

引用格式:高吉喜,赵少华,侯鹏.中国生态环境遥感四十年[J].地球信息科学学报,2020,22(4):705-719. [Gao J X, Zhao S H, Hou P. Advances of remote sensing on ecology and environment in China[J]. Journal of Geo-information Science, 2020,22(4):705-719.] DOI:10.12082/dqxkx.2020.200197

中国生态环境遥感四十年

高吉喜,赵少华,侯鹏

生态环境部卫星环境应用中心 国家环境保护卫星遥感重点实验室,北京 100094

Advances of Remote Sensing on Ecology and Environment in China

GAO Jixi*, ZHAO Shaohua, HOU Peng

State Environmental Protection Key Lab of Satellite Remote Sensing, Ministry of Ecology and Environment Center for Satellite Application on Ecology and Environment, Beijing 100094, China

Abstract: Ecology and environment are the foundation of human society's survival and development, and main part of the construction of national ecological civilization and receives unprecedented attention. In the past 40 years, research and application of remote sensing in China ecological environment have great achievements, and satellite remote sensing technology is playing more and more important role in the processing ecology, atmosphere, water, soil and other environment protection. According to the published documents, through typical or important study cases, this paper expounds development process of remote sensing technology in ecology and environment, including earth observation ability, supporting ecological civilization construction. The development of remote sensing monitoring capacity is mainly reflected in the expansion of application fields, improvement of monitoring accuracy and enhancement of monitoring effectiveness. The development of earth observation capacity is mainly divided into three stages: the period-based on foreign satellites, the development period of environmental satellites, and the application period of GF series satellites. Major events supporting the construction of national ecological civilization mainly include periodic investigation and assessment of national ecosystem, and environmental pollution management and control, emergency response and supervision of law enforcement. Combined with the national strategy and technology development, some thoughts on the future development of remote sensing of ecology and environment are put forward.

Key words: atmospheric remote sensing; water remote sensing; ecological remote sensing; soil remote sensing; environment of remote sensing; environment monitoring; ecosystem assessment

*Corresponding author: GAO Jixi, E-mail: gjx@nies.org

摘要:生态环境是人类社会生存与发展的基础。快速发展的遥感技术显著推动着生态环境遥感监测能力的提升,有效支撑了国家生态文明建设。从1980年天津—渤海湾环境遥感试验开始,经历了近40年的发展,遥感监测技术已经广泛应用于生态、大气、水、土壤等生态环境保护各个方面,取得显著成效。本文回顾了我国生态环境遥感技术近40年的发展,通过典型或重要应用案例,系统梳理了遥感技术在生态环境监测、对地观测能力、支撑生态文明建设等方面应用的发展历程。生态环境遥

收稿日期:2020-04-07;修回日期:2020-04-21.

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0506506);国家高分辨率对地观测系统重大专项(05-Y30B01-9001-19/20)。

[**Foundation items:** National Key Research and Development Program of China, No.2017YFC0506506; Major Projects of High Resolution Earth Observation Systems of National Science and Technology, No.05-Y30B01-9001-19/20.]

作者简介:高吉喜(1964—),男,内蒙古呼和浩特人,博士,研究员,主要从事区域生态学研究。E-mail: gjx@nies.org

感监测能力发展主要表现在应用领域逐步扩大、监测精度明显提升、监测时效大幅增强;对地观测能力发展主要分为国外卫星为主期、环境卫星发展期、高分卫星应用期3个阶段;支撑生态文明建设的重大事件主要包括全国生态状况定期调查评估、污染防治攻坚战、应急与监督执法等方面。本文结合国家战略和技术发展,对今后生态环境遥感的发展提出了一些思考。

关键词: 大气遥感;水环境遥感;生态遥感;土壤遥感;环境遥感;环境监测;生态评估

1 引言

以1961年美国召开的“环境遥感国际讨论会”为标志,遥感作为一门新兴学科在世界范围内飞速发展^[1]。随着遥感技术从可见光向全谱段、从被动向主被动协同、从低分辨率向高精度的快速发展,在生态环境领域的应用越来越广泛,显著提升了生态环境监测能力。在美欧发达国家,大气环境方面实现了云、水汽、气溶胶、二氧化硫、二氧化氮、臭氧、二氧化碳、甲烷等的动态遥感监测,水环境方面实现了叶绿素、悬浮物、透明度、可溶性有机物、海表温度、海冰等的动态遥感监测,陆地生态方面实现了植被指数、叶面积指数、植被覆盖度、光合有效辐射、土壤水分、林火、冰川等的动态遥感监测。由此可以看出,生态环境遥感主要就是利用遥感技术定量获取大气环境、水环境、土壤环境和生态状况等专题信息,对生态环境现状及其变化特征进行分析判断,有效支撑生态环境管理和科学决策的一门交叉学科。近40年来,中国生态环境遥感技术发展迅速。本文通过梳理典型应用案例,回顾了我国生态环境遥感监测能力、对地观测能力、支撑生态文明建设等方面的发展历程,讨论了未来发展所面临的关键科学问题。

2 生态环境遥感监测能力40年

中国生态环境遥感监测能力显著提升,应用领域逐步扩大,空间分辨率和定量反演精度明显提高,获取数据的时效性大幅增强。

2.1 监测领域逐步扩大

20世纪80年代,历时4年的天津—渤海湾地区环境遥感试验对城市环境状况和污染源进行了监测^[2-5],开启了生态环境遥感监测应用的序幕。1983—1985年,城乡建设环境保护部等部门联合开展北京航空遥感综合调查,获取了烟囱高度及分布、废弃物分布等重要的生态环境信息。“七五”期间,我国开展了“三北”防护林遥感综合调查^[6],采用遥感和地面调查相结合的方式查清了黄土高原水土流失和农林牧资源现状等^[7]。1986—1990年,

中国科学院遥感应用研究所依托唐山遥感试验场开展唐山环境区划及工业布局适宜度、生活居住适宜度的评价研究^[2]。20世纪90年代,生态环境遥感应用集中在水土流失、土地退化等生态问题调查以及环境综合评价等方面^[8]。1992—1995年,中国科学院和农业部完成国家资源环境的组合分类调查和典型地区的资源环境动态研究,分析了中国基本资源环境的现状^[9]。

进入21世纪以来,快速发展的卫星遥感技术在生态领域得到了迅速应用。2000—2002年,国家环境保护总局先后组织开展中国西部和中东部地区生态环境现状遥感调查。朱会义等^[10]利用1985年和1995年共2期TM影像分析了环渤海地区的土地利用情况。刘军会和高吉喜^[11]利用遥感、GIS技术和景观生态学方法界定了北方农牧交错带及界线变迁区的地理位置,分析了1986—2000年界线变迁区的土地利用和景观格局时空变化特征。刘军会等^[12]基于MODIS遥感数据和GIS技术建立敏感性评价指标体系及评价模型,开展生态环境敏感性综合评价。侯鹏等利用遥感技术开展了重点生态功能区^[13]、生态保护红线^[14]等区域监测评估,分析了自然保护区及其生态安全格局关系^[15]。目前,生态环境部卫星环境应用中心利用遥感技术对自然保护区、生物多样性保护优先区域、重点生态功能区、国家公园、生态保护红线等监管。

在大气环境监测方面,郑新江等^[16]利用FY-1C气象卫星监测塔里木盆地及北京沙尘暴过程。何立明等^[17]基于MODIS数据开展秸秆焚烧监测。高一博等^[18]基于OMI数据研究中国2005—2012年SO₂时空变化特征。周春艳等^[19]利用OMI数据分析了中国及各省市区域2005—2015年的NO₂时空变化及影响因素。孟倩文和尹球^[20]利用AIRS数据分析中国CO₂在2003—2012年的时空变化。张兴赢等^[21]利用美国Aqua-AIRS遥感资料分析中国地区2003—2008年对流层中高层大气CH₄的时空分布特征,发现受近地层自然排放与人为活动影响,CH₄在垂直分布上随高度增加而下降的典型变化趋势。

在水环境监测方面,我国许多学者利用MODIS、CHRIS、HJ-1卫星等数据对太湖、巢湖、滇池等

内陆湖泊开展了水华、水质、富营养化等遥感应用^[22]。吴传庆^[23]开展了太湖富营养化高光谱遥感监测机理研究和试验应用,马荣华等^[24]从卫星传感器、大气校正、光学特性测量、生物光学模型及水体辐射传输、水质参数反演方法等方面总结了湖泊水色遥感研究进展。郭宇龙等^[25]、杜成功等^[26]同时利用GOCI卫星数据开展了太湖叶绿素、总磷浓度反演研究。在城镇黑臭水体、饮用水源地水质及环境风险遥感方面也开展了大量应用研究^[27-28]。Pan等^[29]采用基于STARFM的时空融合方法,利用Landsat-8/OLI和GOCI数据,研究了长江口高分辨率悬浮颗粒物的逐时变化情况。

