

百种中国杰出学术期刊

遥感学报

Yaogan Xuebao

第 24 卷 第 6 期 2020 年 6 月

目 次

学者观点

生态系统遥感:内涵与挑战 吴炳方,曾源,闫娜娜,曾红伟,赵旦,张森 (609)

综述

2019 年中国陆表定量遥感发展综述
梁顺林,白瑞,陈晓娜,程洁,范闻捷,何涛,贾坤,江波,蒋玲梅,焦子锦,刘元波,倪文俭,邱凤,宋柳霖,
孙林,唐伯惠,闻建光,吴桂平,谢东辉,姚云军,袁文平,张永光,张玉珍,张云腾,张晓通,赵天杰,赵祥 (618)
中国空间辐射测量基准技术 卢乃锰,丁雷,郑小兵,
叶新,李传荣,吕达仁,张鹏,胡秀清,周成虎,尤政,房建成,龚建雅,蒋兴伟,李建军,马灵玲,徐娜 (672)
汶川地震前多圈层短一临遥感异常回顾及其时空关联性
何苗,吴立新,崔静,王威,齐源,毛文飞,苗则朗,陈必焰,申旭辉 (681)
测绘地物波谱本底数据库 钟守熠,肖青,闻建光,
郑兴明,马明国,屈永华,郑柯,池天河,唐勇,游冬琴,郝大磊,程娟,贺敏,姜涛,晋锐,姚晓婧,赵理君 (701)

技术方法

联合卷积神经网络与集成学习的遥感影像场景分类 余东行,张保明,赵传,郭海涛,卢俊 (717)
面向类型特征的自适应阈值遥感影像变化检测 刘红超,张磊 (728)
国产机载大视场三线阵 CCD 相机几何标定 王涛,张艳,张永生,莫德林,于英 (739)

遥感应用

应用随机辐射传输模型反演云南松林分郁闭度 李骁尧,黄华国 (752)
风云三号卫星被动微波反演海洋上空云液态水含量 婁芳丽,商建,吴琼,谷松岩 (766)
滑坡蠕变与遥感影像上植被异常关系 郭忻怡,郭擎,冯钟葵 (776)

本期责任编辑:尤笛

《遥感学报》网络版:www.jors.cn

《遥感学报》微信公众号及官网



订阅号



官网

JOURNAL OF REMOTE SENSING (Chinese)

(Vol. 24 No.6 June, 2020)

CONTENTS

Scholar's View Point

Remote sensing for ecosystem: Definition and prospects
..... WU Bingfang, ZENG Yuan, YAN Nana, ZENG Hongwei, ZHAO Dan, ZHANG Miao (617)

Review

Review of China's land surface quantitative remote sensing development in 2019
LIANG Shunlin, BAI Rui, CHEN Xiaona, CHENG Jie, FAN Wenjie, HE Tao, JIA Kun, JIANG Bo,
JIANG Lingmei, JIAO Ziti, LIU Yuanbo, NI Wenjian, QIU Feng, SONG Liulin, SUN Lin, TANG Bohui,
WEN Jianguang, WU Guiping, XIE Donghui, YAO Yunjun, YUAN Wenping, ZHANG Yongguang,
ZHANG Yuzhen, ZHANG Yunteng, ZHANG Xiaotong, ZHAO Tianjie, ZHAO Xiang (671)

Introduction of the radiometric benchmark satellite being developed in China for remote sensing LU Naimeng,
DING Lei, ZHENG Xiaobing, YE Xin, LI Chuanrong, LYU Daren, ZHANG Peng, HU Xiuqing, ZHOU Chenghu,
YOU Zheng, FANG Jiancheng, GONG Jianya, JIANG Xingwei, LI Jianjun, MA Lingling, XU Na (680)

Remote sensing anomalies of multiple geospheres before the Wenchuan earthquake and its spatiotemporal correlations
..... HE Miao,
WU Lixin, CUI Jing, WANG Wei, QI Yuan, MAO Wenfei, MIAO Zelang, CHEN Biyan, SHEN Xuhui (700)

Design and realization of ground object background spectral library for surveying and mapping ... ZHONG Shouyi,
XIAO Qing, WEN Jianguang, ZHENG Xingming, MA Mingguo, QU Yonghua, ZHENG Ke, CHI Tianhe, TANG Yong,
YOU Dongqin, HAO Dalei, CHENG Juan, HE Min, JIANG Tao, JIN Rui, YAO Xiaojing, ZHAO Lijun (716)

Technology and Methodology

Scene classification of remote sensing image using ensemble convolutional neural network
..... YU Donghang, ZHANG Baoming, ZHAO Chuan, GUO Haitao, LU Jun (727)

Adaptive threshold change detection based on type feature for remote sensing image
..... LIU Hongchao, ZHANG Lei (738)

Geometric calibration of domestic airborne wide-field three-linear CCD camera
..... WANG Tao, ZHANG Yan, ZHANG Yongsheng, MO Delin, YU Ying (750)

Remote Sensing Applications

Retrieving canopy closure of Yunnan pine forests by using stochastic radiative transfer model
..... LI Xiaoyao, HUANG Huaguo (765)

Retrieval of cloud liquid water content over global oceans using FY-3C/3D microwave imager
..... DOU Fangli, SHANG Jian, WU Qiong, GU Songyan (775)

Relationship between landslide creep and vegetation anomalies in remote sensing images
..... GUO Xinyi, GUO Qing, FENG Zhongkui (786)

生态系统遥感:内涵与挑战

吴炳方^{1,2,3}, 曾源^{1,2,3}, 闫娜娜^{1,2}, 曾红伟^{1,2,3}, 赵旦^{1,2}, 张淼^{1,2}

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 生态系统遥感研究室, 北京 100101;

2. 中国生态学会 生态遥感专业委员会, 北京 100101;

3. 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 生态系统遥感以生态系统为对象, 研究生态系统类型、格局、功能、服务及其过程的遥感解析方法, 发展遥感驱动的生态系统服务评估方法, 揭示贯穿在生态系统类型、格局、功能、服务中的深层次生态系统过程与隐性表现。新一代卫星和传感器为生态系统遥感提供了全新的数据源。生态系统类型和格局辨识能力还有待提高, 从而对智能信息提取提出了更高的要求。生态系统功能监测方面还需要充分挖掘遥感数据的深层隐含特征, 发展出一些易于处理且能够反映生态系统功能特征的新指标。生态系统服务评估方面仍需, 发展遥感驱动的新的生态系统评估模型。与云平台的结合是生态系统遥感的未来发展方向, 为全民参与生态环境保护及监督提供了契机, 也可对重大工程的生态效应评估提供更丰富的数据支撑。

