

中国林业遥感发展历程

李增元^{1,2}, 陈尔学¹

1. 中国林业科学研究院 资源信息研究所, 北京 100091;

2. 国家林业和草原局 林业遥感与信息技术重点实验室, 北京 100091

摘要: 根据林业遥感科研项目成果和行业应用表现出的阶段性特点, 将中国林业遥感发展历程划分为3个阶段: 1951年—1980年为以航空遥感像片为主的目视解译应用阶段, 建立了航空摄影和地面综合调查相结合的森林调查技术体系; 1981年—2000年为卫星遥感开拓创新阶段, 首次研发了针对森林资源调查的卫星遥感数字图像处理系统, 在可再生资源遥感调查、遥感系列制图、生态效益评价等关键技术领域均取得了重大突破, 并将应用领域扩展到湿地资源、荒漠化和沙化土地、林业灾害等遥感调查、监测领域; 2001年—2020年为定量遥感发展与综合应用服务平台形成阶段, 通过深入开展林业遥感应用基础理论和定量遥感技术与方法研究, 促进了定量遥感技术的快速发展和林业综合监测技术体系的形成, 并构建了林业遥感综合应用服务平台; 最后就林草部门在新时期所面对的新要求、新任务, 给出了未来林草遥感科研和应用发展建议。

关键词: 中国, 林业遥感, 发展历程, 林业综合监测, 高分遥感

引用格式: 李增元, 陈尔学. 2021. 中国林业遥感发展历程. 遥感学报, 25(1): 292–301

Li Z Y and Chen E X. 2021. Development course of forestry remote sensing in China. National Remote Sensing Bulletin, 25(1): 292–301 [DOI: 10.11834/jrs.20211016]

1 引言

中国林业遥感的起始时间可追溯到1951年—1953年, 到今天为止已经有了近70年的发展历程。近70年来, 林业部门紧紧围绕国家林业资源开发利用、林业生态工程实施、灾害防治等重大需求, 开展林业遥感科学研究和应用, 林业遥感的主题也表现出了鲜明的时代特点。

在建国初期, 百业待兴, 林业的主战场主要是摸清森林资源家底, 组织木材采伐, 支援国家建设。因此, 在1951年—1980年这段时间, 遥感在林业上的应用局限于森林资源调查, 有些林火和病虫害方面的应用, 也是围绕森林资源的保护展开的。

虽然自20世纪50年代开始, 中国就开始有计划地在东北西部、永定河下游、新疆农垦区等地开展防护林营造工作, 但直到1978年才正式启动“三北”防护林体系建设工程。1981年—2000年, 林业遥感科研和应用由单一的森林资源调查走向

比较综合的“三北”防护林调查、可再生资源调查评价等, 为国家在防护林建设成效的评估和后续规划决策提供了遥感技术支撑。

2001–02, 国务院批准了林业6大重点工程。以6大重点工程实施为标志, 中国林业建设进入了“生态效益优先, 生态效益、经济效益和社会效益兼顾”的新的发展阶段。2001年也是21世纪的开始之年, “十五”的开篇之年, 随后863计划首次设立了地球观测和导航技术领域, 973计划、国家科技支撑计划、高分辨率对地观测重大专项、国家重点研发计划等国家科技计划陆续组织实施。在这些国家级科研项目支持下, 2001年—2020年成为了中国林业遥感创新发展、硕果累累的20年。

以上从中国国家需求和林业遥感技术的阶段性特点, 说明了本文将中国林业遥感70年的历程划分为1951年—1980年、1981年—2000年和2001年—2020年共3个阶段进行回顾的原因。从遥感技术进步角度来看, 中国直到1981年左右才进口了遥感数据处理软硬件设备(李留瑜,

收稿日期: 2020-11-11; 预印本: 2020-12-14

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(编号: CAFYBB2019SY026)

第一作者简介: 李增元, 1959年生, 男, 研究员, 研究方向为林业遥感技术与应用。E-mail: Zengyuan.li@caf.ac.cn

1991), 并有能力开始基于计算机的遥感数据数字化处理和分析系统研发工作, 这无疑是林业遥感发展的一个里程碑。1999年第一颗高空间分辨率卫星 IKONOS 发射 (林辉等, 2002), 1998年“数字地球”概念提出, 这都预示着在新世纪中国林业遥感将走向发展快车道, 因此, 林业遥感第3个阶段自2001年开始似理所当然。如果说在第3个发展阶段的前10年(2001年—2010年), 中国林业遥感还严重依赖国外卫星数据源的话, 2011年开始的后10年则开启了中国高分辨率对地观测的新时代。

李增元等(2013)以“中国林业遥感技术与应用发展现状及建议”为题, 对2013年之前的林业遥感研究和应用进行过综述, 采用的是以科学论文分析为主, 辅以国家科技项目和成果分析的总结方法。本文在此基础上补充了2013年至今的材料, 以林业部门牵头承担的国家级科技项目及成果的分析为主, 以科学论文分析为辅的归纳分析方法, 划分不同的时期, 按时间先后顺序对林业遥感近70年的发展历程进行了梳理和总结。

2 林业遥感发展的3个阶段

2.1 1951年—1980年：航空遥感像片为主的目视解译应用阶段

林业是中国最早应用遥感技术并形成应用规模的行业之一。赵宪文(1983)对当时中国林业遥感应用和研究概况进行了综述, 重点就森林资源调查方向, 回顾了航空像片30年的发展历史和自20世纪70年代开始的卫星林业遥感应用和研究进展。李芝喜(1990)对林业遥感进行了回顾和展望, 指出中国从建国初期就利用遥感资料进行森林资源调查, 其中包括森林航空目视调查和通过森林航空摄影测量, 利用航空像片勾绘小班和森林成图。丁世昌(1995)和孙司衡(2000)在回顾林业遥感进程时都曾指出中国自20世纪50年代初就开始森林资源航空摄影调查工作。早在1954年, 中国就创建了“森林航空测量调查大队”(孙司衡, 2000), 首次建立了森林航空摄影、森林航空调查和地面综合调查相结合的森林调查技术体系。1977年, 利用美国陆地资源卫星(Landsat) MSS图像首次对中国西藏地区的森林资源进行清查, 填补了西藏森林资源数据的空白

(孙司衡, 2000), 这也是中国第一次利用卫星遥感手段开展的森林资源清查工作, 相关成果获1978年全国科学大会奖。

在这一时期, 森林资源调查、森林火灾监测等林业应用所采用的遥感数据, 无论是航空摄影测量遥感数据还是 Landsat MSS 卫星数据, 主要是采用胶片提供的。将胶片洗印得到像片后再用于目视解译、判读分析。由于受当时计算机发展水平的限制, 目视解译和判读也主要是在像片上通过人工勾绘、测量完成调绘任务。总之, 这一时期遥感科研仪器设备和软件都依赖进口, 林业遥感科研能力弱, 遥感应应用总体处于看图识字阶段。

