

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

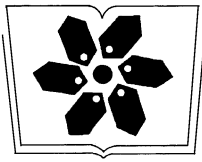
Acta Ecologica Sinica



第33卷 第6期 Vol.33 No.6 **2013**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 33 卷 第 6 期

2013 年 3 月 (半月刊)

目 次

专论与综述

- 基于遥感技术的森林健康研究综述..... 高广磊,信忠保,丁国栋,等 (1675)
Agent 农业土地变化模型研究进展..... 余强毅,吴文斌,杨 鹏,等 (1690)

个体与基础生态

- 辽东湾北部近海沙蜃的动态分布..... 王 彬,秦宇博,董 婧,等 (1701)
口虾蛄 proPO 基因全长 cDNA 的克隆与组织表达..... 刘海映,刘连为,姜玉声,等 (1713)
中缅树鼯头骨及下臼齿几何形态与环境的关系..... 朱万龙,贾 婷,黄春梅,等 (1721)
亚热带 3 种树种凋落叶厚度对其分解速率及酶活性的影响..... 季晓燕,江 洪,洪江华,等 (1731)
浙北地区常见绿化树种光合固碳特征..... 张 娇,施拥军,朱月清,等 (1740)
两种高质牧草不同生育期光合生理日变化及光响应特征..... 郭春燕,李晋川,岳建英,等 (1751)
基于 WOFOST 作物生长模型的冬小麦干旱影响评估技术..... 张建平,赵艳霞,王春乙,等 (1762)
基于线粒体 DNA 控制区的斑翅草螽不同地理种群遗传分化研究..... 周志军,尚 娜,刘 静,等 (1770)
圈养尖吻蝾螈雌体大小、窝卵数和卵大小之间的关系..... 胡明行,谭群英,杨道德 (1778)
应用寄生蜂和不育雄虫防控田间橘小实蝇..... 郑思宁,黄居昌,叶光禄,等 (1784)
青蒿素对外生菌根真菌化感效应..... 李 倩,袁 玲,王明霞,等 (1791)

种群、群落和生态系统

- 海湾生态系统健康评价方法构建及在大亚湾的应用..... 李纯厚,林 琳,徐姗姗,等 (1798)
上升流和水团对浙江中部近海浮游动物生态类群分布的影响..... 孙鲁峰,柯 昶,徐兆礼,等 (1811)
半干旱区生态恢复关键生态系统识别——以内蒙古自治区和林县为例..... 彭 羽,高 英,冯金朝,等 (1822)
太岳山油松人工林土壤呼吸对强降雨的响应..... 金冠一,赵秀海,康峰峰,等 (1832)
重庆酸雨区马尾松林凋落物特征及对干旱胁迫的响应..... 王轶浩,王彦辉,于澎湃,等 (1842)

景观、区域和全球生态

- 城市典型水域景观的热环境效应..... 岳文泽,徐丽华 (1852)
外来树种桉树引种的景观生态安全格局..... 赵筱青,和春兰 (1860)
基于耕地生态足迹的重庆市耕地生态承载力供需平衡研究..... 施开放,刁承泰,孙秀峰,等 (1872)
大气 CO₂ 浓度升高对稻田根际土壤甲烷氧化细菌丰度的影响..... 严 陈,许 静,钟文辉,等 (1881)

资源与产业生态

- 基于可变模糊识别模型的海水环境质量评价..... 柯丽娜,王权明,孙新国,等 (1889)
亚热带养殖海湾皱瘤海鞘生物沉积的现场研究..... 闫家国,齐占会,田梓杨,等 (1900)
黄土高原典型苹果园地深层土壤氮磷钾养分含量与分布特征..... 张丽娜,李 军,范 鹏,等 (1907)

旱作农田不同耕作土壤呼吸及其对水热因子的响应..... 张丁辰,蔡典雄,代 快,等 (1916)

商洛低山丘陵区农林复合生态系统中大豆与丹参的光合生理特性..... 彭晓邦,张硕新 (1926)

外源油菜素内酯对镉胁迫下菊芋幼苗光合作用及镉富集的调控效应..... 高会玲,刘金隆,郑青松,等 (1935)

基于侧柏液流的测定对 Granier 原始公式系数进行校正 刘庆新,孟 平,张劲松,等 (1944)

研究简报

湿地自然保护区保护价值评价方法..... 孙 锐,崔国发,雷 霆,等 (1952)

干热河谷印楝和大叶相思人工林根系生物量及其分布特征..... 高成杰,唐国勇,李 昆,等 (1964)

海滨沙滩单叶蔓荆对沙埋的生理响应特征..... 周瑞莲,王 进,杨淑琴,等 (1973)

宁夏贺兰山、六盘山典型森林类型土壤主要肥力特征 姜 林,耿增超,张 雯,等 (1982)