关键词: 生态系统, 遥感, 生态系统功能, 生态系统服务, 生态云

引用格式: 吴炳方, 曾源, 闫娜娜, 曾红伟, 赵旦, 张淼. 2020. 生态系统遥感: 内涵与挑战. 遥感学报, 24(6): 609-617

Wu B F, Zeng Y, Yan N N, Zeng H W, Zhao D and Zhang M. 2020. Remote sensing for ecosystem: Definition and prospects. *Journal of Remote Sensing(Chinese)*, 24(6): 609-617[DOI: 10.11834/jrs.20209247]

1 引言

生态系统指由生物群落与无机环境构成的统一整体 (Tansley, 1935)。当前, 生态系统退化是全球面临的巨大挑战, 一旦退化到不可逆的程度, 人类将失去赖以生存的家园 (Rapport 等, 1998; 傅伯杰等, 2001)。了解和阐明生态系统的现状和趋势, 是维持生态系统健康和加强生态系统管理的科学保障。

局地观测并不能充分揭示生态系统格局的异质性及多样性特征, 在大的时空尺度上探讨生态系统格局时需要引入遥感, 以期获得空间连续的高精度生态系统结构、功能及其变化信息。近20年来, 遥感已经为生态系统研究和管理提供了大量的时间连续、空间一致的数据产品, 对生态学的发展和方法论创新起到了推动作用, 但在学术思路与两者结合方面仍未能摆脱原有学科的束缚。遥感仅作为基础数据的提供者, 只是一个数据源, 同地形图或降水资料一样, 根据生态学的要

求进行改造、简化或汇总。然而, 遥感的作用不应仅限于此, 生态系统的多样性、异质性及多尺度特征, 与遥感的光谱特征、空间分辨率、多时相有很大的契合度。生态系统遥感需要在方法论上摆脱原有学科思维的桎梏, 研究生态系统的类型、格局、功能、服务及其过程的遥感解析方法, 精细刻画生态系统结构和功能, 发展遥感驱动的生态系统服务评估方法, 深入分析贯穿在生态系统类型、格局、功能、服务中的深层次生态系统过程与隐性表现。

2 新的生态系统遥感数据源

生态系统遥感的发展取决于数据源。为应对全球变化和生态系统管理, 自2016年巴黎协定签订以来, 全球陆续发射了一批以生态系统为对象、针对性更强的卫星或传感器 (Stavros 等, 2017)。例如以冰、云和陆地高度为研究对象的ICESat2, 其搭载的地形激光测高系统 (ATLAS) 采用光子激光雷达技术, 能够获得精细的冰雪、植被、地

收稿日期: 2019-07-09; 预印本: 2019-12-31

基金项目: 国家重点研发计划(编号: 2016YFA0600304, 2016YFC0500201)

第一作者简介: 吴炳方, 1962年生, 男, 研究员, 研究方向为生态系统遥感、全球变化与大数据的理论和应用。E-mail: wubf@aircas.ac.cn

表、水体和云的高度信息；以生态系统碳循环为研究对象的温室气体观测卫星 GOSAT、轨道碳观测卫星 (OCO-2) 和二氧化碳监测科学实验卫星 (TanSat)，可对全球二氧化碳和甲烷等温室气体进行监测；搭载在国际空间站上的全球生态系统动态调查激光雷达传感器 (GEDI)、生态系统星载热辐射计 (ECOSTRESS)、第 3 代轨道碳观测传感器 (OCO-3)，可分别获得冠层垂直结构参数、热红外数据产品 (即表面温度, ET) 和二氧化碳等温室气体排放水平。

还有一批生态系统监测计划正在紧锣密鼓的筹划中。如美国地球同步碳循环观测研究项目 (GeoCARB)，旨在监测整个美洲的植物健康和植被压力，探讨自然资源、碳汇以及碳交换过程等 (Moore 等, 2018)；气溶胶—云—海洋生态系统卫星任务 (ACE)，将回答大气颗粒物和云对气候胁迫以及海洋生态系统的影响等相关科学问题 (Müller 等, 2019)；日本 JAXA 的高光谱成像仪 (HISUI)，在 VNIR/SWIR 波段可提供 185 个波段的地表反射率数据 (10 nm 光谱分辨率)，有助于解决地物的精细识别问题；同属 JAXA 的全球变化观测计划 (GCOM)，包括气候星 (SHIKISAI)、水资源星 (SHIZUKU) 等，重点关注全球变化 (Imaoka 等, 2010)；欧洲空间局“生命行星”计划下的生物量 (BIOMASS) 和植被荧光制图 (FLEX) 卫星都针对陆地森林生态系统的监测 (Quegan 等, 2019; Drusch 等, 2017)。

这些新的卫星和传感器将为生态系统遥感提供全新的数据源，将极大地推动并促进生态系统遥感的发展。同时，围绕生态系统监测与管理的需求，仍需进一步拓展卫星传感器设计、卫星发射计划等，有针对性的发展新型传感器和卫星计划，以实现数据产品质量的提升。

3 生态系统类型与格局识别

地球表面的生态系统多种多样，可根据其能量和物质运动状况以及生物、非生物成分，区分为不同类型 (欧阳志云 等, 2015)。生态系统类型目前还缺乏统一的分类体系，从而使得利用遥感进行生态系统类型识别时缺乏可参考的依据。土地利用与土地覆被遥感的长时间序列监测只能满足生态系统类型与格局识别以及变化过程评估的需求，如用于“生态十年”评估的陆地生态系统

类型就是在中国土地覆被 40 个类型的基础上 (吴炳方, 2017)，被整合成了 8 个一级和 22 个二级类 (Ouyang 等, 2016)。

以往土地利用与土地覆被遥感监测的范围、分辨率和类别数量是相互对应的。全球范围以低分辨率为主，如 GlobCover 是 22 个类别，分辨率为 300 m，时间跨度从 2005 年—2009 年 (Arino 等, 2007)。区域范围以中分辨率为主 (30 m)，但类别数量增加，如欧盟的 CORINE 土地覆被有 44 个类型，分辨率优于 50 m (Lavalley 等, 2002)。中国土地覆被数据集 (ChinaCover) 有 40 个类型，30 m 分辨率，时间跨度 25 年 (吴炳方 等, 2017)。范围更小时，分辨率和类别数量也相应提高，如黎巴嫩的土地覆被数据分辨率高达 1 m，类别数 72 个，且逐年更新 (www.cnrs.edu.lb[2019-07-09])。然而，随着数据共享和处理能力的提升，这一格局已被打破，如 2014 年发布的全球 30 m 土地覆被数据产品 (GlobeLand30) (Chen 等, 2015) 和 2019 年发布的全球 10 m 土地覆被数据集 (FROM-GLC10) (Gong 等, 2019)，均为 10 个类型，但范围已扩大到全球，还有 2000 年—2012 年全球森林覆盖变化过程数据 (Hansen 等, 2013)。随着计算能力的快速发展，生态系统类型与格局在宏观层面上的微观过程监测已成为一种趋势。

