数据在时空分辨率以及获取成本上稍逊色于低空间分辨率遥感数据,但可以应用于分析区域植被的变化程度和具体空间位置。随着基于云计算的地理信息处理平台 Google Earth Engine (GEE) 的发展,海量中空间分辨率遥感数据的免费快速处理成为可能 (Beaton 等, 2019; Gorelick 等, 2017; Xiong 等, 2017)。例如: 裴杰等 (2018) 基于 GEE 遥感大数据云计算平台, 利用 1988 年—2016 年的 Landsat NDVI 长时间序列数据, 分析了云南省南洞地下河流域石漠化生态工程实施前后植被的变化。

高空间分辨率遥感数据对地面物体的辨别能力强,更直观地体现了现实地表情况,可以分析

植被发生变化的原因和驱动机制。例如: 孙桂芬等 (2018) 利用四川省雅江县和冕宁县两场火灾前后时序的高分一号宽幅数据, 对不同受灾程度火烧迹地火灾前后 NDVI 的变化进行分析, 结果表明火烧区植被的 NDVI 比正常植被对应的 NDVI 始终偏低, 且植被受灾越严重, 其 NDVI 值对应越低。

2.3 水质参数遥感反演

“水”要素是山水林田湖草生命共同体的重要组成部分,而水质是水环境的重要指示因子。水质遥感监测可以反映水质参数 (悬浮物含量、叶绿素 a 浓度、水体透明度等) 在空间和时间上的分布及变化,发现一些常规方法难以揭示的污染源和污染物迁移特征,而且具有监测范围广、速度

快、成本低和长期动态监测等优势(田野等, 2015), 因此, 可以利用遥感技术对生态保护修复工程区水质参数进行时空定量分析。针对生态保护修复区的水质参数遥感反演, 前人的研究中通常采用经验统计方法建立水质参数与最佳遥感波段及其组合的线性和非线性关系来实现水质参数的遥感定量反演, 以此来监测水质参数在空间和时间上的变化状况和特性(杜为静等, 2010; 何磊等, 2015)。基于2017年18景不同时相的SPOT多光谱影像, 分析了深圳港赤湾港区多用途泊位改扩建工程附近海域水体化学需氧量(COD)涨落潮输移特征(图5)。经遥感时序分析及实测样

点水质分析, 发现工程实施区附近不同时期COD浓度受涨落潮影响较为明显: 落潮时, 径流携带沿岸COD高浓度水体直接影响工程附近水域; 涨潮阶段, 工程附近COD高浓度水体得到稀释, 赤湾内湾COD浓度稍高于工程沿岸水域。基于高空间分辨率遥感数据的可见光波段构建的指数可以定量指示水体的黑度(Shen等, 2019), 该方法已经被生态环境部应用于城市黑臭水体的排查与识别中。因此, 利用遥感数据可以较好地表征水质参数空间变化趋势, 但针对某一地点水质参数进行定量提取的精度有待提高(Li等, 2016)。

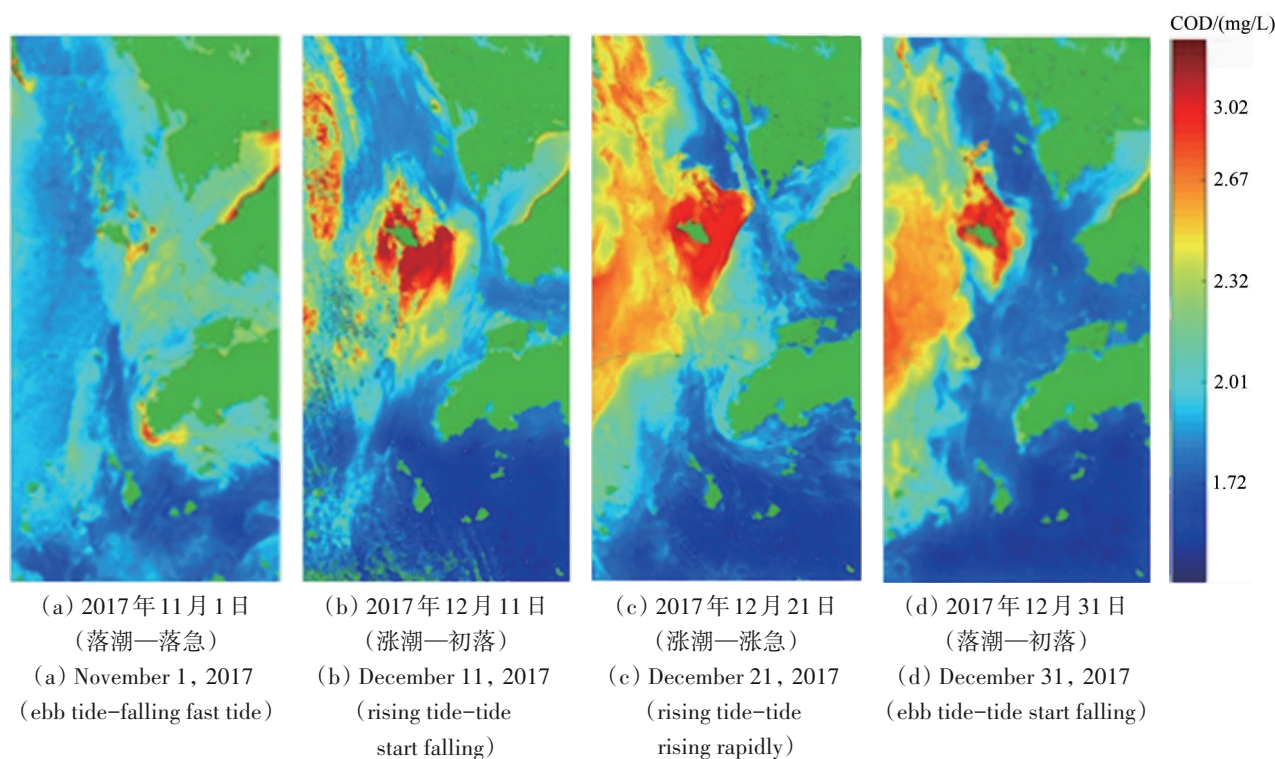


图5 不同涨落潮特征潮位SPOT多光谱影像提取的水体化学需氧量

Fig. 5 Multi-spectral image extraction of chemical oxygen demand in water for tide levels with different rising and falling tide characteristics