在土壤环境监测方面,一些学者从元素类型、监测对象、污染场地等方面,开展了多光谱及高光谱遥感的土壤污染监测研究^[30]。熊文成等^[31]综述了土壤污染遥感监测进展,并针对土壤污染管理需求,提出了土壤污染源遥感监管、遥感技术服务风险、遥感技术服务土壤调查布点优化、开展土壤污染遥感反演与试点研究等发展方向。蔡东全等^[32]利用HJ-1A高光谱遥感数据研究发现铜、锰、镍、铅、砷在480~950 nm波段内具有较好的遥感建模和反演效果。土壤光谱表现出来的重金属光谱特性非常微弱,植被受污染胁迫表现出的光谱变化特征比土壤更敏感,受重金属污染后的土壤,其上生长的植被的光谱特征将发生改变^[33]。宋婷婷等^[34]基于ASTER遥感影像研究土壤锌污染发现在481、1000、1220 nm处是锌的敏感波段,相关性最好的波段在515 nm处。

从应用领域上看,不再局限于城市环境遥感,从土地利用、覆盖变化和大气、水、土壤污染定性的环境监测,逐步扩展到大气、水、土壤、生态参数的定量化监测,广泛应用于区域生态监测评估、环境影响评价、核安全和环境应急等领域。遥感技术也从以航空遥感为主转变为卫星遥感为主。

2.2 监测精度明显提升

中国生态环境遥感早期的应用主要以定性为主。随着卫星遥感技术的发展,卫星的数量和载荷的空间分辨率、光谱分辨率等大幅提高,对地物细节的分辨能力、生态环境要素及其变化的监测精度也大大增强,生态环境定量化遥感监测水平明显提高。

张冲冲等^[35]利用环境卫星CCD数据采用非监督分类方法提取长白山地区植被覆盖信息,总体精

度为84.67%。张方利等^[36]利用QuickBird高分影像建立一种融合多分辨率对象的城市固废提取方法,对露天城市固废堆的识别精度达到了75%。郭舟等^[37]利用QuickBird影像采用面向对象分析手段,城市建设区识别率为89.7%。张洁等^[38]基于高分一号卫星影像,采用面向对象结合分形网络演化多尺度分割方法,对青海省天峻县江仓第五露天矿区进行信息提取和分类,有效减少混合像元干扰,总分类精度为88.45%。杨俊芳等^[39]基于国产高分一号和二号卫星数据发展了一种结合空间位置与决策树分类的互花米草信息提取方法,对互花米草信息的分类识别精度为97.05%。伴随着卫星对地观测数据空间分辨率的提升,从1972年开始的78 m,到1982年开始的30 m,到1986年开始的10 m,到1999年开始的亚米级高分辨率数据,陆表信息识别和分类监测精度得到显著提升。

王中挺等^[40]利用HJ-1卫星多光谱数据反演了2009年北京地区的霾,卫星监测的结果与地面观测具有较好的相关性。陈辉等^[41]基于MODIS数据开展了京津冀及周边地区PM_{2.5}时空变化特征遥感监测分析。马鹏飞等^[42]基于MODIS、OMI等卫星遥感数据,利用灰霾像元识别及统计、光谱差分吸收等方法,开展灰霾面积、PM_{2.5}、NO₂和SO₂等大气污染物浓度反演,结合高分影像划定污染企业疑似聚集区,有效提高环境执法的精准性和执法效率。生态环境部卫星环境应用中心利用多源卫星遥感手段,监测发现我国PM_{2.5}、NO₂、SO₂等污染物的排放在逐年降低,表明《大气污染防治行动计划》的实施明显改善大气环境质量。伴随着卫星对地观测数据光谱分辨率提升和大气成分卫星载荷增多,特别是1999年MODIS和2004年OMI卫星载荷的投入运行,使得遥感技术可以实现对大气颗粒物、氮氧化物、二氧化硫、臭氧等大气污染成分和痕量气体的监测,显著提升了大气环境遥感监测精度。

朱利等^[43]基于2009年6月HJ-1卫星多光谱数据在巢湖开展遥感监测,并同步现场试验表明叶绿素a浓度和悬浮物浓度的反演精度符合水环境监测业务需求。阎福礼等^[44]利用Hyperion高光谱载荷与同步采样的25个水面数据,通过建立叶绿素和悬浮物的经验模型反演其浓度,发现悬浮物浓度最大误差为23.1 mg/L,叶绿素a浓度最大误差为21.4 mg/m³。赵少华等^[45]采用ERS2-SAR影像

和支持向量机的方法提取2010年8月13日的太湖水华,通过同期的光学影像比对发现,其对溢油、水华的提取精度优于90%。卫星数据光谱波段的增加,显著改善着地表水环境的遥感监测精度。特别是2000年Hyperion卫星载荷可以获得400~2500 nm范围内的242个波段、光谱分辨率为10 nm的高光谱分辨率卫星数据。

土壤污染遥感监测大多局限于实验室分析、地面和机载航空遥感的应用,星载高光谱技术监测土壤污染的研究还较少。目前在生态环境管理应用方面,主要是识别疑似污染场地。黄长平等^[46]分析了南京城郊土壤重金属铜遥感反演的10个敏感波段。张雅琼等^[47]基于GF-1卫星影像快速提取了深圳市部九窝余泥渣土场的信息,验证表明归一化绿红差异指数提取精度在97.5%以上。

2.3 监测时效大幅增强

卫星遥感对陆表生态环境的监测时效性取决于卫星遥感数据源的时间分辨率,也就是卫星的重访周期。重访周期越短、时间分辨率越高、监测时效性就越强。根据现有的主要卫星遥感数据源可以分为3种:小时级的时间分辨率卫星数据;日/周级的时间分辨率卫星数据;旬/月级的时间分辨率卫星数据。

(1) 小时级的时间分辨率卫星数据

时间分辨率以几小时左右为主,以极轨类和静止类的气象观测卫星为代表,主要是低空间分辨率的卫星遥感数据,除气象观测之外还可以用于监测大气环境和全球、区域、国家尺度的宏观生态。代表性的卫星遥感数据源有美国的AVHRR系列和MODIS系列、以及中国的FY系列等,通过两颗星上下午组网可以实现一天2次的全球覆盖,除气象观测之外还可用于植被覆盖、生物量、热岛效应、水体分布等进行监测。尽管AVHRR系列卫星的时间分辨率相同,但是自20世纪80年代以来,对地观测性能得到明显提升,由试验星成为了业务星,8 km分辨率提升为1 km分辨率、4个光谱波增加为5个光谱波段。1999年MODIS卫星的投入使用,更是将光谱波段增加至36个。美国的AURA-OMI等,可用于大气污染气体、温室气体、气溶胶等进行监测。对于高轨道地球静止卫星,时间分辨率更高,可以达到分钟级和秒级,如日本的Himawari、韩国的COMS、中国的GF-4号卫星和FY-4A等。

(2) 日/周级的时间分辨率卫星数据

时间分辨率以几天或者一周左右为主,以陆地观测类小卫星星座和海洋类观测卫星为代表,主要是高空间分辨率的卫星遥感数据,可以用于生态、水、大气环境的精细化监测。这类卫星多数采用组网运行的方式,时间分辨率和空间分辨率同时得到显著提升。代表性的卫星遥感数据源有美国的IKONOS、QuickBird、和WorldView系列及中国GF系列、ZY系列和HJ系列卫星等,卫星的重访周期都是几天,可对小区域的植被覆盖、土地利用、生态系统分类、人类活动、城市固废、水质、水污染、风险源、地表/水表温度、热异常等进行监测。1999年美国IKONOS卫星发生和运行,开启了亚米级高时间分辨率、高空间分辨率对地观测的序幕,将对地观测重访周期提升至1~3 d。在我国,2013年发射的高分1号卫星空间分辨率达到2 m,2014年发射的高分2号卫星空间分辨率达到0.8 m,重访周期约为4 d,显著提升了中国生态环境的精细化监测能力。

(3) 旬/月级的时间分辨率卫星数据

时间分辨率以半个月或1个月为主,以极轨类的陆地资源卫星为代表,主要是中分辨率的卫星遥感数据,可用于生态、水、大气环境的精细化监测。代表性的卫星遥感数据源有美国的Landsat系列和法国的SPOT系列,可用于监测城市或省域尺度的植被覆盖、生态系统分类、地表/水表温度、热异常、水质、气溶胶等。自1972年发射首颗Landsat卫星以来,其系列卫星的对地观测性能不断得到提升和改进,最初是78 m分辨率、4个光谱波段、18 d的重访周期,2013年发射的Landsat-8卫星空间分辨率提升至15 m、光谱波段增加至11个、重访周期提升至16 d。SPOT系列卫星的时间分辨率为26 d。自1986年发射首颗卫星以来,SPOT系列卫星的空间分辨率由10 m提升至1.5 m,2014年发射的SPOT-7卫星与SPOT-6、Pleiades 1A/B组成四星星座,具备每日两次的重访能力。

3 生态环境遥感对地观测能力40年

全球有超过30个国家和机构运营对地观测卫星系统,国外共有601颗对地观测卫星在轨运行^[48]。美国在轨卫星数量达到148颗,包括光学、雷达、气象、海洋和环境等多种类型,覆盖全色、可见光、多/高/超光谱、红外等谱段,成像和视频相结合,高、低

轨配合,军、民、商协调发展的对地观测卫星体系,是对地观测体系最为完备的国家^[49]。美国民用对地观测卫星体系主要有陆地卫星 Landsat 系列、地球静止轨道环境业务卫星 GOES 系列和 NOAA 极轨气象卫星系列、地球观测系统 EOS 计划,分别由地质调查局、国家海洋和大气管理局、国家航空航天局负责运行和管理,而美国商业对地观测卫星体系主要由数字地球公司运行和管理^[49]。在中国,民用对地观测卫星体系主要有高分卫星系列和资源卫星系列、风云气象卫星系列、海洋卫星系列,分别由中国资源卫星应用中心、国家卫星气象中心、国家卫星海洋应用中心负责运行和管理。近年来,北京一号、清华一号、京师一号、吉林一号等小卫星发射,也陆续拉开了商业卫星发展的序幕。