2.2 1981年—2000年：卫星遥感的开拓创新阶段

2.2.1 森林资源调查

在“六五”期间, 林业部门承担了一项针对林业遥感关键技术研究的项目, 这就是徐冠华院士主持的“用于森林资源调查的卫星数字图像处理系统”。该项目研发了遥感卫星数字图像处理系统, 并在森林资源调查遥感应应用技术方面取得了重要突破。创新性地提出了快速有监分类、专家系统分类、蓄积量估测模型, 实现了基于卫星遥感数据进行大面积土地覆盖和森林分类及蓄积量的估测, 开启了卫星遥感林业信息提取的先河, 并用计算机辅助绘制大比例尺森林分布图与蓄积量分布图, 铺就了中国航天遥感技术的实用化道路。这项达到国际同类研究先进水平的开拓性成果于1989年获得国家科技进步三等奖。

“七五”期间, 林业部门承担了第一个以国家需求为驱动的多部门联合研发项目。1986年—1990年, 在徐冠华院士的带领下, 赵宪文、虞献平等老一辈科学家联合林业部、中国科学院、教育部、农业部、测绘局共37个单位140余名科技人员协同攻关, 首次制定了再生资源遥感综合调查技术规范, 在信息源评价(航天和超小比例尺红外航空摄影)、遥感图像处理、专业遥感调查、遥感系列制图、生态效益评价等遥感应应用关键技术领域均取得重大突破, 并成功研制了应用微机的资源与环境信息系统, 实现了多种资源数据管理、分析和预测(徐冠华, 1994), 彻底改变了传统的资源调查结构和模式, 成为推动中国卫星遥感技术进步和应用的重要里程碑。相关成果

“三北防护林公共实验区遥感综合调查技术研究”，于1991年获得国家科技进步三等奖。

“八五”期间，1993年—1997年，由联合国开发计划署（UNDP）援助的“中国森林资源调查技术现代化”项目，建立了卫星遥感（基于Landsat卫星数据）监测与地面调查技术相结合的二阶抽样遥感监测体系，通过统计方法估计出全国森林资源数据，并通过区划形成森林资源分布图。通过承担863计划“星载合成孔径雷达（SAR）森林应用研究”，在中国率先开展了将SAR应用于森林资源信息提取方法的研究，利用单波段、单极化星载SAR数据，建立了后向散射系数与森林参数的经验关系模型（李增元等，1994），研发了森林类型分类专家系统（白黎娜和李增元，1995）。

“九五”期间，主要承担了SAR和干涉SAR用于植被监测和制图的国家863计划，建立了植被主动微波非相干散射机理模型，发展了基于多时相、多频SAR和干涉SAR等星载SAR数据的植被类型、森林分类制图方法。

2.2.2 湿地遥感监测

中国在80年代初期以芦苇为主要研究对象，开展了植被光谱特征测量分析和湿地生物质资源遥感调查工作，1985年后开始基于航片和美国陆地卫星数据开展湿地景观结构分析及动态监测（张柏，1996）。90年代以来，基于多光谱、高空间、高光谱（童庆禧等，1997）等多源遥感数据的湿地监测应用技术逐步得到发展。基于全国1986年，1996年及2000年3个时期的陆地卫星遥感数据建立了比例尺为1:10万的沼泽湿地分布动态解译数据库（张树清，2002）。

2.2.3 荒漠化遥感监测

1977年，联合国荒漠化大会在内罗毕召开，自此荒漠化问题开始得到国际社会广泛关注。中国自1980年开始研究中国的荒漠化问题—沙漠化，在制定沙漠化监测指标的基础上，利用有限的航空照片、Landsat MSS/TM卫星遥感数据，采样解译与地面调查相结合的方法进行中国的沙漠化制图，并形成了完整的沙漠化制图技术流程（朱震达，1984，1989；朱震达和刘恕，1984）。

中国于1994年开始组织实施第一次全国范围的荒漠化和沙化土地普查，共使用了Landsat-TM

卫星影像数据216景，首次编制了全国荒漠化土地分布图，获得了较为准确的荒漠化面积和分布数据。

2.2.4 森林火灾遥感监测

早在20世纪50年代，中国林业行业就利用航空遥感开展了森林火灾监测。80年代初，美国的Landsat TM、NOAA气象卫星等卫星数据逐步被中国专家学者应用于森林火灾监测方法研究中，并在1987年大兴安岭特大森林火灾（“八七”特大森林火灾）监测中发挥了重要作用。

“八五”期间，针对西南林区植被与环境等特点，利用人工神经网络（纪平等，1993）、专家系统（易浩若等，1994）等新方法监测森林火灾，不仅提高了林火识别精度，而且较好地提高了国内林火的研究水平，同时也缩短了与国际同行研究水平的差距。“九五”期间，进一步开展了卫星遥感林火监测应用技术研究，如：针对重特大森林火灾评估的技术难题，形成了基于NOAA/AVHRR数据的森林大火面积测算方法（赵宪文，1995；易浩若和纪平，1998）。

2.2.5 森林病虫害遥感监测

1978年腾冲遥感综合试验开启了中国遥感技术监测森林病虫害的序幕（童庆禧等，1999）。随着航天遥感技术的发展，七五末期和八五初期，以松毛虫等食叶害虫灾害为例，广泛开展了针叶损失率、松针生物量以及灾害程度等遥感监测方法的研究，充分证明当森林植被遭受病虫害侵袭时，其叶绿素、水分等会急剧下降，叶黄素、叶红素等会提高，必然导致其反射率发生显著变化的遥感监测科学依据，还发展了基于多种植被指数的病虫害信息提取技术（戴昌达，1992；武红敢，1995；吴继友和倪健，1995）。并不同程度地应用于生产实践，如1989年—1991年大兴安岭十八站林业局等国有重点林区发生了大面积落叶松毛虫灾害，利用Landsat TM遥感影像与地面调查解译结合的方法，摸清了不同程度危害面积，并对森林病虫害和虫源地发生、发展规律、监测方法等其他方面的应用前景进行了有益探索（程焕章等，1992）。

“八五”后期和“九五”期间，在国家攻关等众多科技项目的支持下，全面开展了森林病虫害灾

害遥感监测预警技术研究，建立了基于单时相、多时相航天遥感数据的灾害信息提取技术路线，引进和消化吸收了航空录像、航空电子勾绘等遥感监测技术方法，初步建立了天空地相结合的森林病虫害监测体系，基于业务主管部门的预测预报、监测、灾害损失评估和决策支持需求，提出了森林病虫害的遥感、地理信息系统和全球定位系统技术集成应用模式（杨存建等，1999）。