遥感醉心于土地利用与土地覆被监测，但为实现生态系统类型与格局识别还有一定距离，不能完全满足生态系统结构、功能、服务评估的需求 (Wulder 等, 2018)，对生态系统的结构辨识能力还有待提高，主要体现在：(1) 生态系统是生物与环境构成的统一整体，土地利用与土地覆被监测对气候特征、自然条件、地域特点和人类活动的影响考虑得不够，也不能反映如不当火灾和食草动物管理、土地利用形式转化、物种入侵 (Wang 等, 2017, 2018)、气候变化等引起的群落组成变化，从而导致的土地覆被变化 (Fasona 等, 2013; Ratnam 等, 2016)；(2) 对维系生态系统功能的微观格局刻画严重不足，如群落类型、植被格局的自组织、穴居动物活动的影响 (Tarnita 等, 2017)、生物多样性与稳定度 (Pringle 等, 2010; Bonachela 等, 2015; Tarnita 等, 2017) 等。从生态系统可持续发展的角度出发，发展生态系统微观结构的遥感监测方法是未来的重要任务。

智能信息提取是遥感大数据方法的明显特征和必然要求(吴炳方等, 2016)。近年来,深度学习方法逐渐被引入到图像分割、目标识别和分类中,利用机器学习的过程对图像所包含的具有生态学深层特征信息进行挖掘,开展高精度植被、水体、裸地等不同生态类型的分类以及重大生态工程、生态措施等目标的识别。由斯坦福大学组织的“ImageNet大规模视觉识别挑战赛”(Russakovsky等, 2015)的图像识别错误率从2012年的29.6%降到了2015年的3.6%,到2017年更是接近2%,充分显示了深度学习在目标识别中的作用。

4 生态系统功能监测

生态系统功能是生态系统所体现的各种功效或作用,主要表现在生物生产、能量流动、物质循环和信息传递等方面(Odum, 1971)。遥感通过生态参数的监测反映生态系统的功能特征。如利用粮食产量和蓄积量描述食物和木材产量;利用光合有效辐射吸收比率(FPAR)来表征植被光合作用能力;利用蒸散发表征生态系统水分消耗能力;利用生物量表征生态系统固碳能力;利用叶面积指数和植被覆盖度表征生态系统的水土保持能力等。

为了明确遥感在生态系统功能监测方面的作用,GCOS(2011)联合多家研究机构共同定义了49个气候基本变量(ECV),随后出现了26个水系统基本变量(EWV)(Lawford, 2014),21个生物多样性变量(EBV)(Pereira等, 2013)、31个海洋生态系统变量(eEOV)(Constable等, 2016)等。这些基本变量构成了生态系统功能的遥感指标体系。

针对这些基本变量,遥感生成了大量的时间序列参数数据产品,既能描述功能,又能刻画功能的时间变化过程,而且主要以全球尺度为主(Weiss等, 2007; Borak等, 2000)。如2000年至今的MODIS数据产品,包括陆地、大气和海洋共44种标准数据产品(Salomonsen等, 2006);自1999年开始的哥白尼计划中植被、能量平衡和水分共21种陆表数据产品(Verger等, 2014);利用多种地球同步卫星观测数据生成的8种全球陆表特征参数(GLASS)数据产品(梁顺林等, 2014),其部分参数甚至从1981年开始。也有主题

参数产品,如全球叶绿素荧光数据(Du等, 2018),还有区域范围的生态参数数据集,如ChinaCover就包括了8个生态参数,时间跨度为2000年—2015年(吴炳方等, 2019a)。这些生态参数数据产品的特点是时间连续、空间一致,但问题是分辨率较粗,既与生态系统类型的数据集在分辨率上不匹配,又不足以刻画生态系统功能的细部差异。大量的中高分辨率光学遥感数据(如陆地卫星数据)、微波遥感数据和激光雷达数据还没有成为生态参数监测的主流数据源,要将这些数据利用起来,需要突破多尺度数据融合和多源数据集成的技术(Huang等, 2015; 刘建波等, 2016; Schulz等, 2018; Zhang等, 2018)。欧盟从2015年哨兵2号传感器升空后就尝试生产高分辨率的生态参数(Frampton等, 2013; Gara等, 2019),以解决分辨率不匹配的问题。

另一个问题是现有的时间序列遥感数据产品多以卫星为导向,每种卫星观测数据都有一套各自的数据产品,各成体系,需要对这些不同源数据产品进行不确定分析以提高他们的协同使用能力(Fang等, 2013)。遥感数据产品生成方法应该以生态需求为目标,如CYCLOPES项目(Weiss等, 2007)、多传感器联合反演降水数据产品、基于遥感的区域蒸散监测方法(ETWatch)及其多尺度—多源数据协同的陆表蒸散数据产品(Wu等, 2012)。充分利用所有的遥感观测数据,发挥不同遥感观测数据的优势,已成为反演高精度、高分辨率遥感数据产品的主流途径。

基于时空连续的生态参数产品,可以结合生态学模型开展各种尺度的生态系统功能分析,以及变化过程与响应研究。如利用时间序列的MODIS和GLASS数据集评估气候变化对森林生态系统的生物物理效应(Feng等, 2016; Li等, 2015);利用AVHRR和MODIS的时间序列产品分析春季变暖对北半球植物生产力的季节性补偿效应(Buermann等, 2018);通过分析1981年以来的LAI时间序列数据,植被结构变化表明全球变绿了(Zhu等, 2016),并且显著增强了陆地碳汇(Chen等, 2019)。

然而,尽管遥感提供的参数产品很多,但对生态系统的功能刻画方面仍然不能满足需要,对生态系统的一些功能特征仍然缺乏有效的参数指标,如草地的可食草比例等,因此充分挖掘遥感