随着中国科学技术综合实力的日益增强,生态环境遥感对地观测能力发生了显著变化。生态环境遥感监测从主要依靠国外卫星数据的初期阶段,发展到了现在以国内卫星遥感数据为主的快速发展阶段。同时,我国自主的生态环境遥感对地观测能力在时空分辨率方面得到了显著增强。

3.1 国外卫星为主期(1980—2008年)

1980年开始的天津—渤海湾地区环境遥感试验是针对城市环境问题的大型综合遥感试验,以国内航空和国外航天遥感数据为主,取得了天津市水、气、土、热污染等生态环境和渤海湾近海海洋环境污染的综合性遥感监测结果^[50]。1987年国家重点科技项目“三北”防护林遥感综合调查,就是利用国外 Landsat-MSS、SPOT 卫星等遥感资源,为了解“三北”防护林工程第一期的经济效益和生态效益等成效、支撑完善该工程后续规划而开展的,监测发现“三北”地区的生态环境有明显改善^[6]。此外,国家“七五”科技攻关项目在“黄土高原综合治理”项目里规定采用卫星、飞机遥感和地面调查相结合,查清黄土高原水土流失和农林牧资源现状,并设立“黄土高原遥感调查”遥感应用工程,利用遥感技术调查该地区土地利用现状、水土流失状况等^[7]。90年代,史培军等^[51]应用 1980、1988 和 1994 年共 3 期 Landsat/MSS、TM 遥感数据,对深圳市土地利用/土地覆被的变化对生态环境安全的影响进行研究,结果表明快速的城市化过程是引起土地利用变化的主要原因,城镇用地的增加导致城市洪水加剧和水土流失,城市化过程中确保较多绿地对缓解城市生态环

境问题有不可替代的作用。

进入 21 世纪,生态环境遥感应用蓬勃发展。国家环境保护总局利用 Landsat-TM、SPOT 等卫星影像,组织开展了 2000—2002 年全国生态环境现状遥感调查^[4]。1998 年以来中国在生态环境脆弱区实施一系列生态建设工程,吴炳方等^[52]利用 TM 影像在生态环境典型治理区开展 1997—2002 年遥感动态监测,监测工程实施地区生态环境变化趋势,结果表明 5 年来退耕还林还草、天然林保护、防护林建设和小流域治理等生态环境建设工程取得明显进展,各治理区环境正在逐步改善。罗敬宁等^[53]提出利用 NOAA/AVHRR 的近红外 1.6 μm 波段特征构建可比沙尘强度指数监测沙尘暴的新方法。王子峰等^[54]基于“背景对比火点探测算法”提出一种基于 MODIS 数据监测中国华北地区秸秆焚烧、林火和草原火的方法,并应用于环保工作。杨一鹏等^[55]利用 TM 数据开展太湖叶绿素浓度的定量反演研究。阎福礼等^[56]、李俊生等^[57]分别利用 Hyperion、CHRIS 星载高光谱数据,开展太湖叶绿素等水质遥感监测应用研究,取得较好结果,表明高光谱遥感数据监测水质的优势。

这一时期卫星遥感技术进入中国生态环境领域并快速发展,遥感数据获取手段从航空遥感逐步扩展到卫星遥感,主要应用在城市环境监测,包括大气污染、水污染、固体废弃物、土壤污染、环境热效应等环境监测,以及环境规划、评价、生态调查等方面。主要利用欧美发达国家的 MODIS、TM、ENVISAT、SPOT 等卫星数据,结合国内风云气象卫星、中巴资源卫星数据等,积极开展土地利用、生态调查、秸秆焚烧、沙尘、水质、土壤污染等遥感监测应用研究,然而受卫星数据的价格与获取便利性、时空和光谱分辨率、生态环境要素反演的机理和模型构建等因素限制,总体上的定量化应用效果还不太理想。

3.2 环境卫星发展期(2008—2013年)

2008年9月发射的 HJ-1A/B 卫星使我国环境遥感监测迈入新纪元,拉开了国产自主环境卫星生态环境遥感应用的序幕,其多光谱相机空间分辨率为 30 m,幅宽达 720 km,是国际上类似分辨率载荷地面幅宽最宽的卫星,大幅提升了对全国甚至全球的数据获取能力^[5]。环境保护部联合中国科学院组织于 2011 年启动了全国生态环境十年变化(2000—2010 年)调查与评估专项工作,综合利用

20 355 景国产环境卫星和国外卫星遥感数据,从国家、典型区域和省域3个空间尺度,对全国生态环境开展调查评估。

生态环境遥感研究应用方面,万华伟等^[58]利用HJ-1卫星高光谱数据对江苏宜兴的入侵物种——加拿大一枝黄花的空间分布进行监测,结果显示利用高光谱数据可实现物种定位。刘晓曼等^[59]设计了一套基于HJ-1卫星CCD数据的自然保护区生态系统健康评价方法、指标体系和技术流程,并选择向海湿地自然保护区作为应用示范评价其生态系统健康现状。张冲冲等^[53]以长白山为例,开展基于多时相HJ-1卫星CCD数据的植被覆盖信息快速提取研究。高明亮等^[60]利用环境卫星数据开展黄河湿地植被生物量反演研究。赵少华等^[61]采用单通道算法把HJ-1B-IRS卫星数据应用于宁夏地区地表温度反演。上述应用都取得较好效果。

大气环境遥感应用方面,王桥和郑丙辉^[4]基于HJ-1B-IRS遥感数据,通过比较其第3波段中红外通道和第4波段热红外通道在同一像元亮度温度的差异,提取潜在热异常点,并根据背景环境温度及土地分类信息,识别耕地范围内秸秆焚烧点。贺宝华等^[62]提出基于观测几何的环境卫星红外相机遥感火点监测算法,并用高分辨率卫星影像和MODIS火点产品对环境卫星数据进行验证和比对,结果表明其在火点定位以及小面积火点识别方面具有优势。王中挺等^[63-64]利用HJ-1卫星CCD数据开展了PM₁₀和霾的遥感监测,结果表明卫星的时空分辨率满足PM₁₀周监测需要,但其辐射分辨率尚不能完全满足霾监测需求。方莉等^[65]利用HJ-1卫星在北京地区进行气溶胶反演研究,监测效果较好。

水环境遥感应用方面,王彦飞等^[66]从信噪比和数据真实性、倾斜条纹去除方法、大气校正方法等方面评价了HJ-1卫星高光谱数据对巢湖水质监测的适应性,发现其530~900 nm的数据质量较好。杨煜等^[67]利用HJ-1卫星高光谱数据,通过建立三波段模型开展巢湖叶绿素浓度的反演。朱利等^[43]利用HJ-1卫星多光谱数据,针对我国内陆水体提出叶绿素、悬浮物、透明度和富营养化的遥感监测模型,并在巢湖地区开展试验验证。潘邦龙等^[68-69]基于HJ-1卫星超光谱数据,采用多元回归克里格模型反演湖泊总氮、总磷浓度。余晓磊和巫兆聪^[70]利用HJ-1热红外影像反演了渤海海表温度,发现与美国的MODIS海表温度产品相关性较好。孙俊等^[71]利

用太湖流域2010年3月的HJ-1卫星热红外数据,采用多种算法反演太湖流域地表温度,并与同期的MOD11温度产品比对,探寻适合于环境卫星热红外通道反演地表温度的方法。

中国生态环境遥感监测起步较晚但发展迅速,环境一号卫星发射以来,卫星环境遥感技术得到了长足发展,出现一批以环境一号卫星生态环境遥感应用为目标的各种新技术、模型方法,呈现出环境一号卫星和国外卫星应用并举、国产卫星应用比例逐步加大的新局面,并基本建立了环境遥感技术体系等。我国环保部门利用卫星、航空等遥感数据,全面开展了环境污染、生态系统、核安全监管等方面的遥感监测业务,同时在环境应急监测方面取得突出成果,如大连溢油、松花江化学污染、舟曲泥石流、玉树地震、北方沙尘暴、官厅水库水色异常等环境事故应急监测和评估。为环境应急管理提供了高效的技术和信息支撑,环境遥感监测已成为常态化业务工作^[15]。

3.3 高分卫星应用期(2013—2020年)

李德仁等^[72]在2012年指出航空航天遥感正向高空间分辨率、高光谱分辨率、高时间分辨率、多极化、多角度的方向迅猛发展。2013年4月,高分一号卫星的成功发射拉开了国产高分卫星应用的序幕,该星搭载2 m全色/8 m多光谱相机(幅宽60 km)和大幅宽(800 km)16 m多光谱相机。截止到2019年11月,高分二号卫星到高分七号卫星也已全部顺利成功发射。生态环境部等国内许多单位利用高分系列卫星开展了大量生态环境遥感监测、应用和研究工作,为我国环境管理、研究等提供了强力支撑。