学术争鸣

小兴安岭十种典型森林群落凋落物生物量及其动态变化..... 侯玲玲,毛子军,孙 涛,等 (1994)

中国生态学会 2013 年学术年会征稿通知 (2002)

第七届现代生态学讲座、第四届国际青年生态学者论坛通知 (I)

中、美生态学会联合招聘国际期刊主编 (i)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 328 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 34 * 2013-03



封面图说: 亭亭玉立的白桦树——白桦为落叶乔木,可高达 25m,胸径 50cm。其树冠呈卵圆形,树皮白色,纸状分层剥离;叶三角状、卵形或菱状卵形;花单性,雌雄同株。白桦树喜光,耐严寒,对土壤适应性强,喜酸性土,沼泽地、干燥阳坡及湿润阴坡都能生长。常与红松、落叶松、山杨、蒙古栎混生。白桦的天然更新好,生长较快,萌芽强,在人为的采伐迹地或火灾、风灾等自然损毁的迹地里,往往由白桦首先进入,为先锋树种,而形成白桦次生林。白桦分布甚广,我国大、小兴安岭及长白山均有成片纯林,在华北平原和黄土高原山区、西南山地亦为阔叶落叶林及针叶阔叶混交林中的常见树种。

彩图及图说提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201112011838

高广磊, 信忠保, 丁国栋, 李丛丛, 张佳音, 梁文俊, 安云, 贺宇, 肖萌, 李文叶. 基于遥感技术的森林健康研究综述. 生态学报, 2013, 33(6): 1675-1689.

Gao G L, Xin Z B, Ding G D, Li C C, Zhang J Y, Liang W J, An Y, He Y, Xiao M, Li W Y. Forest health studies based on remote sensing: a review. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(6): 1675-1689.

基于遥感技术的森林健康研究综述

高广磊¹, 信忠保¹, 丁国栋^{1,*}, 李丛丛², 张佳音¹, 梁文俊¹, 安云¹,
贺宇¹, 肖萌¹, 李文叶³

(1. 水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室, 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083;

2. 北京师范大学全球变化与地球系统科学研究院, 北京 100875; 3. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要: 遥感技术可以有效完成复杂时空尺度海量信息的收集处理, 其与森林健康研究的交叉、融合大大提高了复杂时空尺度上森林健康研究的表达能力。目前, 森林健康遥感研究正处于各学科交叉、融合、调整, 由静态向动态、单一向复杂、零散向系统转变的关键发展时期, 但缺乏对森林健康问题的全面考量、逻辑安排和系统的顶层设计。在把握森林健康活力、组织结构和恢复力核心理念的基础上, 从森林资源调查、森林生态功能评估、森林健康风险控制和森林植被参数提取四个方面构建和丰富基于遥感技术森林健康研究体系, 对国内外森林健康遥感研究进行综述。通过对以上研究内容的总结分析, 明确基于遥感技术的森林健康研究各领域的研究进展, 及其在理论、技术和应用方面的不足。分析认为: (1) 未来应加强森林生态和遥感技术重大基础理论研究, 以明确森林结构、过程、功能与遥感数据之间的耦合关系; (2) 发展完善新型遥感技术、遥感数据解译算法与软件工具, 提高遥感数据的精确度、利用率和利用效率; (3) 提升森林健康遥感研究成果的科技转化水平, 推进快速分析评价与辅助决策功能研究, 指导相关森林健康经营活动和科学研究的开展, 以及林业政策的制定。

关键词: 森林健康; 遥感; 森林资源调查; 生态功能; 风险控制; 植被参数

Forest health studies based on remote sensing: a review

GAO Guanglei¹, XIN Zhongbao¹, DING Guodong^{1,*}, LI Congcong², ZHANG Jiayin¹, LIANG Wenjun¹, AN Yun¹,
HE Yu¹, XIAO Meng¹, LI Wenyue^{1,3}

1 Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Combating, Ministry of Education; College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2 College of Global Change and Earth System, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

3 Institute of Geographic Science and Natural Resources Research, Chinese Academy of Science, Beijing 100101, China

Abstract: Forest ecosystem, which is the largest terrestrial ecosystem, consists of forest coenosis and environment with complex functions of energy transformation and storage. The traditional field-based investigation has always failed to solve the forest issues in complex spatial and temporal scale. Remote sensing technology, which can collect and process huge amount of diverse data in a large scale, is an efficient tool to understand forest ecosystem. Accordingly, the interdisciplinary and combination with remote sensing technology has made great progress on the development of forest health issues over the past decades. At present, forest health studies based on remote sensing are in the process of combination with relevant subjects in a key transformation period from static to dynamic state, single to composite system, and fragmented to framework thought. However, these studies are lack in a synthetic and logic consideration, or a top design on forest health

基金项目: 林业公益性行业科研专项(200804022A)