数据的深层隐含特征, 发展出一些易于处理且能够反映生态系统功能特征指标, 构建具有指示性意义的新型遥感指数产品, 将为生态参数指标的设计和监测提供新的解决途径。例如对全球陆表生态系统碳排放、植被健康、植被生态服务功能等具有重要影响的植被高度参数, 可通过新型星载激光雷达 (ICESat2 上的 ATLAS) 实现快速提取, 识别方法相对简单 (Tang 等, 2019; 李增元等, 2016); 又如用于粮食安全预警的作物生长早期耕地种植比例指数, 较传统的作物类型识别精度大幅度提高 (<http://cloud.CropWatch.com.cn> [2019-07-09])。

5 生态系统服务评估

生态系统服务是人类从生态系统中获得的各种惠益, 包括有形的物质产品供给与无形的服务提供两方面 (傅伯杰等, 2014)。生态系统服务是生态系统功能的表现, 但生态系统服务与生态系统功能并不一一对应, 生态系统服务的准确评估, 需要基础生态学的研究与观测, 并依赖于对生态系统的结构、功能和过程及其机理的深入定量化 (张志强等, 2001)。

联合国千年生态系统评估 (MA) 综合运用遥感获取的土地覆被和生态参数, 构建了生态系统的评估指标体系, 对全世界生态系统及其提供的服务功能 (例如洁净水、食物、林产品、洪水控制和自然资源) 状况与趋势进行了全面的科学评估, 并提出了恢复、保护或改善生态系统可持续利用状况的各种对策, 为后续国家尺度和全球尺度的生态系统遥感应用奠定了技术基础 (Carpenter 等, 2006)。

参照国际千年生态系统评估 (MA) 框架, 中国也开展了中国西部生态系统综合评估 (MAWEC) (刘纪远等, 2006)。以此为契机, 基于生态系统遥感的生态系统服务评估在中国得到了广泛关注, 形成的总体技术框架是首先利用土地覆被数据确定生态系统类型, 再利用生态参数对生态系统服务进行定量评估; 或将土地覆被和生态参数输入到生态服务评估过程模型中, 建立基于“参照系—现状—变化量”的生态系统质量评估模型, 进行遥感数据驱动的生态系统服务评估 (傅伯杰等, 2009; 欧阳志云等, 2014; 王桥等, 2016)。

然而由于生态系统评估模型的局限性, 使得生态系统遥感形成的大量生态参数并没有得到有效的利用, 植被指数、净初级生产力、地上生物量和植被覆盖度是被用得最多的生态参数。因此, 仍需深入分析生态系统深层次的过程与隐性表现及多尺度关联机制, 发展遥感驱动的新的生态系统评估模型, 如利用遥感得到的降雨和蒸散数据, 结合土地覆被数据评估可供人类消耗的水资源量 (Wu 等, 2018) 或权衡人类发展与生态保护 (Zeng 等, 2019) 或评估水分生产率 (Yan 等, 2015) 等模型, 分析生物入侵引起的草地生产率变化对水循环的影响 (Wang 等, 2018b)。

6 重大工程生态效应评估

生态系统安全是指自然和半自然生态系统的安全, 以及其对人类的影响。生态系统风险是指生态系统及其组分所承受的风险、干扰或灾害对生态系统结构和功能造成损害的可能性 (Barnhouse 等, 1992; 王根绪等, 2003)。生态系统安全与风险绝大部分是人类活动造成的, 尤其是各种规模宏大的重大工程。

为了改善人居环境与民生福祉, 中国上世纪中叶开始实施修建了大量的重大工程, 引发一些生态系统安全与风险问题, 有些在短期内就显现出来, 但有些在 10 年甚至更长的时间才得以显现, 如 1960 年代的海河治理工程的生态效应到 1990 年代才显现, “有河皆干、有水皆污” 是海河治理工程生态效应的真实表现。长时间序列的生态系统遥感能为重大工程生态效应评估提供重要依据。美国农业部发起的生态保护效果评估计划, 对美国的湿地保护区等生态保护工程的生态效果进行评估, 定量评价了工程对耕地、湿地、野生动植物和草地的影响 (Duriancik 等, 2008)。

中国的重大工程较多, 因此在重大工程生态效应监测与评价方面中国独树一帜。三北防护林是中国最早起动的重大生态工程, 早在 1987 年遥感就被全面应用于三北防护林的综合调查中, 主要是对三北范围进行综合性遥感分析和地面调查, 开展宜林、宜灌、宜草类型区划, 不同类型区成林效果评估等 (张德宏, 1990)。随后在 2004 年、2008 年和 2017 年先后开展了基于遥感的三北防护林工程综合评价, 对三北工程区森林资源消长、沙化土地、水土流失、农田林网、森林碳汇、生

态服务功能价值、气候变化、工程建设成效等进行了持续的动态监测与全面评估(鞠洪波, 2003; 朱教君等, 2016)。

生态系统遥感在重大水利工程的生态环境效应监测与评估方面也发挥了巨大的作用。为了监测三峡库区的生态环境, 国务院三峡办联合中科院在移民区、库区和长江上游3个尺度展开生态环境本底、水土流失、植被生态参数等多个专题的遥感监测, 对长江三峡工程建设前后的资源、生态和环境进行长时间序列遥感动态监测与影响评估(吴炳方等, 2011); 并在2009年编制了三峡工程建设期生态与环境监测综合分析报告“蓝皮书”, 通过对三峡工程蓄水前后的纵向比较和跨学科综合分析, 揭示三峡工程建设期生态与环境的演化规律(吴炳方, 2011)。另外, 针对三峡工程和海河流域治理工程, 中科院发展了基于遥感、地面观测、水文、生态学相结合的方法, 对影响重大工程生态环境效应的诸多要素进行了定量化监测和综合评估(吴炳方等, 2019b)。

随着遥感数据的不断积累, 生态系统遥感在重大工程生态效应遥感监测与评估方面的作用将会越来越大。以陆地卫星为例, 遥感数据评价时间可以追溯到1980年代, 80年代以来建设的重大工程都可以通过遥感进行监测, 评价指标由土地覆被变化逐渐扩展到生态、水文指标, 但目前大多还是停留在对现有评价指标的遥感监测上, 而从变化特征角度提出可指示生态效应的指标研究鲜少涉及。随着对地观测数据的共享和云技术的发展, 可为重大工程生态效应遥感监测和评估提供更为丰富的数据源和新的途径, 例如水面变化的快速动态监测(Donchyts等, 2016; Wang等, 2019)。