高磊和卢刚^[73]利用GF-1卫星数据估算了南京江北新区植被覆盖度,快速有效地反映地表植被的空间分布状况。张洁等^[38]基于面向对象分类法和GF-1卫星影像,开展青海省天峻县江仓第五露天矿区分类技术研究,实现高海拔脆弱生态环境下露天矿区的地物信息提取。由佳等^[74]以GF-4卫星数据为数据源开展了东洞庭湖湿地植被类型监测,发现GF-4影像可识别主要湿地植被类型。杨俊芳等^[39]基于GF-1和GF-2卫星数据监测了黄河三角洲入侵植物互花米草。雷志斌等^[75]基于GF-3雷达卫星和Landsat 8遥感数据,发展一种主动微波和光学数据协同反演浓密植被覆盖地表土壤水分模型,在山东省禹城实现了较好应用。

赵少华等^[76]介绍了GF-1卫星在气溶胶光学厚度、水华、水质、自然保护区人类活动等生态环境遥感监测和评价中的应用示范情况。侯爱华等^[77]利用2015年6—9月GF-1卫星数据反演的PM_{2.5}浓度,发现与地面监测结果较为接近、相关性较高,加入地理加权回归能明显提高模型精度,较好地反映PM_{2.5}的空间分布,但在PM_{2.5}浓度较高时模型会出现低估现象。薛兴盛等^[78]利用GF-1卫星反演徐州市气溶胶光学厚度并分析其空间特征。王中挺等^[79]、王艳莉等^[80]基于GF-4卫星数据开展了气溶胶反演,利用地面观测结果验证发现二者之间具有较高的相关性,表明该方法能较好的反映气溶胶的空间分布。屈冉等^[81]利用GF-1卫星在山东寿光开展农膜遥感信息提取技术研究,结果表明其可较好提取农膜信息。张雅琼等^[47]利用GF-1卫星影像研究提出了生态空间周边余泥渣土场快速提取方法。

彭保发等^[82]基于GF-1卫星影像对2014—2016年洞庭湖水体的叶绿素a浓度、悬浮物浓度和透明度开展遥感监测,结果表明GF-1号卫星可精确反映水质的空间变化规律。温爽等^[83]以南京市为例开展基于GF-2卫星影像的城市黑臭水体遥感识别,发现黑臭河段分布具有范围广且不连续的特征。龚文峰等^[84]基于GF-2卫星遥感影像开展了界河水体信息提取,发现支持向量机法和改进阴影水体指数法可应用于GF-2地表水体提取。范剑超等^[85]利用GF-3号雷达卫星,以大连金州湾为例研究围填海监测方法,调查验证表明其可以有效获取围填海信息。杨超宇等^[86]利用GF-4卫星数据监测了广西临近海域赤潮、叶绿素浓度等。

这个时期生态环境遥感技术发展再次飞跃,中国发射国产高分系列卫星和相关环境应用卫星,形成以国产高分卫星为主的生态环境遥感应用良好局面,未来中国还将发射并立项一批环境后续卫星,国产卫星对国外卫星数据的替代率将进一步提高,生态环境部机构组建完成并开始发挥更强有力的作用,国家组织完成全国生态系统状况十年变化调查评估、全国生态系统状况五年变化调查评估,生态环境遥感应用进入发展的黄金时期。

4 生态环境遥感支撑生态文明建设40年

生态环境遥感监测已经成为生态环境监测不

可或缺的重要组成部分,在全国生态状况调查评估、污染防治攻坚战、应急与监督执法等方面发挥着重要作用,有力支撑着我国生态文明建设。

4.1 全国生态状况定期调查评估

2000年以来,生态环境部(原环境保护部、国家环境保护总局)联合相关部门已经完成了三次调查评估,对生态状况总体变化做出判断。2000年以来,中国的生态状况总体在好转,特别是“十八大”以来,党中央国务院高度重视生态环境保护,采取了一系列措施,取得了积极成效,改善趋势更加明显^[85]。其中,第一次是与国家测绘局合作,分别于2000年和2002年开展的中西部、东部生态环境现状遥感调查。第二次和第三次是与中国科学院合作,分别完成了2000—2010年全国生态变化调查评估、2010—2015年全国状况变化调查评估,构建形成了“天地一体化”生态状况调查技术体系,建立形成“格局—质量—功能—问题—胁迫”的国家生态评估框架^[87-88],成果在长江经济带和京津冀等区域生态环境规划、全国生态环境保护规划、全国生态功能区划及修编、生态保护红线划定等多项重要工作中发挥了基础性支撑作用,尤其是在推动形成和落实主体功能区战略方面发挥了重要作用。近期,生态环境部和中国科学院启动了2015—2020年全国生态状况变化调查评估工作。

随着生态文明理念的提出,国家多个部门也陆续利用多源遥感技术开展了多个方面的生态监测评估。2013年水利部门完成的水土保持情况普查,首次利用了地面调查与遥感技术相结合的方法,查清了西北黄土高原区和东北黑土区的侵蚀沟道的数量、分布与面积^[89]。2017年农业部门启动的全国第二次草地资源清查工作,要求将已有数据资料和中高分辨率卫星遥感数据相结合,形成1:5万比例尺的预判地图。2017年开始,气象部门以遥感监测的植被净初级生产力和覆盖度为主开展植被生态监测,每年发布《全国生态气象公报》。2014年开始,科技部组织有关科研单位每年选择一些专题开展全球生态环境遥感监测,2019年选择了全球森林覆盖状况及变化、全球土地退化态势、全球重大自然灾害及影响、全球大宗粮油作物生产与粮食安全形势4个专题。

4.2 污染防治攻坚战的遥感支撑

为了切实改善环境质量,“十九大”报告中首次

提出要坚决打好污染防治攻坚战,生态环境部是牵头负责部门。围绕着国家重大需求,生态环境部卫星环境应用中心在生态、大气、水和土壤方面开展了一系列生态环境遥感监测的业务化应用。主要有:

(1)在自然生态方面。2012年开始的国家重点生态功能区县域考核监测,累计对60多个考核县域进行无人机飞行抽查,发现大量生态破坏情况,有力支持县域生态环境质量考核及转移支付资金分配状况调查。2016年开始,每年2次对国家级自然保护区、每年1次对省级自然保护区人类活动变化开展遥感动态监测,以及对生物多样性保护优先区域开展定期遥感监测。2017年前后,对秦岭北麓生态破坏、祁连山生态破坏、腾格里沙漠工业排污、青海木里矿区资源开发生态影响等重大事件的遥感监测,有力支撑了国家生态保护管理。2018年全面启动了国家生态保护红线监管平台项目建设。

(2)在蓝天保卫战方面。2012年细颗粒物 $PM_{2.5}$ 纳入空气质量监测范围和2013年国务院印发《大气污染防治行动计划》^[90]之后,开展全国重点区域秸秆焚烧遥感监测、灰霾和 $PM_{2.5}$ 遥感监测。2017年提出污染防治攻坚战之后,开展蓝天保卫战重点区域的“散乱污”企业监管,同时对全国、京津冀及周边主要城市、长江三角洲地区、汾渭平原等区域的大气细颗粒物浓度、灰霾天数、污染气体浓度开展遥感监测。

(3)在碧水保卫战方面。实现了每周对太湖、巢湖、滇池蓝藻水华和富营养化的遥感动态监测,开展了全国300多个饮用水源地、80多个良好湖库、36个重点城市黑臭水体、近岸海域赤潮和溢油等遥感监测。2015年国务院印发《水污染防治行动计划》^[91]之后,饮用水源地监管、黑臭水体监测和面源污染监测业务得到快速发展,先后完成2017年和2018年全国1 km网格农业和城镇面源污染遥感监测与评估,2019年开展了渤海、长江入海(河)排污口无人机排查。

(4)在净土保卫战方面。在2016年国务院印发《土壤污染防治行动计划》^[92]之后,土壤遥感监测业务得到快速发展。根据土壤污染详查工作需要开展了土壤污染重点行业企业筛选、重点行业企业空间位置遥感核实等工作,研发了土壤重点污染源遥感核查平台,制定土壤重点污染源清单及空间位置确定技术规定,开展全国重点行业企业土壤污染风险遥感评价等。

由于蓝天保卫战是污染防治攻坚战中的重中之重,除了生态环境部门之外,气象部门围绕着大

气成分也开展了大量的遥感监测研究,张艳^[93]等监测了大气臭氧总量分布及其变化,张晔萍等^[94]监测全球和中国区域大气CO变化,李晓静^[95]等监测了全球大气气溶胶光学厚度变化。京津冀地区作为重点关注区域,李令军等^[96]基于卫星遥感与地面监测分析了北京大气 NO_2 污染特征分析。作为科学研究,孙冉^[97]开展了中国中东部大气颗粒物光学特性卫星和地面遥感的联合监测,胡蝶^[98]开展了中国地区大气气溶胶光学厚度的卫星遥感监测分析。

4.3 应急与监督执法等遥感技术支持

针对生态环境应急事件和监督执法,生态环境部卫星环境应用中心利用卫星和无人机等遥感手段,开展了大量业务化应用。在应急方面,对2019年江苏盐城响水陈家港化工园区爆炸、2018年“桑吉”油轮碰撞燃爆事故溢油、2015年天津港特大火灾爆炸、2015年甘肃尾矿库泄漏、2014年云南鲁甸地震等突发事件进行了遥感应急监测和评估。在中央生态环境保护督察和监督执法方面,2017年开始针对自然保护区有关问题和督察发现的有关问题整改情况开展了“回头看”遥感监测,2014—2015年对河北、河南、山东、山西等地工业集聚区大气污染源进行60多个架次无人机核查。在环境影响评价方面,2017—2019年开展长江经济带沿江区域工业聚集区土地利用变化分析及重点问题区域识别,2017—2018年完成兰渝铁路、京新高速乌海西段建设项目施工期地表扰动遥感监测,2016年开展了京津冀地区规划环评遥感分析,2014—2019年开展成兰铁路建设施工期环境监理遥感监测。