3 基于遥感数据的山水林田湖草生态保护修复项目绩效评价

科学客观地评估山水林田湖草生态保护修复工程的效益对于维护和提升区域生态系统服务具有重要意义(孔令桥等, 2019)。按照“山水林田湖草生命共同体”的理念, 对生态系统空间格局、生态系统特性及服务功能进行综合评价, 有助于明确生态空间存在的突出问题, 以及未来区域生态保护修复所面临的形势与挑战(叶艳妹等, 2019)。

不同的山水林田湖草生态保护修复工程有不同的目标要求, 其效益评价的指标也存在不同, 但是遥感作为一种技术手段, 可以有效的获取与植被、水体和地表覆盖类型有关的数据, 并在此基础上提取一套客观的绩效评价指标, 辅助生态保护修复工程的绩效评价(陈元鹏等, 2019)。通过分析云南南涧地下河流域 Landsat 影像提取的植被覆盖度(annFVC)的时序变化, Pei等(2019)发现经过近30多年的生态保护修复治理, 该区域的植被覆盖度呈明显增加趋势, 而且生态工程实

施后整个区域的 annFVC 增加幅度 (Slope=0.0046, $P=0.008$) 大于生态工程实施前 (Slope=0.0029, $P=0.34$), 说明生态保护修复工程的实施明显改善了当地的植被覆盖度。

为了进一步评价生态保护修复工程实施后带来的生态效益, 可以利用低中空间分辨率的遥感数据, 通过生态环境要素遥感反演的方法, 定量

获取生态保护修复工程区的绩效评价指标, 例如: 水源涵养功能、水土流失、生态承载力、固碳功能、生态系统服务价值、景观格局稳定性等参数, 评价生态保护修复工程实施后所带来的区域生态效益 (表 2)。这些评价指标中, 除了不能被应用于生态承载力估算之外, 遥感技术都可以在其他指标的估算中发挥很重要的作用。

表 2 山水林田湖草生态保护修复工程绩效评价中的指标、计算方法和遥感估算参数总结

Table 2 Summary of indicators, calculation methods and remote sensing estimation parameters in performance evaluation of ecological restoration engineering

绩效评价指标	计算方法	遥感估算参数
水源涵养	水量平衡方程 (金双彦等, 2015; 罗玉峰等, 2014): $Q = A \times (R - E)$ 式中, R 为降水量 (mm); A 为区域生态系统面积; E 为陆地蒸散量 (mm)	R 、 A 和 E 可以通过遥感数据进行反演或提取 (Tao 等, 2001; Hansen 和 Reed, 2000; Mu 等, 2011)
	降水储存量方程 (司今等, 2011): $Q = V - S$ 式中, V 为植被覆盖区域的径流量 (mm); S 为裸地区的径流量 (mm)	降水储存量方程中, 降雨量和植被覆盖度是估算 V 和 S 的重要参数, 这两个参数可以通过遥感反演
	土壤蓄水能力方程 (Ogée 和 Brunet, 2002): $Q = R + V + S$ 式中, R 为林冠截留的降水量; V 是植被含水量; S 为土壤含水量	土壤蓄水能力方程中的植被含水量和土壤含水量可通过高光谱定量遥感进行反演估算 (张文等, 2018; 曾旭婧等, 2017)
水土保持	水土流失估算模型可表达为: $A = R \times K \times LS \times B \times E \times T$ 式中, A 为土壤水蚀模数 [$t/(hm^2 \cdot a)$]; R 表示降雨侵蚀力因子 [$MJ \cdot mm/(hm^2 \cdot h \cdot a)$]; K 为土壤可蚀性因子 [$t \cdot hm^2 \cdot h/(hm^2 \cdot MJ \cdot mm)$]; LS 是坡长坡度因子 (无量纲); B 为生物措施因子 (无量纲); E 为工程措施措施因子 (无量纲); T 为耕作措施因子 (无量纲)	模型在进行土壤侵蚀定量分析时, 综合考虑了降雨、土壤、植被、地形、措施等多项因子, 这些因子可通过定量遥感反演的方法获取
生态承载力	生态足迹模型 (魏黎灵, 2018): $EC = \sum (A_i \times EQF \times YF) / A$, $EQF = NPP_i / \overline{NPP}$, $YF = NPP_i / \overline{NPP}_i$ 式中, EC 为第 i 种土地覆盖类型每平方公里的生态承载力; A_i 为 i 种土地类型的面积; EQF 为均衡因子; YF 为产量因子; A 为区域面积; NPP_i 为 i 类生物生产性土地的净初级生产力; \overline{NPP} 为各类土地的平均净初级生产力值; \overline{NPP}_i 为 i 类土地的国家年平均净初级生产力值	生态足迹模型中, 参数 NPP 有现成的遥感产品 (田振兴等, 2018; 成方妍等, 2017), 而土地覆盖类型可以通过遥感影像提取 (王卷乐等, 2018)
固碳功能	状态空间模型 (毛鹏等, 2017): 该模型分别用 ECC_i 和 ECS_i 表示能反映区域生态承载力的指标项在可持续发展状态下的理想值及现状值 $M = \sqrt{(\omega_i \times ECS_i^*)^2}$ 式中, M 值的大小定量表示了现状区域生态承载状况; ω_i 为各指标项的权重; ECS_i^* 为 ECS_i 和 ECC_i 经过某种运算得到的向量	—
	$C_i = \sum_{i=1}^n (B_i \times CF_i)$ 式中, C_i 为生物碳储量 (t); i 为植物类型; B_i 为某树种的生物量 (hm^2); CF_i 为含碳量 (t/hm^2)	植被生物量可以通过遥感数据反演获取 (马娜等, 2012)
生态系统服务价值	$ESV = \sum_{i=1}^n A_i \times VC_i$ 式中, ESV 为生态系统服务价值 (元); A_i 为第 i 种生态系统类型的面积 (hm^2); VC_i 为单位面积上第 i 种生态系统类型的生态系统服务价值 (元/ hm^2)	生态系统类型的面积可以通过遥感数据提取 (林成行等, 2018; 王凯霖等, 2018)

注: “—”表示该指标不能通过遥感技术获取。

4 结论

本文基于“山水林田湖草生命共同体”的理

念, 提出了基于遥感数据的山水林田湖草生态保护修复项目监测和绩效评价的技术路线。通过文献综述和具体案例分析相结合的方法, 阐明了遥

感数据获取的土地覆盖类型、植被长势、水质参数可以有效地应用于山水林田湖草各生态要素的监测,论述了遥感在辅助山水林田湖草生态保护修复项目绩效评价中的重要作用。随着遥感数据源的不断增加、以及新的遥感影像处理和信息提取方法的进一步发展,利用遥感数据对山水林田湖草生态保护修复项目的评价指标进行的研究也会逐渐向精细化和多样化的方向发展,这将为山水林田湖草生态保护修复项目的监测和绩效评价提供重要的技术参考,尤其对于缺少实测资料的生态保护修复项目具有重要的应用价值。