7 生态系统遥感的云服务

未来, 生态系统遥感需要与云计算相结合, 提供云服务, 简称生态云。云平台不仅让遥感开始真正“飞入寻常百姓家”, 也对遥感领域专业人士的工作方式产生了深远影响。例如Google针对地球观测大数据, 开发了全球尺度PB级数据处理能力的GEE云平台, 极大提升了地球观测大数据的处理与信息挖掘能力(Gorelick等, 2017)。GEE内置预处理后的长时间序列Landsat、MODIS、Sentinel等系列数据, 能够快速实现长时间、大范

围的生态环境动态变化监测(Hansen等, 2013)。遥感数据云服务的出现, 让任何人都可以通过几行简易的命令查看、处理、分析遥感数据, 并可轻松实现区域、国家、洲际尺度甚至是全球尺度的分析应用(Wu等, 2019)。

生态云将是未来生态系统遥感发展的主要方向, 在云平台上实现生态系统类型、格局和功能的监测、时间过程分析, 并实现生态系统功能、服务评估的应用(app), 提供实时决策支持, 如为生态文明评估、编制自然资源负债表、自然资源离任审计提供支持, 为生态补偿测量提供全过程监管, 及时发现短板和存在的问题, 及时提醒地方采取措施进行改进, 推动生态环境保护, 同时也方便参与生态文明建设的单位随时掌握情况, 调整策略。

依托生态云, 生态系统的监测将主要由计算机自动完成, 无需投入大量资金与人力进行硬件设备的采购和维护, 大幅降低了生态环境的监测成本, 提升了生态服务的可持续性, 而生态系统研究的重点将转向分析、解释和评估, 从而使生态系统管理的能力与水平实现跨越式发展。同时, 通过在云端搭建生态服务的全流程解决方案, 云服务系统的个性化定制、移植与维护的成本也显著降低。开放、无门槛的生态云服务平台, 为全民参与生态环境保护及监督提供了契机, 可最大化发挥民众在生态环境保护中的监督力度, 推动生态文明建设的透明化。

8 结语

遥感已经为生态系统研究和管理提供了时间连续、空间一致的大量数据产品, 但在满足生态系统研究与管理方面仍有很大的差距, 需要在方法论上有所突破。生态系统遥感需要将遥感与生态有机结合, 充分挖掘遥感观测数据隐含的深层指示性特征, 构建表征生态系统功能的具有指示性意义的新型遥感数据产品, 精细刻画生态系统结构和功能; 深入分析生态系统深层次的过程与隐性表现, 发展遥感驱动的生态系统服务的评估模型, 逐步构建以结构化为特征的、科学的、具有生态学意义的生态系统遥感方法论; 并充分利用大数据和人工智能等先进技术, 构建开放无门槛的生态云服务, 为全民参与生态环境保护及监督提供了契机。

参考文献 (References)

- Arino O, Gross D, Ranera F, Leroy M, Bicheron P, Brockman C, De-fourny P, Vancutsem C, Achard F, Durieux L, Bourg L, Latham J, Di Gregorio A, Witt R, Herold M, Sambale J, Plummer S, Weber J. GlobCover: ESA service for global land cover from MERIS. Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. 2007.
- Barnhouse L W. The role of models in ecological risk assessment. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 1992, 11(12): 1751-1760.
- Buermann W, Forkel M, O' Sullivan M, Sitch S, Friedlingstein P, Haverd V, Jain A, Kato E, Kautz M, Lienert S, Lombardozzi D, Nabel J, Tian H, Wiltshire A, Zhu D, Smith S, Richardson A. Widespread seasonal compensation effects of spring warming on northern plant productivity. *Nature*, 2018, 562:110-114.
- Borak J S, Lambin E F, Strahler A H. The use of temporal metrics for land cover change detection at coarse spatial scales. *International Journal of Remote Sensing*, 2000, 21: 1415-1432
- Bonachela J A, Pringle R M, Sheffer E, Coverdale T, Guyton J, Caylor K, Levin S, Tarnita C. Termite mounds can increase the robustness of dryland ecosystems to climatic change. *Science*, 2015, 347 (6222): 651-655.
- Carpenter S R., DeFries R, Dietz T, Mooney H, Polasky S, Reid W, Scholes R. Millennium Ecosystem Assessment: Research Needs. *Science*, 2006, 314(5797), 257 - 258.
- Chen J, Chen J, Liao A P, Cao X, Chen L J, Chen X H, He C Y, Han G, Peng S, Lu M, Zhang W W, Mills J. Global land cover mapping at 30 m resolution: A POK-based operational approach. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2015, 103: 7-27.
- Chen J M, Ju W M, Ciaia P, Viovy N, Liu R G, Liu Y, Lu X H. Vegetation structural change since 1981 significantly enhanced the terrestrial carbon sink. *Nature Communications*, 2019, 10: 4259.
- Constable A J, Costa D P, Schofield O, Newman L, Urban E, Fulton E, Melbourne-Thomas J, Ballerini T, Boyd P, Brandt A, de la Mare W, Edwards M, Eléaume M, Emmerson L, Fennel K, Fielding S, Griffiths H, Gutt J, Hindell M, Hofmann E, Jennings S, La H S, McCurdy A, Mitchell B G, Moltmann T, Muelbert M, Murphy E, Press A, Raymond B, Reid K, Reiss C, Rice J, Salter I, Smith D, Song S, Southwell C, Swadling K, Van de Putte A, Willis Z. Developing priority variables ("ecosystem Essential Ocean Variables" — eEOVs) for observing dynamics and change in Southern Ocean ecosystems. *Journal of Marine Systems*, 2016, 161: 26-41.
- Donchyts G, Baart F, Winsemius H, Gorelick N, Kwadijk J C, De Giesen N V. Earth's surface water change over the past 30 years. *Nature Climate Change*, 2016, 6: 810-813.
- Drusch M, Moreno J, Del Bello U, Franco R, Goulas Y, Huth A, Kraft S, Middleton E, Miglietta F, Mohammed G, Nedbal L, Rascher U, Schuttemeyer D, Verhoef W. The FLuorescence EXplorer mission concept — ESA's Earth Explorer 8. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017, 55: 1273-1284.
- Du S, Liu L, Liu X, Zhang X, Zhang X, Bi Y, Zhang L. Retrieval of global terrestrial solar-induced chlorophyll fluorescence from Tan-Sat satellite. *Science Bulletin*, 2018, 63(22): 1502-1512.
- Duriancik L F, Bucks D, Dobrowolski J P, Drewes T, Eckles S, Jolley L, Kellogg R, Lund D, Makuch J, Oneill M, Rewa C, Walbridge M, Parry R, Weltz M. The first five years of the Conservation Effects Assessment Project. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, 63(6):185-197.
- Fang H L, Jiang C Y, Li W J, Wei S S, Baret F, Chen J M, Garciaahora J, Liang S L, Liu R G, Myneni R B, Pinty B, Xiao Z Q, Zhu Z C. Characterization and intercomparison of global moderate resolution leaf area index (LAI) products: Analysis of climatologies and theoretical uncertainties. *Journal of Geophysical Research Biogeoscience*, 2013, 118(2): 529-548.
- Fasona M, Tadross M, Abiodun B, Omojola A. Some implications of terrestrial ecosystems response to climate change for adaptation in Nigeria's wooded savannah. *Environmental Development*, 2013, 5 (1):73 - 95
- Feng X M, Fu B J, Piao S L, Wang S, Ciaia P, Zeng Z Z, Lu Y H, Zeng Y, Li Y, Jiang X H, Wu B F. Revegetation in China's Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits. *Nature: Communications*, 2016, 6: 1019 - 1022.
- Frampton W, Dash J, Watmough G, Milton E. Evaluating the capabilities of Sentinel-2 for quantitative estimation of biophysical variables in vegetation. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2013, 82: 83-92.
- Fu B J, Liu S L, Ma K M. The contents and methods of integrated ecosystem assessment. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(11): 1885-1892 (傅伯杰, 刘士梁, 马克明. 生态系统综合评价的内容与方法. *生态学报*, 2001, 21(11): 1885-1892)
- Fu B J, Zhou G Y, Bai Y F, Song C C, Liu J Y, Zhang H Y, Lv Y H, Zheng H, Xie G D. The main terrestrial ecosystem services and ecological security in China. *Advances in Earth Science*, 2009, 25 (06): 571-576 (傅伯杰, 周国逸, 白永飞, 宋长春, 刘纪远, 张惠远, 吕一河, 郑华, 谢高地. 中国主要陆地生态系统服务功能与生态安全. *地球科学进展*, 2009, 24(06): 571-576)
- Fu B J, Zhang L W. Land-use change and ecosystem services: concepts, methods and progress. *Progress in Geography*, 2014, 33(04): 441-446 (傅伯杰, 张立伟. 土地利用变化与生态系统服务: 概念、方法与进展. *地理科学进展*, 2014, 33(04):441-446)
- Gara T W, Darvishzadeh R, Skidmore A K, Wang T, Heurich M. Accurate modelling of canopy traits from seasonal Sentinel-2 imagery based on the vertical distribution of leaf traits. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2019, 157: 108-123.
- GCOS. Systematic observation requirements for satellite based products for climate (2011 update). GCOS-154, GCOS, 2011
- Gong P, Liu H, Zhang M N, Li C C, Wang J, Huang H B, Clinton N, Ji L Y, Li W Y, Bai Y Q, Chen B, Xu B, Zhu Z L, Yuan C, Suen H P, Guo J, Xu N, Li W J, Zhao Y Y, Yang J, Yu C Q, Wang X, Fu H H, Yu L, Dronova I, Hui F M, Cheng X, Shi X L, Xiao F J, Liu Q F, Song L C. Stable classification with limited sample: transferring a 30-m resolution sample set collected in 2015 to mapping