国土资源部门自2010年起,就开始利用遥感技术开展监管执法,重点对土地利用是否合法合规、矿产资源开采是否合法合规等进行监测监管,服务于监督执法,初步形成了“天上看、地上查、网上核”的立体监管体系。水利部门在2012年编制发布了《水土保持遥感监测技术规范》^[99],利用遥感技术开展生态建设项目水土保持遥感监管,及时发现破坏水土保持功能的违法违规行为。

5 结论与展望

经历了近40年的发展,中国生态环境遥感应用领域逐步扩大、监测精度明显提升、监测时效大幅增强,对地观测卫星体系的时空分辨率取得飞跃发

展,实现了由依赖国外数据向以国产数据为主的历史性转变,广泛应用于生态、大气、水、土壤等生态环境监测评估和管理决策的各个领域,为生态文明和美丽中国建设提供着有效支撑。随着卫星遥感技术的发展,卫星遥感对国家发展战略的支撑作用将越来越大,对长江经济带、京津冀、粤港澳大湾区、黄河流域等重要战略区域的生态保护和高质量发展将提供越来越重要的技术支撑,对美丽中国和生态文明建设提供越来越重要的技术支撑,为推动“一带一路”倡议、全球变化监测和全球生态共同体建设提供越来越重要的技术支撑。

但是,由于生态环境自身的复杂性和遥感技术的特点,仍有许多关键技术问题值得关注和研究解决,进而提升遥感技术对生态环境管理的支撑能力和水平。主要包括:

(1)高性能的生态环境遥感监测专用载荷。生态环境涉及内容和学科领域广泛,需要聚焦生态环境质量改善和美丽中国建设的核心目标,重点关注大气、水环境污染物监测的关键性指标,优先这些监测指标所需要的多光谱、高光谱传感器,尽可能提高空间分辨率和时间分辨率,提高大气和水环境的卫星遥感监测能力。

(2)生态环境遥感监测的机理模型与算法。对于基于遥感数据反演得到的生态环境专题信息来说,精度和准确度是关键。目前,生态环境遥感监测的模型与算法以回归模型或国外模型为主,在推广应用方面具有很大的局限,迫切需要耦合研究生态环境过程和遥感对地观测过程,提高科学认知,研究建立适用于中国生态环境特点的遥感监测机理模型与算法。

(3)生态环境遥感监测的业务化应用技术。虽然生态环境遥感的高性能专用载荷和机理模型算法是业务化应用的重要基础,但是,从实现算法的高精度到实现产品的高精度,才是实现业务化应用的关键。例如,某区域某种人类活动信息的自动提取精度可以做到很高,但是实现任何区域任何人类活动信息的自动提取精度会很难,只有解决这一问题才能实现业务化运行。与大气和水环境遥感监测相比,生态遥感监测指标和内容更加综合,迫切需要基于生态系统结构、过程和功能解决生态遥感监测业务化应用技术问题。

(4)国产卫星遥感数据的推广应用。只有更加

广泛地使用国产卫星遥感数据,才能够发现国产卫星数据和传感器的不足,才能科学解决存在的问题,推动国产卫星遥感观测基础能力的改进与提升。国家要创新管理机制,提倡和鼓励社会各界优先使用国产卫星遥感数据,形成“我要用”的主动行为而不是“要我用”的被动行为,提高国产卫星综合效益和科技发展水平。

参考文献(References):

- [1] 梅安新,彭望球,秦其明,等.遥感导论[M].北京:高等教育出版社,2001. [Mei A X, Peng W L, Qin Q M, et al. Introduction to remote sensing [M]. Beijing: Higher Education Press, 2001.]
- [2] 郭之怀.遥感技术在环境保护领域中的应用现状[J].环境科学,1993,14(4):28-33. [Guo Z H. Application status of remote sensing technology in environmental protection [J]. Environmental Science, 1993,14(4):28-33.]
- [3] 陈述彭.天津—环渤海地区环境遥感论文集[M].北京:科学出版社,1985:1-6. [Chen S P. Proceedings of Tianjin-Bohai rim environmental remote sensing[M]. Beijing: Science Press, 1985:1-6.]
- [4] 王桥,郑丙辉.环境遥感技术研究与应用进展[J].卫星应用,2006,14(1):35-40. [Wang Q, Zhen B H. Research and application progress of environmental remote sensing technology[J]. Satellite Application, 2006,14(1):35-40.]
- [5] 童庆禧.中国遥感发展及其贡献[J].中国科学院院刊,2013(z1):17-24. [Tong Q X. Development and Contribution of Remote Sensing in China[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2013(z1):17-24.]
- [6] 虞献平.“三北”防护林遥感综合调查[J].遥感信息,1987(1):39-40. [Yu X P. Remote sensing comprehensive investigation of "Three North" shelterbelts[J]. Remote Sensing Information, 1987(1):39-40.]
- [7] 陈光伟.黄土高原资源与环境遥感调查简介[J].自然资源学报,1987,2(3):287-288. [Chen G W. Remote sensing survey of resources and environment in the Loess Plateau [J]. Journal of Natural Resources, 1987,2(3):287-288.]
- [8] 张增祥.我国资源环境遥感监测技术及其进展[J].中国水利,2004(11):52-54. [Zhang Z X. Remote sensing technology used in resource and environment monitoring in China and its development[J]. China Water Resources, 2004(11):52-54.]
- [9] 刘纪远.国家资源环境遥感宏观调查与动态监测研究[J].遥感学报,1997,1(3):225-230. [Liu J Y. Study on National Resources & Environment Survey and Dynamic Monitoring Using Remote Sensing [J]. Journal of Remote

- Sensing, 1997,1(3):225-230.]
- [10] 朱会义,李秀彬,何书金,等.环渤海地区土地利用的时空变化分析[J].地理学报,2001,68(3):253-260. [Zhu H Y, Li X B, He S J, et al. Spatio-temporal change of land use in Bohai Rim[J]. Acta Geographica sinica, 2001,68(3): 253-260.]
- [11] 刘军会,高吉喜.北方农牧交错带界线变迁区的土地利用与景观格局变化[J].农业工程学报,2008,24(11):76-82. [Liu J H, Gao J X. Changes of land use and landscape pattern in the boundary change areas in farming-pastoral eco-tone of Northern China[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2008,24(11):76-82.]
- [12] 刘军会,高吉喜,马苏,等.中国生态环境敏感区评价[J].自然资源学报,2015,30(10):1607-1616. [Liu J H, Gao J X, Ma S, et al. Evaluation of ecological sensitivity in China[J]. Journal of Natural Resources, 2015,30(10):1607-1616.]
- [13] 侯鹏,翟俊,曹巍,等.国家重点生态功能区生态状况变化与保护成效评估——以海南岛中部山区国家重点生态功能区为例[J].地理学报,2018,73(3):429-441. [Hou P, Zhai J, Cao W, et al. Ecosystem changes and implementation effect evaluation in the national key ecological function zones: central mountainous area of Hainan Island[J]. Acta Geographica Sinica, 2018,73(3):429-441.]
- [14] 侯鹏,王桥,杨旻,等.生态保护红线成效评估框架与指标方法[J].地理研究,2018,37(10):1927-1937. [Hou P, Wang Q, Yang M, et al. China's ecological protection redlines: Evaluation framework and method of protection effect[J]. Geographical research, 2018,37(10):1927-1937.]
- [15] 侯鹏,杨旻,翟俊,等.论自然保护地与国家生态安全格局构建[J].地理研究,2017,36(3):420-428. [Hou P, Yang M, Zhai J, et al. Discussion about natural reserve and construction of national ecological security pattern[J]. Geographical Research, 2017,36(3):420-428.]
- [16] 郑新江,罗敬宁,刘征. FY-1C气象卫星在沙尘暴监测中的应用[J].上海航天,2001(1):55-60. [Zhen X J, Luo J N, Liu Z. Study of using FY-1c meteorological satellite to monitor the dust storm[J]. Aerospace Shanghai, 2001(1): 55-60.]
- [17] 何立明,王文杰,王桥,等.中国秸秆焚烧的遥感监测与分析[J].中国环境监测,2007,23(1):42-50. [He L M, Wang W J, Wang Q, et al. Evaluation of the agricultural residues burning reduction in China using MODIS Fire Product[J]. Environmental Monitoring in China, 2007,23(1): 42-50.]
- [18] 高一博,梅世玉,麻金继,等.基于OMI数据2005-2012年中国区域SO₂时空变化特征研究[J].大气与环境光光学报,2016,11(4):300-312. [Gao Y B, Mei S Y, Ma J G, et al. Spatiotemporal variations of SO₂ over China by OMI observations during 2005-2012[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2016,11(4):300-312.]
- [19] 周春艳,厉青,张丽娟,等.遥感监测2005-2015年中国NO₂时空特征及分析影响因素[J].遥感技术与应用,2016,31(6):1190-1200. [Zhou C Y, Li Q, Zhang L J, et al. Spatio-temporal change and influencing factors of tropospheric NO₂ column density of China during 2005-2015[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2016,31(6): 1190-1200.]
- [20] 孟倩文,尹球.中国区域CO₂多年时空变化的卫星遥感分析[J].遥感技术与应用,2016,31(2):203-213. [Meng Q W, Yin Q. Remote sensing analysis of multi-years spatial and temporal variation of CO₂ in China [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2016,31(2):203-213.]
- [21] 张兴赢,周敏强,王维和,等.全球卫星大气成分遥感探测应用进展及其展望[J].科技导报,2015,33(17):13-22. [Zhang X Y, Zhou M Q, Wang W H, et al. Progress of global satellite remote sensing of atmospheric compositions and its' applications[J]. Science & Technology Review, 2015, 33(17):13-22.]
- [22] 朱利,王桥,吴传庆,等.巢湖水华遥感监测与年度统计分析研究[J].中国环境监测,2013,29(2):162-166. [Zhu L, Wang Q, Wu C Q, et al. Monitoring and annual statistical analysis of algal blooms in Chaohu based on remote sensing[J]. Environmental Monitoring in China, 2013,29(2): 162-166.]
- [23] 吴传庆.基于高光谱技术的湖泊富营养化监测遥感机理研究[D].北京:北京师范大学,2008:10-100. [Wu C Q. Study on remote sensing mechanism of lake eutrophication monitoring based on hyperspectral technology[D]. Beijing: Beijing Normal University, 2008:10-100.]
- [24] 马荣华,唐军武,段洪涛,等.湖泊水色遥感研究进展[J].湖泊科学,2009,21(2):143-158. [Ma R H, Tang J W, Duan H T, et al. Progress in lake water color remote sensing[J]. Journal of Lake Sciences, 2009,21(2):143-158.]
- [25] 郭宇龙,李云梅,李渊,等.一种基于GOCI数据的叶绿素a浓度三波段估算模型[J].环境科学,2015,36(9):3175-3185. [Guo Y L, Li Y M, Li Y, et al. A three band chlorophyll-a concentration estimation model based on GOCI imagery [J]. Environmental Science, 2015,36(9):3175-3185.]
- [26] 杜成功,李云梅,王桥,等.面向GOCI数据的太湖总磷浓度反演及其日内变化研究[J].环境科学,2016,37(3): 862-872. [Du C G, Li Y M, Wang Q, et al. Inversion model and daily variation of total phosphorus concentrations in