遥感技术在山水林田湖草生态保护修复项目的监测和辅助绩效评价中可以发挥重要作用,但是遥感技术并不是万能的,它在山水林田湖草生态保护修复工程上的应用中还存在明显的不足:

(1) 遥感技术的应用离不开地面观测数据的支持。遥感影像从数据获取、预处理以及地表参数反演和信息提取等过程中都存在一定的误差,从而影响生态保护修复项目工程区各生态要素的监测和绩效评价结果的准确性,导致生态保护修复决策产生偏差(Liu等,2019; Biswal等,2019; Froelking等,2002)。为了从遥感数据中精确提取与生态保护修复监测和绩效评价有关的信息,必须采用遥感信息和地面观测资料相结合的方法(Dardel等,2014; Lawley等,2016; Yang等,2012),对遥感反演和提取的参数进行充分的地面验证,尽可能准确地获取生态保护修复项目监测和绩效评价所需要的数据。基于遥感技术提取的反映山水林田湖草生态保护修复工程实施效果的指标,各指标之间权重的确定需要相关领域的专家基于地面实测数据才能给出合理的数值范围。

(2) 遥感技术所能提供的监测山水林田湖草生态保护修复项目的指标以及辅助绩效评价的指标都是有限的。山水林田湖草生态保护修复项目实施效果的指标包括生态效果、经济效果、社会效果3个方面(Martin和Lyons,2018)。目前遥感技术的应用主要体现在生态效果的评价中,而经济效果和社会效果的评价更多的是使用统计数据,遥感数据的使用十分有限(胡霞和杨春华,2014; 张峰和李珍存,2006)。

(3) 遥感参数的使用需要加强与生态环境学科进一步广泛深入的交叉研究。通过对遥感影像上所表现的色调、纹理、形状、光谱特征、热辐

射特征等信息的充分挖掘,采用数据融合以及各种信息提取技术,可以获得很多与生态保护修复工程监测以及绩效评价有关的指标,但是与生态修复项目的实际需求相比,这些指标还是存在较大的局限性(Berni等,2009; Asokan和Anitha,2019; Damm等,2018)。例如:遥感技术在监测土地覆盖分类、植被长势和水质等方面已经能提供一个较好的定性分析结果,但是对其进行定量、客观和系统的评价,还需要进一步研究。此外,有些反映山水林田湖草生态保护修复工程区生态环境质量的指标(如生物多样性、群落组成,土壤剖面结构、理化特性等),很难通过遥感手段精确获取,需要进一步挖掘和探索可用于监测和评价生态保护修复项目的遥感参量。

因此,为了进一步提高遥感数据服务于山水林田湖草生态保护修复项目监测和绩效评价的广度和深度,一方面要从算法和数据源出发,从遥感数据中挖掘出更多有关山水林田湖草生态保护修复项目的信息;另一方面,要加强遥感数据与传统调查数据的结合,进一步挖掘和探索新的可业务化的遥感评价参量,形成更系统、完整的山水林田湖草生态保护修复项目监测和评价。

参考文献(References)

- Andrés-Costa M J, Pascual-Aguilar J, Andreu V and Picó Y. 2017. Assessing drugs of abuse distribution in Turia River based on geographic information system and liquid chromatography mass spectrometry. *Science of the Total Environment*, 609: 360-369 [DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.07.123]
- Asokan A and Anitha J. 2019. Change detection techniques for remote sensing applications: a survey. *Earth Science Informatics*, 12(2): 143-160 [DOI: 10.1007/s12145-019-00380-5]
- Beaton A, Whaley R, Corston K and Kenny F. 2019. Identifying historic river ice breakup timing using MODIS and Google Earth Engine in support of operational flood monitoring in Northern Ontario. *Remote Sensing of Environment*, 224: 352-364 [DOI: 10.1016/j.rse.2019.02.011]
- Berni J A J, Zarco-Tejada P J, Suarez L and Fereres E. 2009. Thermal and narrowband multispectral remote sensing for vegetation monitoring from an Unmanned Aerial Vehicle. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47(3): 722-738 [DOI: 10.1109/TGRS.2008.2010457]
- Biswal S S, Raval S and Gorai A K. 2019. Delineation and mapping of coal mine fire using remote sensing data—a review. *International Journal of Remote Sensing*, 40(17): 6499-6529 [DOI: 10.1080/