收稿日期: 2011-12-01; 修订日期: 2012-10-26

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: dch1999@263.net

issues. Therefore, in this paper, based on the core theory of forest health involving vigor, organization and resilience, we give a summary of the forest health studies based on remote sensing both at home and abroad in order to make a better understanding on technical know-how of its achievements, progresses and disadvantages in theories, technologies and applications to four categories: forest resources inventory; ecological functions assessment; forest health risks control; vegetation parameter retrieval. In conclusions, the studies indicated that: (1) the basic studies should be strengthened on forest ecology and remote sensing theory and technology in order to know the relationships between forest structure, process, function and remote sensing data; (2) new remote sensing technology, the remote sensing data algorithm and software tools should be developed and perfected to increase the accuracy, utilization and efficiency of remote sensing data; (3) the transformation from forest health scientific studies to their achievements should be enhanced to speed up the analysis, assessment and auxiliary decision; to develop the effects of forest health and scientific studies, as well as to formulate the forest policies.

Key Words: forest health; remote sensing; forest resources inventory; ecological function; risk control; vegetation parameter

森林是陆地生态系统的主体,总面积超过 40 亿 hm^2 , 约占陆地总面积的 31%^[1]。20 世纪以来,由于森林面积萎缩和质量下降引发的生态环境事件不断出现,使得森林健康问题得到前所未有的关注,各国学者开展了大量而富有成效的研究工作^[2-3]。但是,传统的原地观测与受控实验等研究方法不仅需要耗费大量的人力物力资源,且速度缓慢,缺乏时间序列上的可比性,一些偏远地区更是难以到达;因为缺乏恰当的尺度转换手段,整体研究结果常常难以令人信服,方法具有一定的局限性^[4]。遥感技术则为人们提供了广阔的视野、海量的信息及一个可以实现客观、连续、重复、动态对比分析和推断预警的工作平台。随着遥感技术的迅速发展,遥感资料的分辨率也在不断提高,其技术的应用也日趋成熟,特别是近年来遥感技术与地理信息系统、全球定位系统相结合,已成功应用于森林健康研究的诸多领域,显示出强大的生命力^[5]。本文对国内外遥感技术在森林健康研究中的应用进行详细总结,以期梳理出我国遥感技术在森林健康领域的应用方向,并为相关研究者提供借鉴与参考。

1 基本原理

森林植被的物理属性与草原、荒漠、农田、水体、建筑用地等土地利用类型有很大的区别;不同森林植被在不同生存环境和生长发育阶段,体内生化物质组成、含量、特性以及细胞结构、含水量也各不相同,这种物理属性的差异形成了目标物独特的光谱反射曲线,是用于判断和区别森林植被的重要手段。上述差异虽然导致森林植被光谱反射曲线各波段反射值略有不同,但光谱曲线的形状特征是基本一致的;然而当植被健康受到侵害时,植物体内的叶绿素浓度会发生明显变化,光谱曲线的形状特征也会随之发生改变^[6]。研究证实:遥感光谱数据可与森林资源数量、稳定性、结构、功能和干扰等指标建立较好的相关关系^[7];借助遥感技术,人们能够判断和区别不同健康状态的森林植被,准确、及时地掌握森林健康发生、发展的状况。

传感器是遥感技术的核心部件,按照搭载平台的不同,主要可以分为:星载、机载、气球和手持四种类型,其中又以卫星传感器研究开展的最为广泛,成果也最为丰硕。目前,在森林健康遥感研究领域广泛应用的卫星传感器主要包括:美国 Terra & Aqua (MODIS)、Landsat-5 TM、Landsat-7 ETM+、ASTER、AVHRR、Quickbird-2、IKONOS-2、ICESAT/GLAS,法国 SPOT 4&5,中国、巴西 CBERS-02B,日本 JERS-1,加拿大 Radcat-1 和印度 Cartosat-1 等。其中, Landsat 系列卫星、SPOT 卫星多光谱数据以及 CBERS-02B 的多光谱数据拥有较高的空间分辨率,但是其重访周期较长,不适用于实时的森林健康研究工作;Quickbird-2、IKONOS-2 虽然空间分辨率较高,覆盖周期也较短,但却不适合大范围森林健康研究,而且数据价格十分昂贵;MODIS 数据光谱分辨率很高,每 1—2d 便可观测地球表面 1 次,因此用于森林健康研究具有较强的优势,但其空间分辨率较低,多适用于较大空间的尺度森林健康研究。

上述星载遥感技术均为被动式遥感,依赖于太阳,只有白天接收的数据可用,受天气、云层影响较大,其在森林健康研究中的应用也受到限制。与之相比,雷达成像为主动式遥感,不受太阳影响,昼夜数据均有效,且穿透力较强,尤其在热带地区,其应用具有极大优势。雷达遥感的不足之处在于覆盖范围小,同名点数据重复获取难,而且缺少光谱信息,因此其实际应用不如多光谱数据。

表 1 全球主要在轨遥感卫星基本参数^[8-9]