- Taihu lake based on GOCI data[J]. *Environmental Science*, 2016,37(3):862-872.]
- [27] 申茜,朱利,曹红业.城市黑臭水体遥感监测与筛查研究进展[J].*应用生态学报*,2017,28(10): 3433-3439. [Shen Q, Zhu L, Cao H Y. Remote sensing monitoring and screening for urban black and odorous water body: A review[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017,28(10):3433-3439.]
- [28] 姚延娟,王桥,吴迪. 饮用水水源地环境质量遥感监测评价与应用示范[J]. *环境保护*,2016(21):36-41. [Yao Y J, Wang Q, Wu D. Remote sensing monitoring technology evaluation system and application for drinking water source environmental quality[J]. *Environmental Protection*, 2016(21):36-41.]
- [29] Pan Y Q, Shen F, Wei X D. Fusion of Landsat-8/OLI and GOCI data for hourly mapping of suspended particulate matter at high spatial resolution: A case study in the Yangtze (Changjiang) estuary[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(2):158.
- [30] 王夷萍,郑慧敏,孙华,等.土壤重金属污染农艺修复及其高光谱遥感监测研究评述[J].*农业资源与环境学报*, 2007,24(3):68-72. [Wang Y P, Zheng H M, Sun H, et al. Review on agricultural remediation and hyperspectral remote sensing monitoring of heavy metal pollution in soil [J]. *Environmental Control*, 2007,24(3):68-72.]
- [31] 熊文成,聂忆黄,王桥,等.土壤污染遥感研究进展及应用展望[J].*环境与可持续发展*,2017(6):53-56. [Xiong W C, Nie Y H, Wang Q, et al. Progress in soil pollution remote sensing and its application Prospect[J]. *Environment and Sustainable Development*, 2017(6):53-56.]
- [32] 蔡东全,吴泉源,曹学江,等.基于HJ1A-HSI的龙口污水灌溉区土壤重金属含量反演[J].*安全与环境工程*,2015, 22(5):33-39. [Cai D Q, Wu Q Y, Cao X J, et al. Quantitative retrieval of soil heavy metal content in Longkou Wastewater irrigation area based on HJ1A-HIS Images [J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2015,22(5): 33-39.]
- [33] 郭云开,曹小燕,石自桂.水稻冠层光谱变化特征的土壤重金属含量反演研究[J].*遥感信息*,2015,30(3):116-123. [Guo Y K, Cao X Y, Shi Z G. Inversion model of total amount of soil heavy metal based on spectral characteristics of rice canopy[J]. *Remote Sensing Information*, 2015, 30(3):116-123.]
- [34] 宋婷婷,付秀丽,陈玉,等.云南个旧矿区土壤锌污染遥感反演研究[J].*遥感技术与应用*,2018,33(1):88-95. [Song T T, Fu X L, Chen Y, et al. Remote sensing inversion of soil Zinc pollution in Gejiu Mining area of Yunnan[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2018,33(1): 88-95.]
- [35] 张冲冲,南颖,赵洋.基于多时相环境一号卫星 CCD 数据的植被覆盖信息快速提取研究——以长白山地区为例 [J].*地理与地理信息科学*,2013,29(5):41-44. [Study on vegetation classification based on multi-temporal HJ-1 CCD data: the Changbai Mountain Area as a case[J]. *Geography and Geo-information Science*, 2013,29(5):41-44.]
- [36] 张方利,杜世宏,郭舟.应用高分辨率影像的城市固体废物提取[J].*光谱学与光谱分析*,2013,33(8):2024-2030. [Zhang F L, Du S H, Guo Z. Extraction of municipal solid waste from high resolution images[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2013,33(8):2024-2030.]
- [37] 郭舟,杜世宏,张方利.基于高分辨率卫星影像的城市建设区提取[J].*北京大学学报(自然科学版)*,2013,49(4): 635-642. [Guo Z, Du S H, Zhang F L. Extracting municipal construction zones from high-resolution remotely sensed image[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2013,49(4):635-642.]
- [38] 张洁,熊永合,程璐.基于面向对象分类法和高分一号影像的露天矿区分类技术研究[J].*青海大学学报(自然科学版)*,2018,36(1):94-100. [Zhang J, Xiong Y H, Cheng L. Classification of open-pit mine area based on object-oriented technology with GF-1 remote sensing image[J]. *Journal of Qinghai University (Natural Science)*, 2018,36(1):94-100.]
- [39] 杨俊芳,马毅,任广波,等.基于国产高分卫星遥感数据的现代黄河三角洲入侵植物互花米草监测方法[J].*海洋环境科学*,2017,36(4):596-602. [Yang J F, Ma Y, Ren G B, et al. Monitoring method of invasive vegetation *Spartina alterniflora* in modern Yellow River delta based on gf remote sensing data[J]. *Marine Environmental Science*, 2017, 36(4):596-602.]
- [40] 王中挺,厉青,李莘莘,等.基于环境一号卫星的霾监测应用[J].*光谱学与光谱分析*,2012,32(3):775-780. [Wang Z T, Li Q, Li X X, et al. The monitoring of haze from HJ-1[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012,32(3): 775-780.]
- [41] 陈辉,厉青,李营,等.京津冀及周边地区 PM_{2.5} 时空变化特征遥感监测分析[J].*环境科学*,2019,40(1):33-43. [Chen H, Li Q, Li Y, et al. Monitoring and analysis of the spatio-temporal change characteristics of the PM_{2.5} concentration over Beijing-Tianjin-Hebei and its surrounding regions based on remote sensing[J]. *Environmental Science*, 2019,40(1): 33-43.]