2.3 2001年—2020年：定量遥感发展和综合应用服务平台形成阶段

2.3.1 发展定量遥感技术与方法，推动遥感技术的深度与广度应用

“十五”期间，在“成像雷达遥感信息共性处理及应用软件”、科技部—欧洲空间局“龙计划”（ENVISAT对地观测数据综合应用研究）等863计划支持下，开展了SAR林业遥感定量技术研究，突破了星载SAR定位、正射校正、地形辐射校正等预处理关键技术（陈尔学和李增元，2004，2006），开发了星载SAR数据处理系统，并在InSAR、极化干涉SAR森林信息提取模型和方法上取得了阶段性进展（张红，2002；李增元等，2003；李新武等，2005）。

在“十五”863计划“森林资源遥感监测量化综合处理与业务运行系统”、“遥感数据森林资源定量应用”的支持下，开始进行激光雷达林业遥感应用研究，当时主要集中在星载大光斑激光雷达信号的理论模拟（庞勇等，2006a）及森林垂直结构参数估测方法的研究和验证评价（庞勇等，2006b）。也开始开展高空间分辨率、高光谱分辨率光学卫星遥感林业应用研究。2003年高空间分辨率卫星影像写进森林资源规划设计调查规程，促进了高空间分辨率卫星遥感技术的深度应用，相关研究主要包括蓄积量估测（林辉等，2004）、树冠信息的提取方法（覃先林等，2005；冯益明等，2006，2007；熊轶群和吴健平，2007；刘晓双等，2010）、SPOT5影像用于小班区划的方法（张良龙等，2010），并研发了基于高分辨遥感数据的小班区划系统（吴春争等，2011；张煜星，2008）。在高光谱应用方面，开展了星载高光谱遥感数据预处理（谭炳香等，2005），森林类型遥感

识别方法（陈尔学等，2007a；曾庆伟和武红敢，2009），基于统计模型的森林郁闭度和叶面积指数（LAI）估测（谭炳香等，2006；孙晓和谭炳香，2012），森林叶绿素含量的几何光学模型反演（杨曦光等，2010）和机载高光谱数据优势树种识别技术（刘丽娟等，2011）等方面的研究。

针对国产卫星遥感数据，国家林业局在2000年，2003年分别启动了CBERS-01，CBERS-02 CCD数据的森林资源清查示范应用项目，相关技术成果在2006年的西藏和新疆森林资源清查中得到了全面推广。在1999年开始的第6次和2004年开始的第7次全国森林资源连续清查中，遥感得到了全面的应用，在体系全覆盖、提高抽样精度、防止偏估等方面起到了重要的作用（张煜星和王祝雄，2007）。过去中国森林资源规划设计调查（简称二类调查）主要以航空像片和地形图为参考，制作外业调查手图，通过现场勾绘等手段完成林相图区划。自2003年起，中国很多省份相继应用SPOT5数据进行了森林资源二类调查试点（张煜星和王祝雄，2007）。

在以上森林资源遥感监测关键技术创新研发和行业应用基础上形成的成果——“森林资源遥感监测技术与业务化应用”，获2009年国家科技进步二等奖。该成果以中、高空间分辨率卫星遥感数据作为基础数据源，突破了森林资源遥感数据综合处理、分析及其集成应用的关键技术，规范了遥感技术林业应用的技术流程与标准；研发了森林资源调查遥感数据处理通用软件系统，建成了面向一类调查和二类调查两个服务层次的森林资源遥感监测业务应用系统。

2000年以来，国家先后启动了天然林资源保护、退耕还林工程等6大生态建设和造林工程。2004年开始的“国家林业生态工程重点区遥感监测评价项目”，利用2003年—2011年期间的MODIS、Landsat TM、SPOT5、QuickBird等多源卫星遥感数据，对4个天然林资源保护工程监测区和8个退耕还林工程监测区进行了多期动态监测评价。在此期间，还完成了首都圈防沙治沙应急技术开发研究与示范课题“风沙灾害动态监测与评估技术及首都圈防沙治沙战略对策研究”，以及科技攻关专题“典型区风沙危害动态监测及其遥感信息提取技术”等。

2.3.2 突破遥感应用基础理论,促进定量遥感技术的快速发展和林业综合监测技术体系的形成

“十一五”(2006年—2010年)期间的发展特点表现在:林业遥感应用基础理论研究得到加强,林业定量遥感得到快速发展,针对林业行业需求的支撑技术研发走向综合化,初步形成了中国林业综合监测技术体系。

2007年,承担了973计划“主动遥感散射机理与植被三维结构参数反演”,并得到了国家自然科学基金重大项目课题“多维度微波成像的陆地遥感应用研究”的资助,对SAR和激光雷达(LiDAR)林业遥感应用的基础理论和方法开展了深入研究。在行业公益项目“基于激光雷达和高空间分辨率遥感影像的林相图自动更新技术研究”的支持下,开始了以应用为导向的机载小光斑LiDAR林业应用研究。发展了基于激光雷达数据估测森林平均树高、郁闭度、蓄积量和地上生物量的方法(庞勇等,2008;何祺胜等,2009;赵峰等,2009;范风云等,2010;刘清旺等,2010),建立了单木树冠机载小光斑激光雷达波形数据的正向模拟模型(Liu等,2011);提出了综合应用地面样地调查数据、机载激光雷达数据、星载波形激光雷达(ICESat GLAS)数据与光学遥感数据(MERIS, MODIS)等多源遥感数据制作大区域连续覆盖森林地上生物量分布图的方法(庞勇等,2011)。这期间还承担了863计划“多频多谱段遥感数据生态环境参数综合反演技术”,参与了中欧国际合作“龙计划”一期项目,自欧洲空间局免费获取了大量星载、机载SAR遥感数据,推动了极化SAR分类方法、极化干涉SAR森林高度定量反演模型的快速发展(陈尔学等,2007b;周广益等,2009)。

“十一五”国家科技支撑计划重点项目“森林资源综合监测技术体系研究”,由来自全国14个省(自治区、直辖市)的27个科研院所、大专院校和高新技术企业的300余人组成的科研队伍,历时5年完成。提出了资源—工程—灾害一体化综合监测指标体系,创建了现代林业信息技术及传统地面调查相结合的天—空—地一体化、点—线—面多尺度的综合监测技术体系,突破了基于多源、多分辨率遥感数据的森林、湿地、森林灾害、林业生态工程、荒漠化信息快速提取、时空动态分

析、智能预测模拟、预警预报和综合评价技术,以及森林资源综合监测高效集成与综合服务技术,自主研发了基于3S技术的森林资源综合监测集成平台与系列软件系统,实现了林业资源监测数据、技术和系统的一体化集成、高效管理和综合服务,项目成果获得2013年国家科技进步二等奖。