Table 1 The basic parameters of main satellites in orbit

名称 Satellite	国家 Country	轨道高度/km Orbital altitude	倾角/(°) Inclination	轨道周期/min Orbital period	扫描带宽/km Scanning bandwidth	分辨率/m Resolution
Terra & Aqua	美国	705	98.2	98.9	2300×2300	250—1000
Landsat-5 TM	美国	705	98.2	98.9	185×185	30—120
Landsat-7 ETM+	美国	705	98.2	98.9	185×185	15—60
ASTER	美国	705	98.2	98.9	60×60	15—90
AVHRR	美国	833	98.7	101.4	2400×6400	1100
Quickbird-2	美国	450	98.0	93.4	16.5×16.5	0.61—2.44
IKONOS-2	美国	681	98.1	98	11.3×11.3	1—4
Spot 4	法国	832	98.7	101.5	56×56	10—20
Spot 5	法国	832	98.7	101.5	56×56	2.5—10
CBERS-02B	中国 & 巴西	778	98.5	100.4	185×185	2.4—258
JERS-1	日本	568	97.8	96.1	75×75	18
Radcat-1	加拿大	796	98.6	100.7	100×100	10—30
Cartosat-1	印度	618	97.9	97	26.2—29.4×26.2—29.4	2.5
ICESAT/GLAS	美国	590	94	—	—	—

森林健康理论的属性与内涵十分丰富^[10-16],其与遥感技术的融合大大提高了复杂时空尺度上森林健康研究的表达能力,遥感技术已经成为森林健康研究的坚实保障^[17]。但是,现阶段国内外森林健康遥感研究多为生态学、林学、气候变化等领域的自发研究,只侧重于森林健康遥感研究的某一方向,具有单一性、片段性的特点,缺乏对森林健康问题的全面考量、多学科交叉融合的逻辑安排和系统的顶层设计。针对以上问题,在把握森林健康活力、组织结构和恢复力核心理念的基础上^[18-20],本文从森林资源调查、森林生态功能评估、森林健康风险控制和森林植被参数提取四方面对森林健康遥感研究进行总结综述。研究认为:森林资源是森林健康的基础与直观表现,表征了森林生态系统的组织结构;森林生态功能是森林健康的核心,表征了森林生态系统的活力;森林健康风险反映了森林健康的胁迫因子,表征了森林生态系统的恢复力;森林植被参数则是遥感技术支持下森林健康研究的重大突破,是森林健康数量化表达的重要途径,也是森林生态系统组织结构、活力和恢复力的综合体现。以上四方面内容既相互独立,又具有密切的内在联系,基本反映了生物因素和非生物因素对森林的复杂影响,不仅体现了遥感技术在森林健康研究领域的关键作用,还体现了多种用途和价值的森林资源管理目标,是对森林健康遥感研究较为全面、系统的总结阐述;对于构建和丰富基于遥感技术森林健康研究体系,开展森林健康经营,恢复和重建不健康及亚健康的森林,应对全球气候变化和缓解全球生态危机等都具有重要而深远的意义^[21]。

2 森林资源调查

森林资源的动态变化是森林发展演替有利因子与森林健康胁迫因子综合作用的结果,对森林健康具有重要的指示作用。传统森林资源调查方法采用样地调查推算总体,这种方法代价高昂、持续时间长且不利于动态跟踪。遥感技术的应用克服了传统调查方法的缺点,并可对森林资源结构情况进行及时的、动态的、准确的分析,从而较好地了解森林健康状况^[22]。遥感技术在森林调查领域的应用,主要体现在森林面积(覆盖率)、森林类型与树种识别、林分蓄积量等 3 个方面。

2.1 森林面积(覆盖率)

森林面积的动态变化是森林健康状况的直接表现。利用遥感图像估算森林面积的方法主要包括直接分类法和模型法。其中,直接分类法是利用最大似然分类、决策树分类、支持向量机分类等分类算法将森林与非森林分开,然后统计森林面积的方法。而模型法则是以地面调查为基础,采用与森林面积相关性高的波段或变量,建立多元回归模型。常用的回归模型包括简单的线性回归模型和非线性回归模型,其中常用的非线性回归模型有回归树(CART、Random Forest 等)、神经网络、辐射传输、Logistic 回归等等。这一方法的优点是客观、准确、可重复,特别有利于大尺度研究^[23]。