- 10-m resolution global land cover in 2017. *Science Bulletin*, 2019, 64(6): 370-373.
- Gorelick N, Hancher M, Dixon M, Ilyushchenko S, Thau D, Moore R. Google earth engine: planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 202: 18-27.
- Hansen M C, Defries R S, Townshend J R G, Sohlberg R. Global land cover classification at 1 km spatial resolution using a classification tree approach. *International Journal of Remote Sensing*, 2000, 21 (6-7): 1331-1364.
- Huang W, Xiao L, Wei Z, Liu H, Tang S. A New Pan-Sharpener Method with Deep Neural Networks. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2015, 12(5), 1037-1041.
- Imaoka K, Kachi M, Fujii H, Murakami H, Hori M, Ono A, Igarashi T, Nakagawa K, Oki T, Honda Y, Shimoda H. Global Change Observation Mission (GCOM) for Monitoring Carbon, Water Cycles, and Climate Change. *Proceedings of IEEE*, 2010, 98(5): 717-734.
- Ju H B. Monitoring and Assessment Techniques for State Key Forestry Ecological Projects. *Journal of Northwest Forestry University*. 2003, 18(1): 56-58 (鞠洪波. 国家重大林业生态工程监测与评价技术研究. 西北林学院学报, 2003, 18(1): 56-58)
- Lavalle C, McCormick N, Kasanko M, Demicheli L, Barredo J, TurChini M. Monitoring, planning and forecasting dynamics in European Areas: The territorial approach as key to implement European policies. *CORP*, 2002: 367-373.
- Lawford R. 2014. The GEOSS Water Strategy: From Observations to Decisions. Geneva: Group on Earth Observations.
- Li Y, Zhao M S, Motesharrei S, Mu Q, Kalnay E, Li S. Local cooling and warming effects of forests based on satellite observations. *Nature: Communications*, 2015, 6: 6630.
- Li Z Y, Liu Q W, Pang Y. Review on forest parameters inversion using LiDAR. *Journal of Remote Sensing*, 2016 20(5): 1138-1150 (李增元, 刘清旺, 庞勇. 激光雷达森林参数反演研究进展. 遥感学报, 2016, 20(5): 1138-1150)
- Liang S L, Zhang X T, Xiao Z Q, Cheng J, Liu Q, Zhao X. Global LAnd Surface Satellite (GLASS) Products: Algorithms, Validation and Analysis. 2014, High Education Press, Beijing. (梁顺林, 张晓通, 肖志强, 程洁, 刘强, 赵祥. 全球陆表特征参量(GLASS)产品:算法、验证与分析. 2014, 高等教育出版社:北京)
- Liu J B, Ma Y, Wu Y T, Chen F. Review of methods and applications of high spatiotemporal fusion of remote sensing data. *Journal of Remote Sensing*, 2016, 20(5): 1038-1049 (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)
- Liu J Y, Yue T X, Ju H B, Wang Q, Li X B. Integrated Ecosystem Assessment of Western China. 2006, China Meteorological Press: Beijing (刘纪远, 岳天祥, 鞠洪波, 王桥, 李秀彬. 中国西部生态系统综合评估. 2006, 气象出版社:北京)
- Moore B, Crowell S, Rayner P, Kumer J, Odell C W, O'Brien D M, Utembe S R, Polonsky I, Schimel D, Lemen J R. The Potential of the Geostationary Carbon Cycle Observatory (GeoCarb) to Provide Multi-scale Constraints on the Carbon Cycle in the Americas. *Frontiers in Environmental Science*, 2018(6), 109(13).
- Müller D, Chemyakin E, Kolgotin A, Ferrare R A, Hostetler C A, Romanov A. Automated, unsupervised inversion of multiwavelength lidar data with TiARA: assessment of retrieval performance of microphysical parameters using simulated data. *Applied Optics*. 2019, 58(18), 4981-5008.
- Odum E P. *Fundamentals of Ecology*. 1971, Philadelphia: Saunders.
- Pereira H M, Ferrier S, Walters M, Geller G N, Jongman R H G, Scholles R J, Bruford M W, Brummitt N, Butchart S H M, Cardoso A C, Coops N C, Dulloo E, Faith D P, Freyhof J, Gregory R D, Heip C H R, Hoft R, Hurtt G C, Jetz W, Karp D S, McGeoch M A, Obura D, Onoda Y, Pettorelli N, Reyers B, Sayre R, Scharlemann J P W, Stuart S N, Turak E, Walpole M, Wegmann M. Essential biodiversity variables. *Science*, 2013, 339(6117): 277-278.
- Quegan S, Le Toan T, Chavec J, Dall J, Exbrayat J, Minh D, Lomas M, Dalessandro M M, Paillou P, Papathanassiou K, Rocca F, Saatchi S, Scipal K, Shugart H, Smallman T L, Soja M J, Tebaldini S, Ulander L, Villard L, Williams M. The European Space Agency BIOMASS mission: Measuring forest above-ground biomass from space. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 227: 44-60.
- Ouyang Z Y, Wang Q, Zheng H, Zhang F, Hou P. National Ecosystem Survey and Assessment of China (2000-2010). *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2014, 29(04): 462-466 (欧阳志云, 王桥, 郑华, 张峰, 侯鹏. 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, 2014, 29(04): 462-466)
- Ouyang Z Y, Zhang L, Wu B F, Li X S, Xu W H, Xiao Y, Zheng H. An ecosystem classification system based on remote sensor information in China. *Acta Ecologica Sinica*. 2015, 35(2): 219-226 (欧阳志云, 张路, 吴炳方, 李晓松, 徐卫华, 肖燧, 郑华等. 基于遥感技术的全国生态系统分类体系. 生态学报, 2015, 35(2): 219-226)
- 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, Daily G C. Improvements in ecosystem services from investments in natural capital. *Science*. 2016, 392(6292), 1455-1459.
- Pringle R M, Doak D F, Brody A K, Jocque R, Palmer T M. Spatial Pattern Enhances Ecosystem Functioning in an African Savanna. *PLOS Biology*, 2010, 8(5): e1000377.
- Rapport D J, Costanza R, McMichael A J. Assessing ecosystem health. *Trends in Ecology & Evolution*. 1998, 13(10): 397-402.
- Ratnam J, Tomlinson K W, Rasquinha D N, Sankaran M. Savannas of Asia: antiquity, biogeography, and an uncertain future. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2016, 371(1703): 20150305.
- Russakovsky O, Deng J, Su H, Krause J, Satheesh S, Ma S, Huang Z H, Karpathy A, Khosla A, Bernstein M S, Berg A C, Li F F. ImageNet Large Scale Visual Recognition Challenge. *International Journal of Computer Vision*. 2015, 115(3): 211-252.
- Salomonson V, Barnes W, Masuoka E. Introduction to MODIS and an Overview of Associated Activities. in "Earth Science Satellite Remote Sensing". 2006, Springer: 12-32.
- Schulz K, Hänsch R, Sörgel U. Machine learning methods for remote sensing applications: an overview. *Proc. SPIE 10790, Earth Re-*