- 01431161.2018.1547455]
- Bupphawat W, Kasetkasem T, Kumazawa I, Rakwatin P and Chanwimaluang T. 2017. Super-resolution land cover mapping based on deep learning and level set method//2017 14th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology. Phuket: IEEE [DOI: 10.1109/ECTICon.2017.8096298]
- Chen J H and You Z. 2019. Scientific connotation and practical paths about the principle of 'taking mountains, rivers, forests, farmlands, lakes, and grasslands as a life community'. *China Population, Resources and Environment*, 29(2): 1-6 (成金华, 尤喆. 2019. “山水林田湖草是生命共同体”原则的科学内涵与实践路径. *中国人口·资源与环境*, 29(2): 1-6) [DOI: 10.12062/cpre.20181121]
- Chen W, Sakai T, Moriya K, Koyama L and Cao C X. 2013. Estimation of vegetation coverage in semi-arid sandy land based on multivariate statistical modeling using remote sensing data. *Environmental Modeling and Assessment*, 18(5): 547-558. [DOI: 10.1007/s10666-013-9359-1]
- Chen Y H, Feng T, Shi P J and Wang J F. 2006. Classification of remote sensing image based on object oriented and class rules. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 31(4): 316-320 (陈云浩, 冯通, 史培军, 王今飞. 2006. 基于面向对象和规则的遥感影像分类研究. *武汉大学学报(信息科学版)*, 31(4): 316-320) [DOI: 10.13203/j.whugis2006.04.009]
- Chen Y P, Ren J and Wang L. 2019. Review on monitoring method of ecological conservation and restoration project area based on multi-source remote sensing data. *Acta Ecologica Sinica*, 39(23): 8789-8797 (陈元鹏, 任佳, 王力. 2019. 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*, 39(23): 8789-8797) [DOI: 10.5846/stxb201905301135]
- Cheng F Y, Liu S L, Zhang Y Q, Yin Y J and Hou X Y. 2017. Effects of land-use change on net primary productivity in Beijing based on the MODIS series. *Acta Ecologica Sinica*, 37(18): 5924-5934 (成方妍, 刘世梁, 张月秋, 尹艺洁, 侯笑云. 2017. 基于MODIS序列的北京市土地利用变化对净初级生产力的影响. *生态学报*, 37(18): 5924-5934) [DOI: 10.5846/stxb201606301342]
- Dai S P, Yi X P, Luo H X, Li H L, Li M F, Zheng Q and Hu Y Y. 2021. Mapping Land Use in Hainan Island Based on Google Earth Engine and Landsat Time Series Data. *Chinese Journal of Tropical Crop*, 42(11): 3351-3357 (戴声佩, 易小平, 罗红霞, 李海亮, 李茂芬, 郑倩, 胡盈盈. 2021. 基于GEE和Landsat时间序列数据的海南岛土地利用分类研究. *热带作物学报*, 42(11): 3351-3357) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2021.11.038]
- Damm A, Paul-Limoges E, Haghighi E, Simmer C, Morsdorf F, Schneider F D, Van Der Tol C, Migliavacca M and Rascher U. 2018. Remote sensing of plant-water relations: an overview and future perspectives. *Journal of Plant Physiology*, 227: 3-19 [DOI: 10.1016/j.jplph.2018.04.012]
- Dao X, Huo X Q, Zhang L L, Ma L J, Zhang X and Xia X. 2018. Overview of main soil element heavy metal monitoring technology and difficulties in China. *Environmental Monitoring in China*, 34(5): 12-21 (刁谔, 霍晓芹, 张霖琳, 马莉娟, 张霞, 夏新. 2018. 我国土壤中主要元素监测技术及难点. *中国环境监测*, 34(5): 12-21) [DOI: 10.19316/j.issn.1002-6002.2018.05.03]
- Dardel C, Kergoat L, Hiernaux P, Mougin E, Grippa M and Tucker C J. 2014. Re-greening Sahel: 30 years of remote sensing data and field observations (Mali, Niger). *Remote Sensing of Environment*, 140: 350-364 [DOI: 10.1016/j.rse.2013.09.011]
- Di K C, Li D R and Li D Y. 2000. Study of remote sensing image classification based on spatial data mining techniques. *Journal of Wuhan Technical University of Surveying and Mapping*, 25(1): 42-48 (邸凯昌, 李德仁, 李德毅. 2000. 基于空间数据发掘的遥感图像分类方法研究. *武汉测绘科技大学学报*, 25(1): 42-48) [DOI: 10.13203/j.whugis2000.01.008]
- Ding M J, Qiu Z F, Zhang H L, Li Z X and Mao Y. 2019. Inversion Algorithm for Turbidity of Bohai and Yellow Swas Based on NPP-VIIRS Satellite Data. *Acta Optica Sinica*, 39(6): 9 (丁梦娇, 丘仲锋, 张海龙, 李兆鑫, 毛颖. 2019. 基于NPP-VIIRS卫星数据的渤海黄海浊度反演算法研究. *光学学报*, 39(6): 1-9) [DOI: 10.3788/AOS201939.0601002]
- Du W J, Li S M, Li H, Sun D F and Zhou L D. 2010. Spectral characteristics analysis and remote sensing inversion of water quality parameters in Han Shiqiao Wetland. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 30(3): 757-761 (杜为静, 李淑敏, 李红, 孙丹峰, 周连第. 2010. 汉石桥湿地水质参数光谱分析与遥感反演. *光谱学与光谱分析*, 30(3): 757-761) [DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2010)03-0757-05]
- Frolking S, Qiu J J, Boles S, Xiao X M, Liu J Y, Zhuang Y H, Li C S and Qin X G. 2002. Combining remote sensing and ground census data to develop new maps of the distribution of rice agriculture in China. *Global Biogeochemical Cycles*, 16(4): 1091 [DOI: 10.1029/2001GB001425]
- Gidudu A and Heinz R. 2007. Land cover mapping: optimizing remote sensing data for SVM classification. *Journal of Remote Sensing*, 11(5): 694-701 (Gidudu A 和 Heinz R. 2007. 土地覆盖制图: 基于最优化遥感数据的支撑向量机分类. *遥感学报*, 11(5): 694-701) [DOI: 10.11834/jrs.20070595]
- Gorelick N, Hancher M, Dixon M, Ilyushchenko S, Thau D and Moore R. 2017. Google earth engine: planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202: 18-27 [DOI: 10.1016/j.rse.2017.06.031]
- Hansen M C and Reed B. 2000. A comparison of the IGBP DISCover and University of Maryland 1 km global land cover products. *International Journal of Remote Sensing*, 21(6/7): 1365-1373 [DOI: 10.1080/014311600210218]
- He L, Tong L and Li Y X. 2015. Remote sensing monitoring and spatial character analysis for water quality of Kuncheng Lake. *Science of Surveying and Mapping*, 40(4): 58-62 (何磊, 童玲, 李玉