利用遥感估算森林面积的技术已经较为成熟,在全球及区域尺度上均有成功案例。世界粮农组织(FAO)曾于1980、1990和2000年三次集中开展热带森林遥感调查,以评估热带森林资源;2010年全球森林遥感调查则主要聚焦于森林相关土地覆盖和土地使用变化,特别是有关森林砍伐、植树造林和森林的自然扩张^[1]。巴西遥感监测显示,伐木对亚马逊热带雨林造成了极为严重的破坏,巴西5个主要木材产区伐区面积介于12075—19823 km²,毁林面积最高达到原报告结果的123%^[24-25]。Mon 等^[26]用最大似然分类法、多元线性回归法、森林覆盖制图法(FCD mapper)等3种方法,估算了热带地区混交落叶林的森林覆盖度。Wang 等^[27]利用MODIS数据评估 Katrina 飓风对 De Soto 国家森林公园的破坏,结果显示归一化红外指数(the Normal Different Infrared Index, NDII)是评估飓风损害森林的最优指示因子,其与受害森林面积存在良好的线性关系($R^2=0.79, P<0.0001$)。

由于遥感技术可以快速、准确地完成森林面积统计,也得到了国内学者的广泛青睐^[28]。杨丹等^[29]研究了 Landsat ETM+遥感影像应用于北京地区森林覆盖统计监测的最佳波段组合和融合处理技术,采用监督分类的方法提取森林覆盖类型、位置和面积信息,研究结果表明:北京市森林覆盖率为46.66%。许炯心等^[30]利用森林植被与农作物季节变化之间的差异,采用计算全年各月加权平均 NDVI 或6、10月平均 NDVI 的方法,分别将森林覆盖率与 NDVI 的决定系数提高16.07%和21.48%,有效解决了农作物与森林植被混合像元的问题。

2.2 森林类型与树种识别

林分类型和物种多样性表征了森林生态系统的基本组成,也是体现森林生态系统稳定性的因子之一。一般来说,物种多样性较高的林分抵抗干扰的能力也较强。国内外基于遥感技术的森林类型与树种识别研究较多^[31-32],特别是多光谱卫星数据在此分类上有着很广泛的应用。但是由于光谱特征数较少,存在大量的“同物异谱和同谱异物”现象。因此,只使用单一的光谱特征用于森林类型区分较为困难,与纹理、地理、环境等特征结合后,其森林类型的分类能力便会显著提高。王立海等^[33]利用 Landsat TM,并且把与森林植被分布密切相关的数字高程模型数据、坡向、土壤类型等地学知识信息与光谱信息综合起来,建立起专家分类识别系统进行森林类型的识别,但这种方法具有很大的地理局限性。张增祥^[34]利用 MODIS 数据同时结合 DEM 高程数据,采用最大似然分类方法进行针叶林和阔叶林自动分类,然后利用 MODIS 数据易于获取、重访时间短的特点,计算7—9月生长季和11月—翌年1月落叶季植被的植被指数 EVI 的差别进行常绿林和落叶林的自动分类,取得较好效果。

受分析精度和工作量的制约,传统的宽波遥感在森林类型与树种识别研究领域有着很大的局限性^[35],而高光谱遥感数据能够在空间分辨率不高的情况下辨别出森林植被的细微差别,一定程度上弥补了传统宽波遥感的不足^[36],此类研究主要包括两种方法:一是利用高光谱遥感数据提取森林植被的生化信息识别森林和树种类型。Martin 等^[37]基于不同树种特有的生化特性,利用机载高光谱数据识别11种落叶、针叶纯林和混交林,总体精度达到75%。宫鹏等^[38]研究发现:20 nm 是识别加州主要针叶树种的理想波段宽度,利用对数变换、一阶微分和归一化变换后,平均精度高于94%,且太阳高度角变化对树种识别影响不大。二是利用高光谱信息建立模型自动分离树种(组)。Darvishsefat 等^[36]在提取特定树种分布时,利用光谱混合模型处理 HyMap 数据,证明了线性分离模型在分离针叶林与落叶林及其混交程度方面的优势。

2.3 林分蓄积量

森林蓄积量的计算是应用遥感技术进行森林资源调查的基础内容^[39],基本思想是充分利用遥感图像,以非线性模型为基础,建立以样地大小为单位的蓄积量估测方程,对监测区域进行全面估测,然后根据森林区划实现落实到林班和小班的蓄积量估测^[40]。尽管遥感估测林木个体蓄积量存在一定的不确定性,但如果非线性模型准确,那么样地及林分尺度的蓄积量估测亦具有可信度^[39]。事实上,HUTSCAT、AISA、Landsat TM、Spot Pan 和 ERS-1/2 等 10 余种航空和雷达遥感数据的应用结果也证实了遥感技术在森林蓄积量研究领域应用的可能性与可靠性。其中 HUTSCAT 雷达遥感数据与实测数据相关性最高($R^2=0.68$),其精度与传统森林资源清查方法基本一致;而与激光雷达数据相比,卫星光谱数据信息量更大,这一优势在森林资源连续清查中尤为明显^[41]。Hall 等^[42]结合 Landsat ETM 遥感数据与样地实测数据,创造性地提出了 BioSTRUCT 测算法,利用树高、郁闭度信息构建“Stand-Level”模型,用以估测林分立木蓄积量。加拿大 Alberta 地区应用研究结果显示,当地林分立木蓄积量为 $4\text{m}^3/\text{hm}^2$,与以往研究相比结果基本一致($P=0.65$)。