- sources and Environmental Remote Sensing/GIS Applications IX, 2018.
- Stavros E N, Schimel D, Pavlick R, Serbin S P, Swann A L S, Duncan-son L, Fisher J B, Fassnacht F E, Ustin S L, Dubayah R, Schweiger A K, Wennberg P O. ISS observations offer insights into plant function. *Nature Ecology & Evolution*, 2017, 1(7): 0194.
- Tang H, Armston J, Hancock S, Marselis S M, Goetz S J, Dubayah R. Characterizing global forest canopy cover distribution using spaceborne lidar. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 231: 111262.
- Tansley A.G. The Use and Abuse of Vegetational Concepts and Terms. *Ecology*, 1935, 16(3): 284-307.
- Tarnita C E, Bonachela J A, Sheffer E, Guyton J A, Coverdale T C, Long R A, Pringle R M. A theoretical foundation for multi-scale regular vegetation patterns. *Nature*, 2017, 541: 398-401.
- Verger A, Baret F, Weiss M. Near Real-Time Vegetation Monitoring At Global Scale. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2014, 7(8): 3473-3481.
- Wang J, Xiao X M, Qin Y W, Dong J W, Geissler G L, Zhang G L, Cejda N I, Alikhani B, Doughty R B. Mapping the dynamics of eastern redcedar encroachment into grasslands during 1984-2010 through PALSAR and time series Landsat images, *Remote Sensing of Environment*, 2017, 190: 233-246
- Wang J, Xiao X M, Qin Y W, Doughty R B, Dong J W, Zou Z H. Characterizing the encroachment of juniper forests into sub-humid and semi-arid prairies from 1984 to 2010 using PALSAR and Landsat data. *Remote Sensing of Environment*, 2018a, 205: 166-179.
- Wang J, Xiao X M, Zhang Y, Qin Y W, Doughty R B, Wu X C, Bajgain R, Du L. Enhanced gross primary production and evapotranspiration in juniper-encroached grasslands. *Global Change Biology*. 2018b, 24: 5655 - 5667.
- Wang Q, Liu S H. Research and implementation of national environmental remote sensing monitoring system. *Journal of Remote Sensing*, 2016, 20(5): 1161-1169 (王桥, 刘思含. 国家环境遥感监测体系研究与实现. *遥感学报*, 2016, 20(5): 1161-1169)
- Wang Y B, Ma J, Xiao X M, Wang X X, Dai S Q, Zhao B. Long-Term Dynamic of Poyang Lake Surface Water: A Mapping Work Based on the Google Earth Engine Cloud Platform. *Remote Sensing*. 2019, 11(3): 313.
- Weiss M, Baret F, Garrigues S, Lacaze R. LAI and Fapar Cyclopes Global Products derived from vegetation (Part 2): Validation and comparison with MODIS Collection 4 Products. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 110(3): 317-331.
- Wu B F. China's Land Cover. 2017, Science Press: Beijing (吴炳方. 中国土地覆被. 2017, 科学出版社:北京)
- Wu B F. Special Issue on Ecological Environment Monitoring and Assessment in the Three Gorges Reservoir Area. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2011, 20(3) (吴炳方, “三峡库区生态环境监测与评估专辑”, 长江流域资源与环境, 2011, 20(3))
- Wu B F, Qian J K, Zeng Y. Land Cover Atlas of the People's Republic of China (1:1,000,000). 2017, SinoMaps Press: Beijing (吴炳方, 钱金凯, 曾源. 中华人民共和国土地覆被地图集. 2017, 中国地图出版社:北京)
- Wu B F, Chen Y B, Zang X P, Yin K, Liu Y X. Preliminary analysis on the driving force mechanisms of ecological environmental changes in Three Gorges Project construction term. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2011, 20(3): 262-268 (吴炳方, 陈永柏, 臧小平, 尹锴, 刘远新. 三峡工程建设期生态环境演变驱动力机制浅析. 长江流域资源与环境, 2011, 20(3): 262-268)
- Wu B F, Sun W D, Huang Q, Guan H Y, Yang W N. Eco-Environment dynamic monitoring with remote sensing in typical region of Western China. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18(5), 46-50 (吴炳方, 孙卫东, 黄筌, 管海晏, 杨武年. 中国西部典型区生态环境本底遥感调查. 水土保持学报, 2004, 18(5): 46-50)
- Wu B F, Yan N N. Remote sensing monitoring and Post Environmental Impact Assessment of Hai Basin ecological management project, 2019b, Science Press: Beijing (吴炳方, 闫娜娜. 海河流域治理工程生态效应遥感监测与评估. 2019b, 科学出版社:北京)
- Wu B F, Yan N N, Xiong J, Bastiaanssen W G, Zhu W W, Stein A. Validation of ETWatch using field measurements at diverse landscapes: A case study in Hai Basin of China. *Journal of Hydrology*, 2012, 436-437: 67-80.
- Wu B F, Zeng H W, Yan N N, Zhang M. Approach for Estimating Available Consumable Water for Human Activities in a River Basin. *Water Resources Management*, 2018, 32(7): 2353 - 2368.
- Wu B F, Zeng Y, Zhao D. Ecological variables monitoring and its change patterns in China. 2019a, Science Press: Beijing (吴炳方, 曾源, 赵旦. 中国生态参数遥感监测方法及其变化格局. 2019a, 科学出版社:北京)
- Wu B F, Zhang M, Zeng H W, Zhang X, Yan N N and Meng J H. Agricultural monitoring and early warning in the era of big data. *Journal of Remote Sensing*, 2016, 20(5): 1027-1037 (吴炳方, 张森, 曾红伟, 张鑫, 闫娜娜, 蒙继华. 大数据时代的农情监测与预警. *遥感学报*, 2016, 20(5): 1027-1037)
- Wu H T, Zhang L, Zhang X. Cloud Data and Computing Services Allow Regional Environmental Assessment: A Case Study of Macquarie-Castlereagh, Australia. *Chinese Geographical Science*, 2019, 29(3): 394-404
- Wulder M A, Coops N C, Roy D P, White J C, Hermosilla T. Land cover 2.0. *International Journal of Remote Sensing*, 2018, 39(12): 4254-4284.
- Yan N N, Wu B F, Perry C. Assessing potential water savings in agriculture on the Hai Basin plain, China. *Agricultural Water Management*. 2015, 154:11-19.
- Zeng H W, Wu B F, Zhu W W, Zhang N. A trade-off method between environment restoration and human water consumption: A case study in Ebinur Lake. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 217: 732-741.
- Zhang D H. Application of remote sensing image on forestry in China. *Missiles and Spacecraft*. 1990, 8: 7-9 (张德宏. 卫星遥感影像在我国林业中的应用. 世界导弹与航天, 1990, 8: 7-9)
- 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: 162-181.
- Zhang Z Q, Xu Z M, Cheng G D. Valuation of ecosystem services and natural capital. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(11): 1918-1926 (张志强, 徐中民, 程国栋. 生态系统服务与自然资本价值评估. *生态学报*. 2001, 21(11): 1918-1926)
- Zhu J J, Zheng X, Yan Q L. Assessment of Impacts of the Three-North Protective Forest Program on Ecological Environments by Remote Sensing Technology - Launched after 30 years (1978-2008). 2016, Science Press: Beijing (朱教君, 郑晓, 闫巧玲. 三北防护林工程生态环境效应遥感监测与评估研究:三北防护林体系工程建设30年(1978-2008). 2016, 科学出版社:北京)
- Zhu Z C, Piao S L, Myneni R, Huang M T, Zeng Z Z, Canadell J G, Ciais P, Sitch S, Friedlingstein P, Arneeth A, Cao C X, Cheng L, Kato E, Koven C D, Li Y, Lian X, Liu Y W, Liu R G, Mao J F, Pan Y Z, Peng S S, Penuelas J, Poulter B, Pugh T A M, Stocker B D, Viovy N, Wang X H, Wang Y P, Xiao Z Q, Yang H, Zaehle S, Zeng N. Greening of the Earth and its drivers. *Nature Climate Change*, 2016, 6: 791-795