2.3.3 创新森林资源遥感关键技术,构建林业遥感综合应用服务平台

“十二五”在遥感数据的定量化处理、复杂地表森林三维结构信息主被动遥感定量反演和时空分析建模方面取得了重要进展,也开启了国家重大科技专项“高分辨率对地观测系统”(2011年—2020年)实施的新时代。林业部门通过执行“高分林业行业应用示范系统”项目,初步建立起高分林业遥感应用技术体系(李增元等,2015,2018),相关科技成果“高分辨率林业遥感应用技术与服务平台”获得了2018年国家科技进步二等奖(马爱平,2019)。

(1) 森林资源遥感监测关键技术创新。“十二五”林业部门承担的具有代表性的科研项目主要包括:973计划“复杂地表遥感信息动态分析与建模”,863计划“全球森林生物量和碳储量遥感估测关键技术”,863计划“高分辨率SAR遥感综合实验与应用示范”,以及自然科学基金项目“机载激光雷达探测森林冠层高度的机理模型研究”、“基于多源数据的森林地上生物量估测与碳通量综合模拟”等。在森林资源遥感监测关键技术创新方面取得了如下主要进展:

1) 研发了系列遥感数据处理技术与方法。针对光学遥感受云雨等天气影响难以获取大范围的清晰影像问题,发展了基于影像频谱的高精度云区识别方法,实现了顾及森林物候特征的无云影像合成,为森林资源年度监测提供了支撑;针对SAR成像受地形影响严重这一林业应用瓶颈,提出了可综合考虑散射面积、角度效应、极化方位角影响的“三阶段”极化SAR地形辐射校正方法,实现了大区域极化SAR自动、定量处理(李增元和陈尔学,2019),为全天时全天候林业资源监测提供了定量化预处理技术支撑;建立了从激光脉冲信号传输到植被信号返回的全链路三维激光雷达森林回波模型,提出了星载森林观测载荷最优参数配置方案,支撑了中国陆地生态系统碳

监测卫星（目前正在研建过程中）激光雷达载荷的参数优化和工程设计（李增元等，2019b）。

2) 提出了森林参数遥感定量反演基础理论和方法。针对复杂地表遥感定量反演建模空间异质性表征与辐射机理建模的科学问题，创建了三维森林场景的光学、微波和激光雷达正向机理模型系列，实现了遥感机理建模从单一地表类型到混合类型、从平坦地表到复杂地形的突破，为森林参数定量反演建模奠定了理论基础（李增元等，2019b）；分单木、林分和区域3个尺度，提出了数学形态学单木分割和激光雷达格网化参数计算等激光雷达森林参数精准估测技术，突破了制约大范围应用的瓶颈。通过多时相、主被动“立体”观测协同，创立了将林下地形信息与森林结构信息有效分离的“几何定量”理论和方法，为综合利用中国系列遥感卫星监测全球森林生物量提供了解决方案（李增元等，2019b）；率先利用坡地几何光学模型实现了大区域山地森林高度、郁闭度、叶面积指数和地上生物量的主被动遥感协同反演（李增元等，2019b）。

(2) 高分林业遥感综合应用服务平台研建。依托于“高分辨率对地观测系统”国家重大科技专项项目“高分林业行业应用示范系统”，在解决系列高分林业应用关键技术的基础上，建立了高分辨率遥感林业应用服务平台，构建了高分辨率遥感监测应用系统，形成了高分林业应用专题产品生产能力（Ma等，2015）。

1) 攻克了系列高分辨率遥感林业调查和监测关键技术。创新了森林、湿地和沙化土地高分遥感精细分类方法，提升了林业资源区划调查和监测的效率和精细化水平；构建了森林蓄积量、沙地稀疏植被覆盖度、林火燃烧强度等遥感定量估测模型；形成高分专项标准规范9项，构建了符合中国林情的高分辨率遥感林业调查、监测与评价技术体系。

2) 研建了高分辨率遥感林业应用服务平台。构建了全国首个基于高性能计算环境和云架构的高分林业遥感应用服务平台。基于云计算、高性能计算、虚拟化、大数据处理等技术，实现了海量遥感数据并行处理和远程多客户端协同运行、不同调查业务间数据和计算资源共享与协同管理（Li等，2014a），形成了日处理300万km²以上遥感数据的能力，为全国林业行业提供数据逾13万景，

自主高分遥感数据使用率达70%。

3) 构建了高分辨率遥感监测应用系统。针对森林资源调查、湿地、荒漠化、林业生态工程和森林灾害监测等行业业务，发展了可视化的专题产品生产任务编排和算法服务资源组合技术，攻克了产品生产自动化流程定制和并行化处理等技术（Li等，2014b），开发了森林资源调查、湿地、荒漠化、林业生态工程（莫琴等，2017）和森林灾害监测5大专题应用系统，研建了21种林业专题产品生产线，实现了产品按需定制生产，降低了遥感应用门槛。

3 结 语

自1951年开始，中国林业遥感已经过了近70年的发展历程。前30年为林业遥感的起步阶段。为支撑国家开展首次国有森林资源大调查，通过技术引进和消化吸收，建立了航空摄影和地面综合调查相结合的森林调查技术体系。在随后的20年内，以Landsat卫星多光谱数据为主要数据源，林业遥感迎来了卫星遥感的开拓创新阶段。不仅首次研发了针对森林资源调查的卫星遥感数字图像处理系统，在可再生资源遥感调查、遥感系列制图、生态效益评价等关键技术领域均取得了重大突破，而且还将应用领域扩展到湿地资源、荒漠化和沙化土地、林业灾害等遥感调查、监测领域。最近的二十年是定量遥感技术的快速发展和综合应用服务平台的形成阶段。通过深入开展林业遥感应用基础理论和定量遥感技术与方法研究，促进了定量遥感技术的快速发展和林业综合监测技术体系的形成，并构建了林业遥感综合应用服务平台。

当前林业和草原部门新增了草原保护管理、国家公园体制建设、各类自然保护地统一管理等功能，负责管理的自然生态系统面积近100亿亩，各类自然保护地达1万多处，职责任务更加繁重。面对新要求、新任务，林业和草原部门提出了推动林业草原高质量发展、全面提升现代化水平的战略举措，这也对林业和草原遥感能力建设提出了更高要求。今后林草部门应加快遥感、大数据、人工智能等新一代前沿信息的综合应用，推动林草遥感向林业和草原核心业务的深度融合，紧贴林业草原工作实际需求，着力解决林业草原遥感应用突出问题，编制以生态保护和植被修复

为主要目的的遥感调查、监测、评价技术规程,研发林业和草原遥感监测专题产品生产线,优化和扩充林业遥感综合应用服务平台的功能,提升处理遥感数据和生产共性产品的能力,为林业草原发展提供精准、科学、全方位的支撑服务。

参考文献(References)