自 20 世纪 70 年代起,经历了样本形状、组织、分流域建立方程,与航天、航空资料相结合等研究方法,我国学者逐渐探索确定了利用遥感数据,采用定性和定量因子共同建立森林蓄积量估计方程的研究方法,并在全国范围内开展了大量应用实验^[43]。刘志华等^[44]利用 Landsat TM 遥感图像,对呼中林区森林蓄积量进行了估测,实验证明中红外波段、可见光波段和光谱变换第一主成分与森林蓄积量间存在负相关关系;基于最佳的人工神经网络参数、适当的 GIS 提取信息和遥感波段,呼中林区森林蓄积量的预测值和实测值的相关系数达 0.973,经主成分变换后,数据量被有效降低,而预测精度只有少量下降($R^2=0.934$)。Gu 等^[45]采用 K-近邻法对比讨论了归一化植被指数、环境植被指数和组合光谱特征指数在森林蓄积量估测中的精度问题,其在白河林业局的实验结果显示了这种方法在估测误差方面的优越性(44.2%),与 Tokola^[46]的估测误差(40%)基本一致,且高于 Hyypä 等^[41]的研究结果(56%)。

目前,遥感技术支持下的森林资源调查技术已经较为成熟。美国、加拿大等森林资源大国都已将遥感纳入到森林资源清查技术体系之中^[47]。2005 年,全美森林资源清查项目遥感样地已达 650 万个,而地面实测样地仅为 41 万个^[48-49];我国从第六次国家森林资源连续清查开始使用森林资源清查遥感判读与地面调查相结合的双重抽样法^[50-51],2004—2008 年,全国第七次森林资源清查判读遥感样地数量已经高达 284.44 万个,远超地面实测样地数量(41.50 万个)^[52]。同时,森林资源调查的遥感应用研究已经不再仅仅局限于传统的森林资源调查范畴,正逐渐向其他领域发展,开始着重强调人类活动和自然因素对森林的深刻影响,以及森林生态功能的发展变化,如人为干扰、自然灾害和气候变化造成的森林损害,森林碳汇与全球气候变化等^[53-54]。

3 森林生态功能评估

健康的森林应具有多重的生态功能和价值,如涵养水源、固碳释氧、积累营养物质和保持生物多样性等。

3.1 森林生化信息分析

提取植物体内的色素、营养成分及纤维素、木质素、糖、淀粉、蛋白质等生物化学信息对于研究和理解光合作用、碳氮循环、林下调落物分解速率等生态系统过程与功能具有十分重要的意义^[55],而高光谱遥感技术的应用使得利用遥感技术获取森林生态功能信息成为可能^[56]。研究森林生化组分与光谱特征的关系主要有两种途径,一是建立包含化学组分的森林植被散射和吸收模型;二是利用统计分析方法,由森林植被光谱特征估算化学组分含量^[57]。Cho 等^[58]利用 AISA、SPOT 和 SSAT 三种遥感影像分析发现:叶绿素含量与树冠层压力显著相关,当冠层压力持续增加时红边效应向短波方向移动明显。此外,Sampson 也研究指出,叶绿素 a、b 含量动态变化的光谱反应是森林健康状况波动的有效预警指示因子^[59]。

20 世纪 80 年代,国内学者就已经利用遥感技术提取植被生化信息^[60]。随着遥感技术的不断发展,国内学者基于遥感技术提取森林生化信息的研究也不断深入,由色素等单一要素逐步发展为色素、水、干物质等一系列生化信息,取得了众多成果^[57]。施润和等^[61]设计实施了植被生化信息遥感提取的星地同步实验,探索了研究地点的选择、实验内容、方法与流程,讨论了数据获取潜在风险以及卫星观测数据、地面光谱数据和生

化数据同步性等问题。高娜^[62]以地物光谱数据、叶绿素数据、遥感影像数据、林相图数据、GPS 数据为主要信息源,分析了吉林省牡丹岗林场受病害落叶松的地物光谱特征、光谱特征与叶绿素的相关性,总体精度超过 90%;构建了落叶松早落病信息提取的数据库,并对早落病的空间分布特征进行了分析。颜春燕^[63]围绕遥感提取植被生化组分信息这一中心,从经验半经验的统计回归提取方法到反演物理模型来提取的方法,从方法分析到模型建立,进行了一个较为系统的研究,实践并评估了遥感提取生化组分信息的方法与模型。蒲瑞良和宫鹏^[56]系统全面地介绍了利用高光谱遥感数据提取森林生物化学信息的研究进展和方法,并以美国巨杉 (*Sequoiadendron giganteum*) 为例,利用高光谱数据分析了其营养状况。