- 霞. 2015. 昆承湖水质状况遥感监测与空间特征分析. 测绘科学, 40(4): 58-62 [DOI: 10.16251/j.cnki.1009-2307.2015.04.013]
- Hu X and Yang C H. 2014. Application of remote sensing on terrestrial ecosystem restoration. Environmental Science Survey, 33(3): 52-56 (胡霞, 杨春华. 2014. 遥感技术在陆地生态系统修复中的应用. 环境科学导刊, 33(3): 52-56) [DOI: 10.13623/j.cnki.hkdk.2014.03.013]
- Huang C, Yang Q, Guo Y, Zhang Y and Guo L. 2020. The pattern, change and driven factors of vegetation cover in the Qin Mountains region. Scientific Reports, 10(1): 20591 [DOI: 1-11.10.1038/s41598-020-75845-5]
- Jiang L L, Jiapaer N, Bao A M, Guo H and Ndayisaba F. 2017. Vegetation dynamics and responses to climate change and human activities in Central Asia. Science of the Total Environment, 599-600: 967-980 [DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.05.012]
- Jin S Y, Zhang S Y, Ma Z J and Zhang P. 2015. Water consumption in Inner Mongolian reach of the Yellow River since integrated water regulation. Acta Geographica Sinica, 70(3): 501-508 (金双彦, 张遂业, 马志瑾, 张萍. 2015. 水量统一调度以来黄河内蒙古河段耗水量分析. 地理学报, 70(3): 501-508) [DOI: 10.11821/dlxb201503012]
- Kong L Q, Zheng H and Ouyang Z Y. 2019. Ecological protection and restoration of forest, wetland, grassland and cropland based on the perspective of ecosystem services: a case study in Dongting Lake Watershed. Acta Ecologica Sinica, 39(23): 8903-8910 (孔令桥, 郑华, 欧阳志云. 2019. 基于生态系统服务视角的山水林田湖草生态保护与修复——以洞庭湖流域为例. 生态学报, 39(23): 8903-8910) [DOI: 10.5846/stxb201905301137]
- Lawley V, Lewis M, Clarke K and Ostendorf B. 2016. Site-based and remote sensing methods for monitoring indicators of vegetation condition: an Australian review. Ecological Indicators, 60: 1273-1283 [DOI: 10.1016/j.ecolind.2015.03.021].
- Li H J, Yu Z R, Liang J and Du Y M. 2019. Study on the unified standard system of ecological protection and rehabilitation of mountain-river-forest-farmland-lake-grass. Acta Ecologica Sinica, 39(23): 8771-8779 (李红举, 宇振荣, 梁军, 杜亚敏. 2019. 统一山水林田湖草生态保护修复标准体系研究. 生态学报, 39(23): 8771-8779) [DOI: 10.5846/stxb201906031170]
- Li J S, Wang S L, Wu Y H, Zhang B, Chen X L, Zhang F F, Shen Q, Peng D L and Tian L Q. 2016. Modis observations of water color of the largest 10 lakes in china between 2000 and 2012. International Journal of Digital Earth, 9(8): 788-805. [DOI: 10.1080/17538947.2016.1139637]
- Li J. 2007. High-resolution satellite imagery has given birth to the era of satellite photogrammetry. Remote Sensing Information, (3): 89-90 (李静. 2007. 高分辨率卫星影像催生卫星摄影测量时代. 遥感信息, (3): 89-90)
- Lin C H, Zhu S J, Zhou T, Ba M K and Zhao Y. 2018. The extraction of vegetation recovery rate in soil and water conservation based on the technology of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) remote sensing. Research of Soil and Water Conservation, 25(6): 211-215 (林成行, 朱首军, 周涛, 巴明坤, 赵宇. 2018. 基于无人机遥感技术的水土保持植被恢复率提取. 水土保持研究, 25(6): 211-215) [DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2018.06.031]
- Liu J Y and Buheaoier. 2000. Study on spatial-temporal feature of modern land-use change in China: using remote sensing techniques. Quaternary Sciences, 20(3): 229-239 (刘纪远, 布和敖斯尔. 2000. 中国土地利用变化现代过程时空特征的研究——基于卫星遥感数据. 第四纪研究, 20(3): 229-239) [http://www.igg-journals.cn/article/id/dsjyj_9461]
- Liu S L, Dong Y H, Sun Y X and Shi F N. 2019. Priority area of mountains-rivers-forests-farmlands-lakes-grasslands based on the improvement of ecosystem services: a case study of Guizhou Province. Acta Ecologica Sinica, 39(23): 8957-8965 (刘世梁, 董玉红, 孙永秀, 史芳宁. 2019. 基于生态系统服务提升的山水林田湖草优先区分析——以贵州省为例. 生态学报, 39(23): 8957-8965) [DOI: 10.5846/stxb201905301140]
- Liu W T, Li S H and Qin Y C. 2018. Automatic building roof extraction with fully convolutional neural network. Journal of Geo-Information Science, 20(11): 1562-1570 (刘文涛, 李世华, 覃驭楚. 2018. 基于全卷积神经网络的建筑物屋顶自动提取. 地球信息科学学报, 20(11): 1562-1570) [DOI: 10.12082/dqxxkx.2018.180159]
- Liu X F, Hu B Y and Zhang D H. 2019. Differences in monitoring vegetation dynamics between moderate resolution imaging spectroradiometer collection 5 and collection 6 vegetation index products on the Loess Plateau, China. International Journal of Remote Sensing, 40(15): 5957-5972 [DOI: 10.1080/01431161.2019.1584928]
- Lu M, Fu B L, He H C, Xie S Y, Qiu J S, Sun X D, Gong H Y, Lao Z N and Zuo P P. 2021. Water surface monitoring and water quality parameters inversion of Lijiang River based on multi-temporal active and passive remote sensing, 2016-2020. Journal of Lake Sciences, 33(3): 687-705 (刘曼, 付波霖, 何宏昌, 解淑毓, 仇继圣, 孙习东, 龚焱云, 劳植楠, 左萍萍. 2021. 基于多时相主动被动遥感的漓江水面监测与水质参数反演(2016—2020年). 湖泊科学, 33(3): 687-705) [DOI: 10.18307/2021.0306]
- Luo J C, Zhou C H and Yang Y. 2001. ANN remote sensing classification model and its integration approach with geo-knowledge. Journal of Remote Sensing, 5(2): 122-129 (骆剑承, 周成虎, 杨艳. 2001. 神经网络遥感影像分类模型及其与知识集成方法研究. 遥感学报, 5(2): 122-129)
- Luo M, Yu E Y, Zhou Y, Ying L X, Wang J and Wu G. 2019. Distribution and technical strategies of ecological protection and restoration projects for mountains-rivers-forests-farmlands-lakes-grasslands. Acta Ecologica Sinica, 39(23): 8692-8701 (罗明, 于恩逸, 周妍, 应凌霄, 王军, 吴钢. 2019. 山水林田湖草生态保护修复试点工程布局及技术策略. 生态学报, 39(23): 8692-8701) [DOI: 10.5846/stxb201905291108]