- Bai L N and Li Z Y. 1995. Preliminary research of expert system for forest type classification of ERS - 1 SAR image. *Remote Sensing Technology and Application*, 10(2): 69-72 (白黎娜, 李增元. 1995. ERS—1 SAR 图像森林类型分类专家系统研制探讨. *遥感技术与应用*, 10(2): 69-72) [DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.1995.2.69]
- Chen E X and Li Z Y. 2004. Study on ENVISAT ASAR image geolocation method. *Journal of Image and Graphics*, 9(8): 991-996 (陈尔学, 李增元. 2004. ENVISAT ASAR 影像地理定位方法. *中国图象图形学报*, 9(8): 991-996) [DOI: 10.3969/j.issn.1006-8961.2004.08.017]
- Chen E X and Li Z Y. 2006. The algorithm for direct geo location of space borne SAR imagery based on slant angle coordinate transformation. *Chinese High Technology Letters*, 16(10): 1082-1086 (陈尔学, 李增元. 2006. 基于斜角坐标系变换的星载 SAR 直接定位算法. *高技术通讯*, 16(10): 1082-1086) [DOI: 10.3321/j.issn:1002-0470.2006.10.020]
- Chen E X, Li Z Y, Pang Y and Tian X. 2007b. Polarimetric synthetic aperture radar interferometry based mean tree height extraction technique. *Scientia Silvae Sinicae*, 43(4): 66-70 (陈尔学, 李增元, 庞勇, 田昕. 2007b. 基于极化合成孔径雷达干涉测量的平均树高提取技术. *林业科学*, 43(4): 66-70) [DOI: 10.3321/j.issn:1001-7488.2007.04.011]
- Chen E X, Li Z Y, Tan B X, Liang Y Z and Zhang Z L. 2007a. Validation of statistic based forest types classification methods using hyperspectral data. *Scientia Silvae Sinicae*, 43(1): 84-89 (陈尔学, 李增元, 谭炳香, 梁毓照, 张则路. 2007a. 高光谱数据森林类型统计模式识别方法比较评价. *林业科学*, 43(1): 84-89) [DOI: 10.3321/j.issn:1001-7488.2007.01.014]
- Cheng H Z, Liu X T, Pang Z H, Yu R A and Zhao Q K. 1992. Disaster division of dendrolimus superans butler with aid of space remote sensing technology. *Journal of Northeast Forestry University*, 20(5): 25-32 (程焕章, 刘新田, 逢增和, 于瑞安, 赵启凯. 1992. 航天遥感技术在落叶松毛虫危害区划中的应用研究. *东北林业大学学报*, 20(5): 25-32)
- Dai C D. 1992. Detecting vegetation damage by remote sensing. *Journal of Natural Disasters*, 1(2): 40-46 (戴昌达. 1992. 植物病虫害的遥感探测. *自然灾害学报*, 1(2): 40-46)
- Ding S C. 1995. Reviews and prospects on Sichuan forest aerial apping and forestry remote sensing (to be continued). *Sichuan Forestry Exploration and Design*, (4): 11-15 (丁世昌. 1995. 四川森林航测和林业遥感回顾与展望(上). *四川林勘设计*, (4): 11-15)
- Fan F Y, Chen E X, Liu Q W, Pang Y, Li S M and Zhao F. 2010. Forest mean height extraction based on the low-density airborne LiDAR and CCD data. *Forest Research*, 23(2): 151-156 (范风云, 陈尔学, 刘清旺, 庞勇, 李世明, 赵峰. 2010. 基于低密度机载 LiDAR 和 CCD 数据的林分平均高提取. *林业科学研究*, 23(2): 151-156) [DOI: 10.13275/j.cnki.lykxyj.2010.02.016]
- Feng Y M, Li Z Y and Deng G. 2007. Quantitative estimation for forest stand crown of different stand densities by remote sensing. *Scientia Silvae Sinicae*, 43(1): 90-94 (冯益明, 李增元, 邓广. 2007. 不同密度林分冠幅的遥感定量估计. *林业科学*, 43(1): 90-94) [DOI: 10.3321/j.issn:1001-7488.2007.01.015]
- Feng Y M, Li Z Y and Zhang X. 2006. Estimating forest stand crown based on high spatial resolution image. *Scientia Silvae Sinicae*, 42(5): 110-113 (冯益明, 李增元, 张旭. 2006. 基于高空间分辨率影像的林分冠幅估计. *林业科学*, 42(5): 110-113) [DOI: 10.11707/j.1001-7488.20060520]
- He Q S, Chen E X, Cao C X, Liu Q W and Pang Y. 2009. A study of forest parameters mapping technique using airborne LIDAR data. *Advances in Earth Science*, 24(7): 748-755 (何祺胜, 陈尔学, 曹春香, 刘清旺, 庞勇. 2009. 基于 LIDAR 数据的森林参数反演方法研究. *地球科学进展*, 24(7): 748-755) [DOI: 10.3321/j.issn:1001-8166.2009.07.008]
- Ji P, Yi H R and Bai L N. 1993. Artificial Neural Network to Identify Abnormally High Temperature Points in NOAA Data. *The Progress of Monitoring and Evaluation of Natural Disasters by Remote Sensing*. Beijing: Science and Technology Press: 48-52 (纪平, 易浩若, 白黎娜. 1993. 人工神经网络识别 NOAA 数据异常高温点的研究—重大自然灾害遥感监测与评估研究进展. 北京: 科学技术出版社: 48-52)
- Li F, Ma Y, Zhang X, Yu X W, Feng P F and Zhang M B. 2014b. Research and design of a forest management mobile service cloud platform for the natural forest protection project//Proceedings of 2014 International Conference on Future Communication Technology and Engineering. Shenzhen: Science and Engineering Research Center
- Li F, Ma Y, Zhang X, Zhang M B, Yu X W and Feng P F. 2014a. Intelligent management platform of forestry based on LBS cloud services//Proceedings of 2014 International Conference on Environmental Engineering and Computer Application. Hong Kong, China: Science and Engineering Research Center
- Li L Y. 1991. Application and development of remote sensing technology in forestry. *Remote Sensing of Environment China*, 6(3): 191-194 (李留瑜. 1991. 林业遥感应用现状与遥感技术发展浅议. *环境遥感*, 6(3): 191-194)
- Li X W, Guo H D, Li Z and Wang C L. 2005. Method study of vegetation height estimation using SIR-C dual frequency polarimetric SAR interferometry data. *Chinese High Technology Letters*, 15(7): 79-84 (李新武, 郭华东, 李震, 王长林. 2005. 用 SIR-C 航天飞机双频极化干涉雷达估计植被高度的方法研究. *高技术通讯*, 15(7): 79-84) [DOI: 10.3321/j.issn:1002-0470.2005.07.016]
- Li Z X. 1990. Retrospect and prospect of forestry remote sensing. *Yunnan Forest Investigation*. *Forest Inventory and Planning*, (2): 35-36 (李芝喜. 1990. 林业遥感的回顾与展望. *云南林业调查规*