- [42] 马鹏飞,厉青,陈辉,等.京津冀及周边地区大气污染防治重点关注区域遥感综合分析[J].遥感技术与应用,2019,34(2):404-411. [Ma P F, Li Q, Chen H, et al. Remote sensing synthetic analysis of key areas of air pollution in Beijing-Tianjin-Hebei(BTH) and its surrounding area. Remote Sensing Technology and Application, 2019,34(2): 404-411.]
- [43] 朱利,姚延娟,吴传庆,等.基于环境一号卫星的内陆水体水质多光谱遥感监测[J].地理与地理信息科学,2010,26(2):81-84. [Zhu L, Yao Y J, Wu C Q, et al. Remote sensing monitoring on water quality of interior water body based on the HJ-1 Satellite multi-spectral data[J]. Geography and Geo-information Science, 2010,26(2):81-84.]
- [44] 阎福礼,王世新,周艺,等.利用Hyperion星载高光谱传感器监测太湖水质的研究[J].红外与毫米波学报,2006,25(6):460-464. [Yan F L, Wang S X, Zhou Y, et al. Monitoring the water quality of TaiHu Lake by using hyperion hyper spectral data[J]. Infrared Millim Waves, 2006,25(6): 460-464.]
- [45] 赵少华,张峰,李自杰,等.雷达遥感在环境保护工作中的应用概述[J].微波学报,2014,30(1):90-96. [Zhao S H, Zhang F, Li Z J, et al. Summary of radar remote sensing application in environmental protection[J]. Journal of Microwaves, 2014,30(1):90-96.]
- [46] 黄长平,刘波,张霞,等.土壤重金属Cu含量遥感反演的波段选择与最佳光谱分辨率研究[J].遥感技术与应用,2010,25(3):353-357. [Huang C P, Liu B, Zhang X, et al. Study on band selection and optimal spectral resolution for prediction of Cu contamination in soils[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2010,25(3):353-357.]
- [47] 张雅琼,赵宇昕,屈冉,等.基于GF-1卫星遥感影像的生态空间周边建筑余泥渣土场提取方法研究[J].环境保护科学,2018,44(6):50-55,89. [Zhang Y Q, Zhao Y X, Qu R, et al. Study of extraction method of construction waste residue fields around ecological space based on GF-1 Satellite remote sensing image[J]. Environmental Protection Science, 2018,44(6):50-55,89.]
- [48] 顾行发,余涛,田国良,等.40年的跨越——中国航天遥感蓬勃发展中的“三大战役”[J].遥感学报,2016,20(5):781-793. [Gu X F, Yu T, Tian G L, et al. Up to the higher altitude: The new "three campaigns" for the development of China spaceborne remote sensing application[J]. Journal of Remote Sensing, 2016,20(5):781-793.]
- [49] 龚燃,刘韬.2018年国外对地观测卫星发展综述[J].国际太空,2019(2):48-55. [Gong R, Liu T. A review of the development of foreign earth observation satellites in 2018 [J]. Space International, 2019(2):48-55.]
- [50] 及莉.美国对地观测卫星系统在轨运行与应用服务管理[J].卫星应用,2017(4):40-46. [On orbit operation and application service management of us Earth Observation Satellite System[J]. Satellite Application, 2017(4):40-46.]
- [51] 史培军,潘耀忠,陈晋,等.深圳市土地利用/覆盖变化与生态环境安全分析[J].自然资源学报,1999,14(4):293-299. [Shi P J, Pan Y Z, Chen J, et al. Land use /cover change and environmental security in Shenzhen region[J]. Journal of Natural Resources, 1999,14(4):293-299.]
- [52] 吴炳方,李苗苗,颜长珍,等.生态环境典型治理区5年期遥感动态监测[J].遥感学报,2005,9(1):32-38. [Wu B F, Li M M, Yan C Z, et al. Environment monitoring over 1997-2002 with remote sensing in 5 national environmental projected sites[J]. Journal of Remote Sensing, 2005,9(1):32-38.]
- [53] 罗敬宁,范一大,史培军,等.多源遥感数据沙尘暴强度监测的信息可比方法[J].自然灾害学报,2003,12(2):28-34. [Luo J N, Fan Y D, Shi P J, et al. Information-comparable method of monitoring the intensity of dust storm by multisource data of remote sensing[J]. Journal of Natural Disasters, 2003,12(2):28-34.]
- [54] 王子峰,陈良富,顾行发.基于MODIS数据的华北地区秸秆焚烧监测[J].遥感技术与应用,2008,23(6):611-617. [Wang Z F, Chen L F, Gu X F. Monitoring of crop residue burning in North China on the basis of MODIS data [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2008,23(6):611-617.]
- [55] 杨一鹏,王桥,肖青,等.基于TM数据的太湖叶绿素a浓度定量遥感反演方法研究[J].地理与地理信息科学,2006,22(2):5-8. [Yang Y P. Quantitative remote sensing inversion methods of chlorophyll-a concentration in Taihu Lake based on TM data [J]. Geography and Geo-information Science, 2006,22(2):5-8.]
- [56] 阎福礼,王世新,周艺,等.利用Hyperion星载高光谱传感器监测太湖水质的研究[J].红外与毫米波学报,2006,25(6):460-464. [Yan F L, Wang S X, Zhou Y, et al. Monitoring the water quality of TaiHu Lake by using hyperion hyper spectral data[J]. Infrared Millim Waves, 2006,25(6): 460-464.]
- [57] 李俊生,张兵,申茜,等.航天成像光谱仪CHRIS在内陆水质监测中的应用[J].遥感技术与应用,2007,22(5):593-597. [Li J S, Zhang B, Shen Q, et al. Application of space borne imaging spectrometry CHRIS in monitoring of inland water quality[J]. Remote Sensing Technology

- and Application, 2007,22(5):593-597.]
- [58] 万华伟,王昌佐,李亚,等.基于高光谱遥感数据的入侵植物监测[J].农业工程学报,2010,26(S2):59-63. [Wan H W, Wang C Z, Li Y, et al. Monitoring an invasive plant using hyperspectral remote sensing data[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010,26(S2):59-63.]
- [59] 刘晓曼,王桥,孙中平,等.基于环境一号卫星的自然保护区生态系统健康评价[J].中国环境科学,2011,31(5):863-870. [Liu X M, Wang Q, Sun Z P, et al. Assessment of ecosystem health of nature reserve based on HJ-1 remote sensing imagery[J]. China Environmental Science, 2011, 31(5):863-870.]
- [60] 高明亮,赵文吉,宫兆宁,等.基于环境卫星数据的黄河湿地植被生物量反演研究[J].生态学报,2013,33(2):542-553. [Gao M L, Zhao W J, Gong Z N, et al. The study of vegetation biomass inversion based on the HJ satellite data in Yellow River wetland[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013,33(2):542-553.]
- [61] 赵少华,秦其明,张峰,等.基于环境减灾小卫星(HJ-1B)的地表温度单窗反演研究[J].光谱学与光谱分析,2011,31(6):1552-1556. [Zhao S H, Qin Q M, Zhang F, et al. Research on using a Mono-Window algorithm for land surface temperature retrieval from Chinese satellite for environment and natural disaster monitoring(HJ-1B) data[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2011,31(6):1552-1556.]
- [62] 贺宝华,陈良富,陶金花,等.基于观测几何的环境卫星红外相机遥感火点监测算法[J].红外与毫米波学报,2011,30(2):104-108,114. [He B H, Chen L F, Tao J H, et al. A contextual fire detection algorithm based on observation geometry for HJ-1B-IRS[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2011,30(2):104-108,114.]
- [63] 王中挺,王子峰,厉青,等.环境一号卫星在监测大气PM10中的应用[J].中国环境科学,2011,31(2):202-206. [Wang Z T, Wang Z F, Li Q, et al. Monitoring of PM10 from HJ-1 CCD data[J]. China Environmental Science, 2011,31(2):202-206.]
- [64] 王中挺,陈良富,张莹,等.利用MODIS数据监测北京地区气溶胶[J].遥感技术与应用,2008,23(3):284-288. [Wang Z T, Chen L F, Zhang Y, et al. Urban surface aerosol monitoring using DDV method from MODIS data[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2008,23(3): 284-288.]
- [65] 方莉,余涛,顾行发,等.北京地区HJ-1卫星CCD数据的气溶胶反演及在大气校正中的应用[J].遥感学报,2013,17(1):151-164. [Fang L, Yu T, Gu X F, et al. Aerosol retrieval and atmospheric correction of HJ-1 CCD data over Beijing[J]. Journal of Remote Sensing, 2013,17(1): 151-164.]
- [66] 王彦飞,李云梅,吕恒,等.环境一号卫星高光谱遥感数据的内陆水质监测适宜性——以巢湖为例[J].湖泊科学,2011,23(5):789-795. [Wang Y F, Li Y M, Lv H, et al. Suitability assessment of lake water quality monitoring on water body images acquired by HJ-1A hyper spectral imager: A case study of Lake Chaohu[J]. Journal of Lake Sciences, 2011,23(5):789-795.]
- [67] 杨煜,李云梅,王桥,等.基于环境一号卫星高光谱遥感数据的巢湖水体叶绿素a浓度反演[J].湖泊科学,2010,22(4):495-503. [Yang Y, Li Y M, Wang Q, et al. Retrieval of chlorophyll-a concentration by Three-band model in Lake Chaohu[J]. Journal of Lake Sciences, 2010,22(4): 495-503.]
- [68] 潘邦龙,易维宁,王先华,等.基于环境一号卫星超光谱数据的多元回归克里格模型反演湖泊总氮浓度的研究[J].光谱学与光谱分析,2011,31(7):1884-1888. [Pan B L, Yi W N, Wang X H, et al. Inversion of the lake total nitrogen concentration by multiple regression kriging model based on hyperspectral data of HJ-1A[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2011,31(7):1884-1888.]
- [69] 潘邦龙,易维宁,王先华,等.湖泊水体高光谱遥感反演总磷的地统计算法设计[J].红外与激光工程,2012,41(5):1255-1260. [Pan B L, Yi W N, Wang X H, et al. Geostatistics algorithm design on hyperspectral inversion of total phosphorus of lake[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012,41(5):1255-1260.]
- [70] 余晓磊,巫兆聪.利用环境一号卫星热红外影像反演渤海海表温度[J].海洋技术,2011,30(2):1-6. [Yu X L, Wu Z C. SST retrieving of Bohai Sea using thermal infrared images on HJ-1 Satellite[J]. Ocean Technology, 2011,30(2): 1-6.]
- [71] 孙俊,张慧,王桥,等.利用环境一号卫星热红外通道反演太湖流域地表温度的3种方法比较[J].生态与农村环境学,2011,27(2):100-104. [Sun J, Zhang H, Wang Q, et al. Three methods for inverting land surface temperature of the Taihu Lake Basin using HJ-1 Satellite thermal infrared channel[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2011,27(2):100-104.]
- [72] 李德仁,童庆禧,李荣兴,等.高分辨率对地观测的若干前沿科学问题[J].中国科学(地球科学),2012,42(6):805-813. [Li D R, Tong Q X, Li R X, et al. Current issues in high-resolution earth observation technology[J]. Science China Earth Science, 2012,42(6):805-813.]