3.2 森林碳源/汇估算

在全球气候变暖的大背景下,森林植被在全球碳循环方面的作用愈发得到人们的重视和推崇,基于遥感技术的森林碳汇研究已经成为全球最火热的科学研究问题之一^[64]。早在 20 世纪 90 年代,学术界就有遥感估算森林生物量的相关报道^[65]。为了破解地球失踪碳汇之谜,Myneni 等在遥感技术支持下,分析了欧亚及北美大陆森林的碳储量变化,结果表明地球北部森林年碳汇量达 (6.8 ± 3.4) 亿 t,其中 70% 的碳被欧亚大陆森林吸收,但其碳汇能力与森林面积并不成正比例关系^[66]。DeFries 等^[67]采用 NOAA-AVHRR 数据重新评估了热带地区森林砍伐与再生过程中的碳排放量,并认为 20 世纪 80 年代和 90 年代热带地区的碳通量分别为 $0.6 (0.3-0.8)$ Pg/a 和 $0.9 (0.5-1.4)$ Pg/a,明显低于联合国粮农组织 $1.9 (0.6-2.5)$ Pg/a 的评估结果。2002 年,美、俄、加三国科学家联合研究发现:1998 年,俄罗斯西伯利亚地区共约有 1330 万 hm^2 森林发生火灾,是俄官方统计数据的 5 倍,这一地区森林火灾的碳排放量相当于全球森林火灾碳排放量的 14%—20%,是加拿大和俄罗斯地区化石燃料燃烧碳排放量的 23%—39%^[68]。2011 年,FAO 指出广泛建立遥感与地面调查相结合的国家森林碳库监测系统已经成为监督约束《京都议定书》缔约国,应对全球气候变化的紧迫任务^[69]。

中国科学家在森林碳源/汇估算研究领域也做出了卓越的贡献,赢得了世界科学界的广泛尊重。北京大学方精云教授利用森林清查资料、卫星遥感数据、统计资料等数据资料,在区域和国家尺度范围进行了大量研究^[70-71]。2001 年,Fang 等^[72]利用大量生物量实测数据,结合使用中国 50a 来较系统的森林资源清查资料及相关统计资料,基于生物量换算因子连续函数法,研究了 1949—1998 年中国森林植被碳库及其时空变化。相关研究成果在 Science 杂志刊发后,受到了学术界的广泛关注。Science 杂志首席指导 Andrew Sugden 博士认为,该论文是一个里程碑式的研究,将长期被引用;英国著名的“泰晤士报”教育周刊利用一个整版的篇幅,报道了研究的经过,并在头版头条发了标题新闻^[73]。

森林的生态功能是复杂而多样的,但目前的遥感技术还难以有效支撑水源涵养、保育土壤、营养物质积累等领域的研究,研究内容局限性十分明显。同时,现阶段的森林生态功能评估研究大都集中在森林生态功能的直接估算,而忽视了自然环境变化、人类活动对森林生态功能的负面影响。研究需建立气候变化、生物入侵、工程建设项目等自然环境变化和人类活动与森林生态功能间的耦合关系,明确其对森林生态功能的负面影响,并提出相关对策。

4 森林健康风险控制

受自然和非理性人类活动的影响,森林结构遭到严重破坏、功能持续衰退,森林健康状况无时无刻不面临着巨大的威胁。遥感技术的应用打破了人类感官的局限,在更为广阔的时空尺度上,为人类提供了森林健康风险控制的平台。

4.1 林火管理

火灾是威胁森林健康的重要风险因子之一,一旦发生其对森林的危害往往是巨大、彻底和不可逆的,气候变化情景下林火管理更具有十分重要的实际意义。美国国家航空和航天管理局 (NASA) 全球火灾数据库 (GFDP) 是全球最著名的火灾数据库及管理系统,GFDP 的实质是一种基于 Terra & Aqua MODIS 卫星的遥感数字地图,其主要设计功能包括:(1)火场定位;(2)火烧迹地监控。在现有技术条件下,GFDP 最大程度地降低了系统执行误差,为科研管理人员提供了一种大尺度监测、掌控森林火情的方法^[74]。“森林火灾预防与控

制项目(FPCP, 1995—2001)”是欧盟—印度尼西亚国际合作项目, 欧印双方在林火遥感数据解译、林火预警监测、可燃物风险控制、火烧迹地恢复重建等领域取得了广泛的成果, 其主要遥感数据来源是 NOAA 卫星。2003 年, 作为“森林火灾预防与控制项目”的后续计划, 欧盟与印度尼西亚政府合作开展了“南苏门答腊森林火灾管理项目”, 项目计划构建省域尺度火险探测和林火管理系统。雷达遥感在林火管理领域也有应用, 美国科学家曾采用多孔径雷达遥感数据, 以半经验方法估算了黄石公园林冠可燃物质量、林冠体积密度和叶含水量等 3 个林分可燃物载荷参数, 与地面研究相比总体精确度超过 70%, 将可燃物分类后, 精度更是达到 85% 以上^[75]。