Remote sensing for ecosystem : Definition and prospects

WU Bingfang^{1,2,3}, ZENG Yuan^{1,2,3}, YAN Nana^{1,2}, ZENG Hongwei^{1,2,3}, ZHAO Dan^{1,2}, ZHANG Miao^{1,2}

1. Laboratory for Ecosystem Remote Sensing, State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;
2. Specialty Committee of Ecological Remote Sensing, Ecological Society of China, Beijing 100101, China;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Remote sensing for ecosystem mainly focuses on types and patterns identification, functions monitoring, services assessment and processes analysis of ecosystem by remote sensing based methods. The new generation of satellites and sensors provide additional earth observation data sources for ecosystem monitoring. However, the identification capability of ecosystem types has yet to be improved, which put forward higher request to intelligent information extraction (in the Big Data Era). For ecosystem function monitoring, it is necessary to fully exploit the hidden features of remote sensing data and develop new indicators that are easy to process and reflect the functional characteristics of ecosystem. In addition, advanced models are needed to better assess ecosystem services by analyzing the implicit process and performance of ecosystem. Combination with the cloud platform is the future trends of remote sensing for ecosystem, which will provide opportunities for the public participation in ecological protection, and will provide more data support for ecological effects assessment of key projects.

Key words: ecosystem, remote sensing, ecosystem functions, ecosystem services, ecological cloud

Supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFA0600304, 2016YFC0500201)