- Luo Y F, Zheng Q, Peng S Z and Mao Y L. 2014. Calculating regional groundwater evapotranspiration based on GIS. *Journal of Hydraulic Engineering*, 45(1): 79-86 (罗玉峰, 郑强, 彭世彰, 毛怡雷. 2014. 基于GIS的区域潜水蒸发计算. *水利学报*, 45(1): 79-86) [DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2014.01.011]
- Ma N, Hu Y F, Zhuang D F and Zhang X L. 2012. Vegetation coverage distribution and its changes in Plan Blue Banner based on remote sensing data and dimidiate pixel model. *Scientia Geographica Sinica*, 32(2): 251-256 (马娜, 胡云锋, 庄大方, 张学利. 2012. 基于遥感和像元二分模型的内蒙古正蓝旗植被覆盖度格局和动态变化. *地理科学*, 32(2): 251-256) [DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2012.02.014]
- Mao P, Lin A W, Yang Q and Zhu H J. 2017. Evaluation of ecological carrying capacity based on state-space method in the urban agglomeration in the middle reach of Yangtze River. *Geomatics and Spatial Information Technology*, 40(3): 37-41 (毛鹏, 林爱文, 杨倩, 朱洪洁. 2017. 基于状态空间法的长江中游城市群区域生态承载力评价. *测绘与空间地理信息*, 40(3): 37-41)
- Martin D M and Lyons J E. 2018. Monitoring the social benefits of ecological restoration. *Restoration Ecology*, 26(6): 1045-1050 [DOI: 10.1111/rec.12888]
- Moustakas A, Daliakopoulos I N and Benton T G. 2019. Data-driven competitive facilitative tree interactions and their implications on nature-based solutions. *Science of the Total Environment*, 651: 2269-2280 [DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.09.349]
- Mu Q Z, Zhao M S and Running S W. 2011. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm. *Remote Sensing of Environment*, 115(8): 1781-1800 [DOI: 10.1016/j.rse.2011.02.019]
- Niu Q F, Xiao X M, Zhang Y, Qin Y W, Dang X H, Wang J, Zou Z H, Doughty R B, Brandt M, Tong X W, Horion S, Fensholt R, Chen C, Myneni R B, Xu W H, Di G Z and Zhou X M. 2019. Ecological engineering projects increased vegetation cover, production, and biomass in semiarid and subhumid Northern China. *Land Degradation and Development*, 30(13): 1620-1631 [DOI: 10.1002/ldr.3351]
- Ogée J and Brunet Y. 2002. A forest floor model for heat and moisture including a litter layer. *Journal of Hydrology*, 255(1/4): 212-233 [DOI: 10.1016/S0022-1694(01)00515-7]
- Ouyang Z Y, Wang Q, Zheng H, Zhang F and Hou P. 2014. National ecosystem survey and assessment of China (2000-2010). *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, 29(4): 462-466 (欧阳志云, 王桥, 郑华, 张峰, 侯鹏. 2014. 全国生态环境十年变化(2000—2010年)遥感调查评估. *中国科学院院刊*, 29(4): 462-466) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-3045.2014.04.009]
- Ouyang Z Y, Zheng H, Xiao Y, Polasky S, Liu J G, Xu W H, Wang Q, Zhang L, Xiao Y, Rao E M, Jiang L, Lu F, Wang X K, Yang G B, Gong S H, Wu B F, Zeng Y, Yang W and Daily G C. 2016. Improvements in ecosystem services from investments in natural capital. *Science*, 352(6292): 1455-1459 [DOI: 10.1126/science.aaf2295]
- Pei H, Sun T J and Wang X Y. 2018. Object-oriented land use/cover classification based on texture features of Landsat 8 OLI image. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 34(2): 248-255 (裴欢, 孙天娇, 王晓妍. 2018. 基于landsat 8 oli影像纹理特征的面向对象土地利用/覆盖分类. *农业工程学报*, 34(2): 248-255) [DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2018.02.034]
- Pei J, Niu Z, Wang L, Huang N and Cao J H. 2018. Monitoring to variations of vegetation cover using long-term time series remote sensing data on the Google Earth Engine cloud platform. *Carsoologica Sinica*, 37(4): 608-616 (裴杰, 牛铮, 王力, 黄妮, 曹建华. 2018. 基于Google Earth Engine云平台的植被覆盖度变化长时间序列遥感监测. *中国岩溶*, 37(4): 608-616) [DOI: 10.11932/karst20180415]
- Pei J, Wang L, Wang X Y, Niu Z, Kelly M, Song X P, Huang N, Geng J, Tian H F, Yu Y, Xu S G, Wang L, Ying Q and Cao J H. 2019. Time series of Landsat imagery shows vegetation recovery in two fragile Karst watersheds in southwest China from 1988 to 2016. *Remote Sensing*, 11(17): 2044 [DOI: 10.3390/rs11172044]
- Qin Y W, Xiao X M, Dong J W, Zhang Y, Wu X C, Shimabukuro Y, Arai E, Biradar C, Wang J, Zou Z H, Liu F, Shi Z, Doughty R and Moore III B. 2019. Improved estimates of forest cover and loss in the Brazilian Amazon in 2000—2017. *Nature Sustainability*, 2(8): 764-772 [DOI: 10.1038/s41893-019-0336-9]
- Rodriguez-Galiano V F, Ghimire B, Rogan J, Chica-Olmo M and Rigol-Sanchez J P. 2012. An assessment of the effectiveness of a random forest classifier for land-cover classification. *Isprs Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 67: 93-104 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2011.11.002]
- Rokni K and Musa T A. 2019. Normalized difference vegetation change index: a technique for detecting vegetation changes using Landsat imagery. *Catena*, 178: 59-63. [DOI: 10.1016/j.catena.2019.03.007]
- Sagan V, Peterson K T, Maimaitijiang M, Sidike P, Sloan J, Greeling B A, Maalouf S and Adams C. 2020. Monitoring inland water quality using remote sensing: potential and limitations of spectral indices, bio-optical simulations, machine learning, and cloud computing. *Earth Science Reviews*, 205: 103187 [DOI: 10.1016/j.earsci-rev.2020.103187]
- Shen Q, Yao Y, Li J S, Zhang F F, Wang S L, Wu Y H, Ye H P and Zhang B. 2019. A CIE color purity algorithm to detect black and odorous water in urban rivers using high-resolution multispectral remote sensing images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 57(9): 6577-6590 [DOI: 10.1109/TGRS.2019.2907283]
- Shi W P. 2000. World satellite technology and application development in 1999. *Aerospace China*, (2): 8-10 (石卫平. 2000. 1999年世界卫星技术及应用发展动态. *中国航天*, (2): 8-10)