- 划, (2): 35-36)
- Li Z Y, Che X J, Liu M, Bai L N and Tan B X. 1994. Preliminary research on the application of ERS - 1 SAR in forest. *Forest Research*, 7(6): 692-696 (李增元, 车学俭, 刘闽, 白黎娜, 谭炳香. 1994. ERS-1SAR影像森林应用研究初探. *林业科学研究*, 7(6): 692-696)
- Li Z Y and Chen E X. 2019. *Technology and Method of Forest Parameters Inversion by Synthetic Aperture Radar*. Beijing: Science Press: 61-65 (李增元, 陈尔学. 2019. 合成孔径雷达森林参数反演技术与方法. 北京: 科学出版社: 61-65)
- Li Z Y, Chen E X, Gao Z H, Qin X L, Wu H G and Xia C Z. 2013. Current development status and proposals for national forest remote sensing techniques and applications. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 28: 132-144 (李增元, 陈尔学, 高志海, 覃先林, 武红敢, 夏朝宗. 2013. 中国林业遥感技术与应用发展现状及建议. *中国科学院院刊*, 28: 132-144) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-3045.2013.Z01.016]
- Li Z Y, Gao Z H, Li F, Wu H G, Zhang X, Chen E X, Zhang H Q, Qin X L and Xia C Z. 2015. Construction and application of high-resolution forestry remote sensing application demonstration system. *Satellite Application*, (3): 25-30 (李增元, 高志海, 李凡, 武红敢, 张旭, 陈尔学, 张怀清, 覃先林, 夏朝宗. 2015. 高分林业遥感应用示范系统的建设与应用. *卫星应用*, (3): 25-30)
- Li Z Y, Liu Q H, Yan G J, Wang J D, Niu Z, Jiang L M and Chen E X. 2019b. *Quantitative Remote Sensing Model and Inversion of Complex Surface*. Beijing: Science Press (李增元, 柳钦火, 阎广建, 王锦地, 牛铮, 蒋玲梅, 陈尔学. 2019b. 复杂地表定量遥感模型与反演. 北京: 科学出版社)
- Li Z Y, Pang Y and Chen E X. 2003. Regional forest mapping using ERS SAR interferometric technology. *Geography and Geo-information Science*, 19(4): 66-70 (李增元, 庞勇, 陈尔学. 2003. ERS SAR干涉测量技术用于区域尺度森林制图研究. *地理与地理信息科学*, 19(4): 66-70) [DOI: 10.3969/j.issn.1672-0504.2003.04.017]
- Li Z Y, Qin X L, Gao Z H, Deng G and Chen E X. 2018. Research on forestry application of high resolution remote sensing. *Satellite Application*, (11): 61-65 (李增元, 覃先林, 高志海, 邓广, 陈尔学. 2018. 高分遥感林业应用研究. *卫星应用*, (11): 61-65) [DOI: 10.3969/j.issn.1674-9030.2018.11.015]
- Lin H, Ning X B and Lü Y. 2004. Compiling the standing volume table of Chinese fir based on the high-resolution satellite image. *Scientia Silvae Sinicae*, 40(4): 33-39 (林辉, 宁晓波, 吕勇. 2004. 基于高分辨率卫星图像的立木材积表的编制. *林业科学*, 40(4): 33-39) [DOI: 10.11707/j.1001-7488.20040406]
- Lin H, Tong X D and Huang Z Y. 2002. A review on remote sensing's application, puzzle and prospect in forestry. *Remote Sensing Information*, (1): 39-43, 51 (林辉, 童显德, 黄忠义. 2002. 遥感技术在我国林业中的应用与展望. *遥感信息*, (1): 39-43, 51) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-3177.2002.01.009]
- Liu L J, Pang Y, Fan W Y, Li Z Y and Li M Z. 2011. Integration of airborne hyperspectral CASI and SASI data for tree species mapping in the boreal forest, China. *Remote Sensing Technology and Application*, 26(2): 129-136 (刘丽娟, 庞勇, 范文义, 李增元, 李明泽. 2011. 整合机载CASI和SASI高光谱数据的北方森林树种填图研究. *遥感技术与应用*, 26(2): 129-136) [DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.1994.4.61]
- Liu Q W, Li Z Y, Chen E X, Pang Y, Li S M and Tian X. 2011. Feature analysis of LIDAR waveforms from forest canopies. *Science China Earth Sciences*, 54(8): 1206-1214 [DOI: 10.1007/s11430-011-4212-3]
- Liu Q W, Li Z Y, Chen E X, Pang Y, Tian X and Cao C X. 2010. Estimating biomass of individual trees using point cloud data of airborne. *Chinese High Technology Letters*, 20(7): 765-770 (刘清旺, 李增元, 陈尔学, 庞勇, 田昕, 曹春香. 2010. 机载LIDAR点云数据估测单株木生物量. *高技术通讯*, 20(7): 765-770) [DOI: 10.3772/j.issn.1002-0470.2010.07.019]
- Liu X S, Huang J W and Ju H B. 2010. Research progress in the methods and applications of individual tree crown's automatic extraction by high spatial resolution remote sensing. *Journal of Zhejiang Forestry College*, 27(1): 126-133 (刘晓双, 黄建文, 鞠洪波. 2010. 高空间分辨率遥感的单木树冠自动提取方法与应用. *浙江林学院学报*, 27(1): 126-133) [DOI: 10.3969/j.issn.2095-0756.2010.01.021]
- Ma A P. 2019. "Arme" forestry with modern high-resolution remote sensing technology. *China Rural Science and Technology*, (1): 38-40 (马爱平. 2019. 用现代化高分遥感技术“武装”林业. *中国农村科技*, (1): 38-40)
- Ma Y, Li F, Zhang X and Zhang M B. 2015. The design and implementation of a forestry cloud service platform//*Proceedings of International Conference on Computer Science and Systems Engineering*. Hong Kong, China: [s.n.]: 371-378
- Mo Q, Chen Z B, Xie S Q, Chen M J and Xia C Z. 2017. Developing a system for monitoring high resolution forestry ecological projects. *Journal of Zhejiang Agriculture and Forestry University*, 34(4): 737-742 (莫琴, 陈志泊, 谢士琴, 陈明健, 夏朝宗. 2017. 高分辨率林业生态工程监测系统研建与应用. *浙江农林大学学报*, 34(4): 737-742) [DOI: 10.11833/j.issn.2095-0756.2017.04.021]
- Pang Y, Huang K B, Li Z Y, Qin X L and Chen E X. 2011. Forest aboveground biomass analysis using remote sensing in the greater Mekong subregion. *Resources Science*, 33(10): 1863-1869 (庞勇, 黄克标, 李增元, 覃先林, 陈尔学. 2011. 基于遥感的湄公河次区域森林地上生物量分析. *资源科学*, 33(10): 1863-1869)
- Pang Y, Sun G Q and Li Z Y. 2006a. Large footprint lidar waveform modelling of forest spatial patterns. *Journal of Remote Sensing*, 10(1): 97-103 (庞勇, 孙国清, 李增元. 2006a. 林木空间格局对大光斑激光雷达波形的影响模拟. *遥感学报*, 10(1): 97-103) [DOI: 10.11834/jrs.20060115]
- Pang Y, Yu X F, Li Z Y, Sun G Q, Chen E X and Tan B X. 2006b. Waveform length extraction from ICESat GLAS data and forest application analysis. *Scientia Silvae Sinicae*, 42(7): 137-140 (庞勇, 于信芳, 李增元, 孙国清, 陈尔学, 谭炳香. 2006b. 星载激光雷达波形长度提取与林业应用潜力分析. *林业科学*, 42(7): 137-140) [DOI: 10.3321/j.issn:1001-7488.2006.07.024]
- Pang Y, Zhao F, Li Z Y, Zhou S F, Deng G, Liu Q W and Chen E X. 2008. Forest height inversion using airborne lidar technology.