- [73] 高磊,卢刚.基于GF-1数据的南京江北新区植被覆盖度遥感估算[J].安徽农业科学,2016(10):246-247,268. [Gao L, Lu G. Estimating vegetation coverage of Nanjing Jiangbei district based on the GF-1 Data[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2016(10):246-247,268.]
- [74] 由佳,张怀清,陈永富,等.基于GF-4号卫星影像东洞庭湖湿地植被类型监测能力比较研究[J].安徽农业科学,2018,46(3):152-156,168. [You J, Zhang H Q, Chen Y F, et al. Based on the GF-4 Satellite image for the East Dongting Lake Wetland vegetation type monitoring ability[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2018,46(3): 152-156,168.]
- [75] 雷志斌,孟庆岩,田淑芳,等.基于GF-3和Landsat 8遥感数据的土壤水分反演研究[J].地球信息科学学报,2019,21(12):1965-1976. [Lei Z B, Meng Q Y, Tian S F, et al. Soil moisture retrieval study based on GF-3 and Landsat8 remote sensing data[J]. Journal of Geo-information Science, 2019,21(12):1965-1976.]
- [76] 赵少华,王桥,杨一鹏,等.高分一号卫星环境遥感监测应用示范研究[J].卫星应用,2015(3):37-40. [Zhao S H, Wang Q, Yang Y P, et al. Study application on environmental remote sensing monitoring of GF-1 satellite[J]. Satellite Application, 2015(3):37-40.]
- [77] 侯爱华,高伟,王中挺,等.利用高分一号卫星监测开封地区PM_{2.5}[J].国土资源遥感,2017,29(4):161-165. [Hou A H, Gao W, Wang Z T, et al. Estimation of PM_{2.5} concentration from GF-1 data in Kaifeng City[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2017,29(4):161-165.]
- [78] 薛兴盛,郑硕,白杨,等.徐州市GF-1卫星气溶胶光学厚度反演与空间特征分析[J].安徽农业大学学报,2019,46(4):689-696. [Xue X S, Zhen S, Bai Y, et al. Aerosol optical depth retrieval and spatial characteristics analysis of GF-1 satellite in Xuzhou[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2019,46(4):689-696.]
- [79] 王中挺,张玉环,袁淑云,等.利用高分四号数据监测“京津冀”地区陆地气溶胶[J].环境与可持续发展,2016,41(5):113-116. [Wang Z T, Zhang Y H, Yuan S Y, et al. The aerosol monitoring over Beijing-Tianjin-Hebei region from GF-4 data[J]. Environment and Sustainable Development, 2016,41(5):113-116.]
- [80] 王艳莉,周斌,应航,等.利用GF-4PMS数据反演城市地区气溶胶光学厚度[J].遥感技术与应用,2019,34(3):564-570. [Wang Y L, Zhou B, Ying H, et al. Aerosol optical depth retrieval over urban areas using GF-4 PMS images [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2019,34(3):564-570.]
- [81] 屈冉,聂忆黄,张雅琼,等.基于国产高分卫星GF-1影像的农膜遥感信息提取技术研究[J].环境与可持续发展,2018,43(6):66-69. [Qu R, Nie Y H, Zhang Y Q, et al. Study on extraction of plasticulture basing on GF-1 of high resolution image of China[J]. Environment and Sustainable Development, 2018,43(6):66-69.]
- [82] 彭保发,陈哲夫,李建辉,等.基于GF-1影像的洞庭湖区水体水质遥感监测[J].地理研究,2018,37(9):1683-1691. [Peng B F, Chen Z F, Li J H, et al. Monitoring water quality of Dongting Lake region based on GF-1 image[J]. Geographical Research, 2018,37(9):1683-1691.]
- [83] 温爽,王桥,李云梅,等.基于高分影像的城市黑臭水体遥感识别:以南京为例[J].环境科学,2018,39(1):57-67. [Wen S, Wang Q, Li Y M, et al. Remote sensing identification of urban black-odor water bodies based on high-resolution images: A case study in Nanjing[J]. Environmental Science, 2018,39(1):57-67.]
- [84] 龚文峰,王鹏,王双宇,等.基于GF-2卫星遥感影像的界河水体信息提取方法[J].黑龙江大学学报,2018,9(4):1-7. [Gong W F, Wang P, Wang S Y, et al. Methods of water body extraction in boundary river based on GF-2 satellite remote sensing image of high resolution[J]. Journal of Heilongjiang Hydraulic Engineering College, 2018, 9(4):1-7.]
- [85] 范剑超,姜大伟,赵建华,等.GF-3号SAR卫星遥感围填海监测方法研究——以大连金州湾为例[J].海洋科学,2017,41(12):60-65. [Fan J C, Jiang D W, Zhao J H, et al. Marine reclamation monitoring approach research based on GF-3 remote sensing image: A case study of the Jinzhou Bay in Dalian[J]. Marine Sciences, 2017,41(12):60-65.]
- [86] 杨超宇,唐丹玲,叶海彬.基于GF-4遥感数据的叶绿素浓度反演算法研究[J].热带海洋学报,2017,36(5):33-39. [Yang C Y, Tang D L, Ye H B. A study on retrieving chlorophyll concentration by using GF-4 data[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2017,36(5):33-39.]
- [87] 王桥,欧阳志云,侯鹏,等.全国生态环境十年变化(2000-2010年)遥感调查与评估[M].北京:科学出版社,2014. [Wang Q, Ouyang Z H Y, Hou P, et al. Eco-environment investigation and assessment from 2000 to 2010 with Remote Sensing of China[M]. Beijing: Science Press, 2014.]
- [88] 生态环境部,中国科学院.全国生态状况变化(2010-2015年)遥感调查评估报告[R].2018. [Ministry of Ecological Environment, Chinese Academy of Sciences. The report of Ecology investigation and assessment from 2010 to 2015 with Remote Sensing of China[R]. 2018.]
- [89] 水利部.第一次全国水利普查水土保持情况公报[R].

2013. [Ministry of water resources. Bulletin on Soil and water conservation of the first national water conservancy census[R]. 2013.]
- [90] 中华人民共和国国务院. 大气污染防治行动计划[Z]. 北京, 2013. [State Council of the People's Republic of China. Action plan for prevention and control of atmospheric pollution[Z]. Beijing, 2013.]
- [91] 中华人民共和国国务院. 水污染防治行动计划[Z]. 北京, 2015. [State Council of the People's Republic of China. Action plan for prevention and control of water pollution [Z]. Beijing, 2015.]
- [92] 中华人民共和国国务院. 土壤污染防治行动计划[Z]. 北京, 2016. [State Council of the People's Republic of China. Action plan for prevention and control of soil pollution [Z]. Beijing, 2016.]
- [93] 张艳, 王维和, 张兴赢. 卫星遥感监测大气臭氧总量分布和变化[J]. 科技导报, 2015, 33(17): 23-29. [Zhang Y, Wang W H, Zhang X Y. Distribution and variation of atmospheric total column ozone based on satellite remote sensing data[J]. Science & Technology Review, 2015, 33(17): 23-29.]
- [94] 张晔萍, 张兴赢, 高玲. 卫星遥感监测全球和中国区域大气 CO 变化特征 [J]. 科技导报, 2015, 33(17): 52-62. [Zhang Y P, Zhang X Y, Gao L. Variation characteristics of carbon monoxide distribution in global and China-based regional scales from satellite remote sensing data [J]. Science & Technology Review, 2015, 33(17): 52-62.]
- [95] 李晓静, 高玲, 张兴赢, 等. 卫星遥感监测全球大气气溶胶光学厚度变化[J]. 科技导报, 2015, 33(17): 30-40. [Li X J, Gao L, Zhang X Y, et al. Global change of aerosol optical depth based on satellite remote sensing data[J]. Science & Technology Review, 2015, 33(17): 30-40.]
- [96] 李令军, 王英. 基于卫星遥感与地面监测分析北京大气 NO₂ 污染特征[J]. 环境科学学报, 2011, 31(12): 2762-2768. [Li L J, Wang Y. The characterization of NO₂ pollution in Beijing based on satellite and conventional observation data[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2011, 31(12): 2762-2768.]
- [97] 孙冉. 中国中东部大气颗粒物光学特性卫星和地面遥感的联合监测研究[D]. 上海: 东华大学, 2017. [Sun R. Research on combined monitoring of optical properties of atmospheric particulate in eastern China with satellite and terrestrial remote sensing[D]. Shanghai: Donghua University, 2017.]
- [98] 胡蝶. 中国地区大气气溶胶光学厚度的卫星遥感监测分析 [D]. 兰州: 兰州大学, 2012. [Hu D. Aerosol Optical Depth Based on Satellite Observations in China[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2012.]
- [99] 中华人民共和国水利部. 水土保持遥感监测技术规范 [Z]. 北京, 2012. [Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Technical Specification of Soil and Water Conservation Monitoring by Remote Sensing[Z]. Beijing, 2012.]