- Si J, Han P and Zhao C L. 2011. Review of water conservation value evaluation methods of forest and case study. *Journal of Natural Resources*, 26(12): 2100-2109 (司今, 韩鹏, 赵春龙. 2011. 森林水源涵养价值核算方法评述与实例研究. *自然资源学报*, 26(12): 2100-2109)
- Song X P, Hansen M C, Stehman S V, Potapov P V, Tyukavina A, Vermote E F and Townshend J R. 2018. Global land change from 1982 to 2016. *Nature*, 560(7720): 639-643 [DOI: 10.1038/s41586-018-0411-9]
- Sun G F, Tan X L, Yin L Y, Liu S C, Li Z Y, Chen X Z and Zhong X Q. 2018. Changes analysis of post-fire vegetation spectrum and index based on time series GF-1 WFV images. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 38(2): 511-517 (孙桂芬, 覃先林, 尹凌宇, 刘树超, 李增元, 陈小中, 钟祥清. 2018. 基于时序高分一号宽幅影像火后植被光谱及指数变化分析. *光谱学与光谱分析*, 38(2): 511-517) [DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2018)02-0511-07]
- Tao W K, Lang S, Olson W S, Meneghini R, Yang S, Simpson J, Kummerow C, Smith E and Halverson J. 2001. Retrieved vertical profiles of latent heat release using TRMM rainfall products for February 1998. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 40(6): 957-982 [DOI: 10.1175/1520-0450(2001)040<0957:RVPOLH>2.0.CO;2]
- Tian Y, Guo Z Q, Qiao Y C, Lei X and Xie F. 2015. Remote sensing of water quality monitoring in Guanting Reservoir. *Acta Ecologica Sinica*, 35(7): 2217-2226 (田野, 郭子祺, 乔彦超, 雷霞, 谢飞. 2015. 基于遥感的官厅水库水质监测研究. *生态学报*, 35(7): 2217-2226) [DOI: 10.5846/stxb201306071407]
- Tian Z X, Zan M and Wang J X. 2018. Studies on temporal and spatial variations of ecosystem productivity in Poyang Lake Basin based on MODIS data. *Ecology and Environment Sciences*, 27(10): 1933-1942 (田振兴, 竺梅, 汪进欣. 2018. 基于MODIS遥感数据的鄱阳湖流域生态系统生产力变化研究. *生态环境学报*, 27(10): 1933-1942) [DOI: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2018.10.019]
- Tong X W, Brandt M, Yue Y M, Horion S, Wang K L, Keersmaecker W D, Tian F, Schurgers G, Xiao X M, Luo Y Q, Chen C, Myneni R, Shi Z, Chen H S and Fensholt R. 2018. Increased vegetation growth and carbon stock in China karst via ecological engineering. *Nature Sustainability*, 1(1): 44-50 [DOI: 10.1038/s41893-017-0004-x]
- Tong, X Y, Xia, G S, Lu, Q, Shen, H, Li, S, You, S and Zhang, L. 2020. Land-cover classification with high-resolution remote sensing images using transferable deep models. *Remote Sensing of Environment*, 237: 111322. [DOI: 10.1016/j.rse.2019.111322]
- Vizzari M. 2022. PlanetScope, Sentinel-2, and Sentinel-1 Data Integration for Object-Based Land Cover Classification in Google Earth Engine. *Remote Sensing*, 14(11): 2628 [DOI: 10.3390/rs14112628]
- Wang J and Zhong L N. 2019. Application of ecosystem service theory for ecological protection and restoration of mountain-river-forest-field-lake-grassland. *Acta Ecologica Sinica*, 39(23): 8702-8708 (王军, 钟莉娜. 2019. 生态系统服务理论与山水林田湖草生态保护修复的应用. *生态学报*, 39(23): 8702-8708) [DOI: 10.5846/stxb201905291110]
- Wang J L, Cheng K, Zhu J X and Liu Q. 2018. Development and pattern analysis of Mongolian land cover data products with 30 meters resolution. *Journal of Geo-Information Science*, 20(9): 1263-1273 (王卷乐, 程凯, 祝俊祥, 刘清. 2018. 蒙古国30米分辨率土地覆盖产品研制与空间格局分析. *地球信息科学学报*, 20(9): 1263-1273) [DOI: 10.12082/dqxxkx.2018.180153]
- Wang K L, Li H T, Wu A M, Li M Z, Zhou Y and Li W P. 2018. An analysis of the evolution of Baiyangdian Wetlands in Hebei Province with artificial recharge. *Acta Geoscientia Sinica*, 39(5): 549-558 (王凯霖, 李海涛, 吴爱民, 李木子, 周艺, 李文鹏. 2018. 人工补水条件下白洋淀湿地演变研究. *地球学报*, 39(5): 549-558) [DOI: 10.3975/cagsb.2018.071102]
- Wang K, Guo Y Q, Zhang J J, Zhang Y N and Liu S D. 2019. Evaluation on the implementation effect of the pilot project for ecological protection and restoration of multi ecological elements based on spatio-temporal analysis: a case study of Ganzhou. *Acta Ecologica Sinica*, 39(23): 8867-8877 (王柯, 郭义强, 张建军, 张亚男, 刘时栋. 2019. 基于时空分析的生态保护与修复试点工程实施效果评估——以赣州市为例. *生态学报*, 39(23): 8867-8877) [DOI: 10.5846/stxb201905291126]
- Wang L, Duan W S, Yu B, Ying Q, Yang H B and Lei Y H. 2019. Exploring the response mechanism of remote sensing images in monitoring fixed assets investment project in terms of building detection. *IEEE Access*, 7: 167919-167929 [DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2948060]
- Wei L L, Li L B, Lin Y, Wu Y and Qi X H. 2018. Evaluation of the ecological security of Urban Agglomeration on Min Delta based on ecological footprint. *Acta Ecologica Sinica*, 38(12): 4317-4326 (魏黎灵, 李岚彬, 林月, 吴仪, 祁新华. 2018. 基于生态足迹法的闽三角城市群生态安全评价. *生态学报*, 38(12): 4317-4326) [DOI: 10.5846/stxb201801200156]
- Wu G, Zhao M and Wang C X. 2019. Research on the theoretical support system of ecological protection and restoration of full-array ecosystems. *Acta Ecologica Sinica*, 39(23): 8685-8691 (吴钢, 赵萌, 王辰星. 2019. 山水林田湖草生态保护修复的理论支撑体系研究. *生态学报*, 39(23): 8685-8691) [DOI: 10.5846/stxb201911212525]
- Wu J H, Chen B, Reynolds G, Xie J, Liang S L, O'Brien M J and Hector A. 2020. Monitoring tropical forest degradation and restoration with satellite remote sensing: a test using Sabah Biodiversity Experiment. *Advances in Ecological Research*, 62: 117-146 [DOI: 10.1016/bs.aecr.2020.01.005]
- Xiao J F, Chevallier F, Gomez C, Guanter, L, Hicke J A, Huete A R, Ichii K, Ni W J, Pang Y, Rahman A F, Sun G Q, Yuan W P, Zhang L and Zhang X Y. 2019. Remote sensing of the terrestrial carbon cycle: a review of advances over 50 years. *Remote Sensing of Environment*, 233: 111383 [DOI: 10.1016/j.rse.2019.111383]