- Journal of remote sensing, 12(1): 152-158 (庞勇, 赵峰, 李增元, 周淑芳, 邓广, 刘清旺, 陈尔学. 2008. 机载激光雷达平均树高提取研究. 遥感学报, 2008, 12(1): 152-158) [DOI: 10.11834/jrs.200801200]
- Qin X L, Li Z Y and Yi H R. 2005. Extraction method of tree crown using high-resolution satellite image. Remote Sensing Technology and Application, 20(2): 228-232 (覃先林, 李增元, 易浩若. 2005. 高空间分辨率卫星遥感影像树冠信息提取方法研究. 遥感技术与应用, 20(2): 228-232) [DOI: 10.3969/j.issn.1004-0323.2005.02.003]
- Sun S H. 2000. China's forestry remote sensing in the new century. Satellite Application, 8(2): 43-45, 50 (孙司衡. 2000. 迈进新世纪的我国林业遥感. 卫星应用, 8(2): 43-45, 50)
- Sun X and Tan B X. 2012. A study of estimating method for forest LAI using hyperspectral remote sensing. Journal of Chinese Urban Forestry, 10(4): 1-4 (孙晓, 谭炳香. 2012. 高光谱遥感森林叶面积指数估测方法研究. 中国城市林业, 10(4): 1-4) [DOI: 10.3969/j.issn.1672-4925.2012.04.002]
- Tan B X, Li Z Y, Chen E X and Pang Y. 2005. Preprocessing of EO-1 hyperion hyperspectral data. Remote Sensing Information, (6): 36-41 (谭炳香, 李增元, 陈尔学, 庞勇. 2005. EO-1 Hyperion 高光谱数据的预处理. 遥感信息, (6): 36-41) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-3177.2005.06.010]
- Tan B X, Li Z Y, Chen E X, Pang Y and Lei Y C. 2006. Estimating forest crown closure using Hyperion hyperspectral data. Journal of Beijing Forestry University, 28(3): 95-101 (谭炳香, 李增元, 陈尔学, 庞勇, 雷渊才. 2006. Hyperion 高光谱数据森林郁闭度定量估测研究. 北京林业大学学报, 28(3): 95-101) [DOI: 10.3321/j.issn:1000-1522.2006.03.017]
- Tong Q X, Tang C and Li H G. 1999. A creative action: the second experiment of Teng Chong aerial remote sensing. Geo-Information Science, 1(1): 67-75 (童庆禧, 唐川, 励惠国. 1999. 腾冲航空遥感试验推陈出新. 地球信息科学, 1(1): 67-75) [DOI: 10.3969/j.issn.1560-8999.1999.01.017]
- Tong Q X, Zheng L F, Wang J N, Wang X J, Dong W D, Hu Y M and Dang S X. 1997. Study on imaging spectrometer remote sensing information for wetland vegetation. Journal of Remote Sensing, 1(1): 50-57 (童庆禧, 郑兰芬, 王晋年, 王向军, 董卫东, 胡远满, 党顺行. 1997. 湿地植被成像光谱遥感研究. 遥感学报, 1(1): 50-57) [DOI: 10.11834/jrs.19970108]
- Wu C Z, Feng Y M, Shu Q T, Li Z Y, Wu H G and Che T T. 2011. Designing and realizing the forestry sub-compartment remote sensing division system based on high-spatial resolution images. Journal of Zhejiang Forestry College, 28(1): 40-45 (吴春争, 冯益明, 舒清态, 李增元, 武红敢, 车腾腾. 2011. 基于高空间分辨率影像的林业小班遥感区划系统设计与实现. 浙江农林大学学报, 28(1): 40-45) [DOI: 10.3969/j.issn.2095-0756.2011.01.007]
- Wu H G. 1995. Application of satellite remote sensing technology in the assessment of forest damage. World Forestry Research, 8(2): 24-29 (武红敢. 1995. 卫星遥感技术在森林病虫害监测中的应用. 世界林业研究, 8(2): 24-29)
- Wu J Y and Ni J. 1995. Spectral characteristics of the pine leaves damaged by pine moth and a model for detecting the damage early. Journal of Remote Sensing, 10(4): 250-258 (吴继友, 倪健. 1995. 松毛虫危害的光谱特征与虫害早期探测模式. 遥感学报, 10(4): 250-258) [DOI: 10.11834/jrs.1995034]
- Xiong Y Q and Wu J P. 2007. Tree-crown area detection algorithm for high spatial resolution remote-sensing image. Geography and GEO-Information Science, 23(6): 30-33 (熊轶群, 吴健平. 2007. 基于高分辨率遥感图像的树冠面积提取方法. 地理与地理信息科学, 23(6): 30-33) [DOI: 10.3969/j.issn.1672-0504.2007.06.007]
- Xu G H. 1994. Application and prospect on remote sensing and resources and environment information system. Remote Sensing of Environment China, 19(4): 241-246 (徐冠华. 1994. 遥感与资源环境信息系统应用与展望. 环境遥感, 19(4): 241-246) [DOI: 10.11834/jrs.1994033]
- Yang C J, Chen D Q and Wei Y M. 1999. Application of remote sensing and GIS in monitoring and management of forest disease and insect damage. Journal of Catastrophology, 14(1): 6-10 (杨存建, 陈德清, 魏一鸣. 1999. 遥感和GIS在森林病虫害监测管理中的应用模式. 灾害学, 14(1): 6-10)
- Yang X G, Fan W Y and Yu Y. 2010. Leaf chlorophyll content retrieval from hyperspectral remote sensing images. Journal of Northeast Forestry University, 38(6): 123-124, 135 (杨曦光, 范文义, 于颖. 2010. 基于Hyperion数据的森林叶绿素含量反演. 东北林业大学学报, 38(6): 123-124, 135) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-5382.2010.06.041]
- Yi H R, Bai L N and Ji P. 1994. Research method for remote sensing image processing using expert system. Forest Research, 7(1): 13-19 (易浩若, 白黎娜, 纪平. 1994. 专家系统用于遥感图像处理的方法研究. 林业科学研究, 7(1): 13-19)
- Yi H R and Ji P. 1998. The methods of evaluating burned area of forest fire by using remote sensing. Remote Sensing Technology and Application, 13(2): 10-14 (易浩若, 纪平. 1998. 森林过火面积的遥感测算方法. 遥感技术与应用, 13(2): 10-14) [DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.1998.2.10]
- Zeng Q W and Wu H G. 2009. Development of hyperspectral remote sensing application in forest species identification. Forest Resources Management, (5): 109-114 (曾庆伟, 武红敢. 2009. 基于高光谱遥感技术的森林树种识别研究进展. 林业资源管理, (5): 109-114) [DOI: 10.3969/j.issn.1002-6622.2009.05.023]
- Zhang B. 1996. Application of remote sensing technology on research of the wetland in China. Remote Sensing Technology and Application, 11(1): 67-71 (张柏. 1996. 遥感技术在中国湿地研究中的应用. 遥感技术与应用, 11(1): 67-71) [DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.1996.1.67]
- Zhang G L, Feng Y M, Jia J H, Wu H G and Li Z Y. 2010. Technology study in division of forest resources based on the high-spatial resolution remote sensing images. Remote Sensing Technology and Application, 25(1): 132-137 (张艮龙, 冯益明, 贾建华, 武红敢, 李增元. 2010. 基于高空间分辨率影像的小班区划技术研究. 遥感技术与应用, 25(1): 132-137) [DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2010.1.132]
- Zhang H. 2002. D-InSAR and PolInSAR: Methods and Applications.

- Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences: 60-114 (张红. 2002. D-InSAR与PolInSAR的方法及应用研究. 北京: 中国科学院研究生院(遥感应用研究所): 60-114)
- Zhang S Q. 2002. Introduction to China wetland science database. *Scientia Geographica Sinica*, 22(2): 189 (张树清. 2002. 中国湿地科学数据库简介. 地理科学, 22(2): 189)
- Zhang Y X. 2008. Study on Updating Technology of Forest Phase Diagram Based on Spot Data. Beijing: China Forestry Press (张煜星. 2008. 基于SPOT数据的森林林相图更新技术研究. 北京: 中国林业出版社)
- Zhang Y X and Wang Z X. 2007. Research on Application of Remote Sensing Technology in Forest Resources Inventory. Beijing: China Forestry Press: 16-21 (张煜星, 王祝雄. 2007. 遥感技术在森林资源清查中的应用研究. 北京: 中国林业出版社: 16-21)
- Zhao F, Pang Y, Li Z Y, Zhang H Q, Feng W and Liu Q W. 2009. Extraction of individual tree height using a combination of aerial digital camera imagery and LiDAR. *Scientia Silvae Sinicae*, 45(10): 81-87 (赵峰, 庞勇, 李增元, 张怀清, 丰伟, 刘清旺. 2009. 机载激光雷达和航空数码影像单木树高提取. 林业科学, 45(10): 81-87) [DOI: 10.3321/j.issn:1001-7488.2009.10.014]
- Zhao X W. 1983. Application of remote sensing in forestry. *Forest Science and Technology*, (4): 25-27 (赵宪文. 1983. 林业遥感应用与研究概况. 林业科技通讯, (4): 25-27) [DOI: 10.13456/j.cnki.lykt.1983.04.007]
- Zhao X W. 1995. Monitoring and Assessment of Remote Sensing on Forest Fire. Beijing: China Forestry Press: 1-11 (赵宪文. 1995. 森林火灾遥感监测评价. 北京: 中国林业出版社: 1-11)
- Zhou G Y, Xiong T, Zhang W J and Yang J. 2009. Forest height measurements based on polarimetric SAR interferometry. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 49(4): 510-513 (周广益, 熊涛, 张卫杰, 杨健. 2009. 基于极化干涉SAR数据的树高反演方法. 清华大学学报(自然科学版), 49(4): 510-513) [DOI: 10.16511/j.cnki.qhdxxb.2009.04.016]
- Zhu Z D. 1984. The principles and methods for compiling the map of desertification of China. *Journal of Desert Research*, 4(1): 3-15 (朱震达. 1984. 关于沙漠化地图编制的原则与方法. 中国沙漠, 4(1): 3-15)
- Zhu Z D. 1989. Desertification and Its Control in China. Beijing: Science Press: 18-86 (朱震达. 1989. 中国的沙漠化及其治理. 北京: 科学出版社: 18-86)
- Zhu Z D and Liu S. 1984. The concept of desertification and the differentiation of its development. *Journal of Desert Research*, 4(3): 2-8 (朱震达, 刘恕. 1984. 关于沙漠化的概念及其发展程度的判断. 中国沙漠, 4(3): 2-8)

Development course of forestry remote sensing in China

LI Zengyuan^{1,2}, CHEN Erxue¹

1. Institute of Forest Resource Information Techniques, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China;

2. Key Laboratory of Forestry Remote Sensing and Information System, National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100091, China

Abstract: According to the progressing characteristics of research project achievements and industry applications of forestry remote sensing, the development course of China's forestry remote sensing in the past 70 years (1951—2020) is divided into three periods and reviewed. 1951—1980 was the phase of remote sensing application by visual interpretation based on aerial photo. During this phase, China has established forest inventory technology system combining aerial photography and comprehensive ground survey. 1981—2000 was the pioneering and innovative developing phase of satellite remote sensing. For the first time, the satellite remote sensing digital image processing system for forest resource inventory was developed, and some major breakthroughs were made in key technical fields such as renewable resource inventory, series thematic map production, and ecological benefit evaluation using remote sensing. Meanwhile, the application fields have been expanded to the remote sensing inventory and monitoring fields of wetland resources, desertification and desertification land, forestry disasters, etc. 2001—2020 is the phase of rapid development of quantitative remote sensing and initiative construction of comprehensive application service platform. Through in-depth research on the basic theory of forestry remote sensing application and quantitative remote sensing technology, China has promoted the rapid development of quantitative remote sensing technology and designed a comprehensive forestry monitoring technology system, and established a comprehensive forestry remote sensing application service platform. In the end, we put forwards some suggestions for the future development of scientific research and application of forestry remote sensing, in order to meet the new requirements and tasks faced by the forestry and grassland sectors in a new era.

Key words: China, forestry remote sensing, development course, three periods, high resolution remote sensing