- Xiong, J, Thenkabail P S, Tilton J C, Gumma M K, Teluguntla P, Oliphant A, Congalton R G, Yadav K and Gorelick N. 2017. Nominal 30-m cropland extent map of continental Africa by integrating pixel-based and object-based algorithms using Sentinel-2 and Landsat-8 data on Google Earth Engine. *Remote Sensing*, 9(10): 1065 [DOI: 10.3390/rs9101065]
- Xu Z Y, Shen Z F, Li Y, Zhao L F, Ke Y M, Li L L and Wen Q. 2022. Classification of high-resolution remote sensing images based on enhanced DeepLab algorithm and adaptive loss function. *National Remote Sensing Bulletin*, 26(2): 406-415 (许泽宇, 沈占锋, 李杨, 赵丽芳, 柯映明, 李苓苓, 温奇. 2022. 增强型DeepLab算法和自适应损失函数的高分辨率遥感影像分类. *遥感学报*, 26(2): 406-415) [DOI: 10.11834/jrs.20209200]
- Yang J, Weisberg P J and Bristow N A. 2012. Landsat remote sensing approaches for monitoring long-term tree cover dynamics in semi-arid woodlands: comparison of vegetation indices and spectral mixture analysis. *Remote Sensing of Environment*, 119: 62-71 [DOI: 10.1016/j.rse.2011.12.004]
- Ye Y M, Chen S, Bian W, Gao S C, Ding Q L and Hao P. 2019. Ecological restoration strategies of mountains-rivers-forests-farmlands-lakes-grasslands Life Community in Mountain Tai region based on the principle of restoration ecology. *Acta Ecologica Sinica*, 39(23): 8878-8885 (叶艳妹, 陈莎, 边微, 高世昌, 丁庆龙, 郝朋. 2019. 基于恢复生态学的泰山地区“山水林田湖草”生态修复研究. *生态学报*, 39(23): 8878-8885) [DOI: 10.5846/stxb201906011156]
- Yuan H H, Yang G J, Li C C, Wang Y J, Liu J G, Yu H Y, Feng H K, Xu B, Zhao X Q and Yang X D. 2017. Retrieving soybean leaf area index from unmanned aerial vehicle hyperspectral remote sensing: analysis of RF, ANN, and SVM regression models. *Remote Sensing*, 9(4): 309 [DOI: 10.3390/rs9040309]
- Zeng X J, Xing Y Q, Shan W, Zhang Y and Wang C Q. 2017. Soil water content retrieval based on Sentinel-1A and Landsat 8 image for Bei'an-Heihe Expressway. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 25(1): 118-126 (曾旭婧, 邢艳秋, 单炜, 张毅, 王长青. 2017. 基于Sentinel-1A与Landsat 8数据的北黑高速沿线地表土壤水分遥感反演方法研究. *中国生态农业学报*, 25(1): 118-126) [DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.160657]
- Zhang C, Sargent, I, Xin, P, Li, H and Atkinson, P M. 2019. Joint deep learning for land cover and land use classification. *Remote Sensing of Environment*, 221: 173-187. [DOI: 10.1016/j.rse.2018.11.014]
- Zhang C, Sargent I, Pan X, Li H P, Gardiner A, Hare J and Atkinson P M. 2018. An object-based convolutional neural network (OCNN) for urban land use classification. *Remote Sensing of Environment*, 216: 57-70 [DOI: 10.1016/j.rse.2018.06.034]
- Zhang F and Li Z C. 2006. Ecosystem recovery monitoring by remote sensing for soil and water conservation in Liangdang County. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 26(6): 72-78 (张峰, 李珍存. 2006. 两当县水土保持生态修复遥感监测技术初探. *水土保持通报*, 26(6): 72-78) [DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2006.06.019]
- Zhang W, Ren Y, Ma X L and Hu Y J. 2018. Estimation of soil moisture with drought indices in Huaihe River Basin of East China. *Remote Sensing For Land and Resources*, 30(2): 73-79 (张文, 任燕, 马晓琳, 胡艺杰. 2018. 基于综合干旱指数的淮河流域土壤含水量反演. *国土资源遥感*, 30(2): 73-79) [DOI: 10.6046/gtzyyg.2018.02.10]
- Zhu X X, Ning X G and Wang H. 2021. Land use classification for optimization segmentation based on high-precision land cover data. *Science of Surveying and Mapping*, 46(6): 140-149 (朱晓霞, 宁晓刚, 王浩, 张翰超. 2021. 高精度地表覆盖数据优化分割的土地利用分类. *测绘科学*, 46(6): 140-149) [DOI: 10.16251/j.cnki.1009-2307.2021.06.021]

Remote sensing technology for monitoring and auxiliary performance evaluation of ecological protection and restoration projects for mountains, rivers, forests, farmlands, lakes, and grasslands

WANG Li¹, HUANG Ni¹, NIU Zheng^{1,2}, LUO Ming^{3,4}, CHEN Yuanpeng^{3,4}, GUO Yiqiang^{3,4},
LEI Yahui⁵, FU Qinghua⁶, YING Lingxiao^{3,4}

1. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

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

3. Key Laboratory of Land Consolidation and Rehabilitation, Ministry of Natural Resources, Beijing 100083, China;

4. Land Consolidation and Rehabilitation Center, Ministry of Natural Resource, Beijing 100035, China;

5. School of Land Science and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

6. Pearl River Hydraulic Research Institute, Pearl River Water Resources Commission, Guangzhou 510611, China

Abstract: Ecological protection and restoration of mountains, rivers, forests, farmlands, lakes, and grasslands is an important measure to

ensure national ecological security. In this study, we developed scientific and rational monitoring and performance evaluation methods to ensure successful implementation of ecological protection and restoration projects and sustainable development of ecological restoration achievements.

This study uses a combination of literature review and case analysis to discuss the specific application of remote sensing technology in the monitoring and performance evaluation of ecological restoration of mountains, rivers, forests, farmlands, lakes, and grasslands.

Based on the pattern and quality of regional ecosystem, the land cover type, vegetation growth, and water quality parameters obtained from remote sensing data are selected as evaluation indices to monitor ecological elements of mountains, rivers, forests, farmlands, lakes, and grasslands in general. To maintain and improve the regional ecosystem services, we select water conservation, soil erosion, ecosystem bearing capacity, and other indicators to discuss the role of remote sensing data in assisting the performance evaluation of ecological protection and restoration projects of mountains, rivers, forests, farmlands, lakes, and grasslands.

Results show that actively exploring new remote sensing data mining methods, which combine remote sensing technology and traditional investigation methods, is expected to form a more objective and faster executable monitoring and performance evaluation system for ecological protection and restoration projects of mountains, rivers, forests, farmlands, lakes, and grasslands.

Key words: ecological protection and restoration, “mountains, rivers, forests, farmlands, lakes, and grasslands”, remote sensing monitoring, performance evaluation

Supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFC0502501); National Natural Science Foundation of China (No. 41871347)