在我国, 王明玉等^[76]利用遥感与地面调查数据及植被分布图分析了 2008 年南方冰雪灾害对森林可燃物的影响, 结果表明: 林木受害后主要表现为地表可燃物载量急剧增加, 对于不同可燃物、不同受害程度增加的量有很大不同, 地表可燃物载量最大增长倍数为 32.81 倍, 最高地表可燃物载量可达 142.82t/hm²。田晓瑞等^[77]利用北京市土地利用图和 Landsat TM 影像, 采用监督分类方法将森林可燃物分为草地、幼林、针叶林等 6 类, 并获得可燃物分类图。

4.2 病虫害综合防治

遥感技术提供了一种大尺度的森林病虫害快速评估方法, 分析掌握病虫害爆发动态及其与环境因子的关系, 以便更好地认识灾害爆发规律并做出可能的预测^[78-79]。Spruce 等^[80]利用 MODIS 遥感影像分析揭示了舞毒蛾(*Lymantria dispar*)与森林落叶之间的关系, 绘制了其侵袭美国东部森林的时间序列图。南非相关研究发现: 可见光和近红外光谱反应可以有效区别健康展叶松(*Pinus patula*)林木与受云杉树蜂(*Sirex noctilio*)侵害林木, 且传感器空间分辨率与可监测受害等级密切相关, 当空间分辨率为 2.3 m 时, 可监测发现 11%—15% 的高水平林木受害现象; 而当分辨率为 1.75 m 时, 则可发现 1%—10% 的低水平林木受害现象^[81]。通过 Landsat TM 影像提取森林活力信息, Coops 等顺利完成黑松(*Pinus thunbergii*)疏伐实验, 以刺激其分泌松脂抵抗中欧山松大小蠹(*Dendroctonus ponderosae*)引发的青变菌感染, 成功降低了英属哥伦比亚山区黑松的死亡率^[82]。

我国在 20 世纪 70 年代就已开展了健康林木与虫害林木的光谱分析研究^[83]。此后, 受大面积营造人工针叶纯林影响, 我国非常重视松毛虫的遥感研究, 在“八五”时期就有专题科技攻关项目^[84]。武红敢等^[85]利用近、中红外波段对植物体水分和叶绿素含量变化的敏感反应建立森林质量变化遥感监测模型, 以评价森林健康状况, 地面验证结果显示绝大多数的严重变化图斑均是由松毛虫致害造成的。此外, 李明阳等^[86]以 Quick Bird 遥感影像为基础, 根据物种空间分布的主导生物地理因子, 绘制了松材线虫(*Bursaphelenchus xylophilus*)、日本松干蚧(*Matsucoccus matsumurae*)和美国白蛾(*Hyphantria cunea*)3 种有害生物的空间适生性评价图。王震^[87]提取浙江富阳地区不同时期植被指数, 反演叶面积指数和覆盖度, 分析不同受害时期马尾松(*Pinus massoniana*)林生态系统功能的演变过程, 分析认为由于当地自然条件优越, 森林植被演替使得森林生态系统逐渐恢复。

4.3 生物入侵防控

入侵生物可以改变环境, 打破了当地森林植被的生态平衡, 使之对己有利, 而不利用本地种, 因此常常伴随着生物多样性下降, 是森林健康的重大威胁^[88]。遥感光谱数据显示: 入侵物种与本地物种具有不同的光谱特征, 利用这种差异可以锁定现实和潜在入侵生物种, 分析其入侵形式、路径与发展趋势。遥感在生物入侵研究领域最主要的应用为生物入侵扩散模型, 对许多入侵物种来说, 通过确定入侵种-环境(气候、地形、生态等)之间的关系便可利用遥感和环境数据建立相应的模型预测入侵种的潜在分布。陈浩等^[89]在信息理论的框架下建立了一种改进的加权平均逻辑回归模型预测入侵物种豚草的潜在分布, 利用 Logit 阈值和频率统计的方法对它的生境进行相对适应性划分, 以减少生物多样性数据的不对称带来的影响。

目前, 遥感技术在森林生物入侵研究领域还存在较大局限。由于遥感技术主要监测森林林冠层的发展和变化, 受此局限其在生物入侵防控研究领域的应用也主要针对物种对林冠层的破坏和侵袭, 但多数入侵物种

并不占据森林群落的林冠层,二者之间的具体适应机制还需进一步探索,相关研究也少有报道^[90-91]。此外,本地种与入侵种的光谱差异也时常与地形、林隙、林木健康状况造成的光谱反应相混淆^[92-93]。美国国家航空和航天管理局(NASA)与美国地质勘探局(USGS)联合构建的国家入侵物种预警系统已经服务运行,相信不久的将来生物入侵研究领域会有新的突破^[94]。

4.4 酸雨(SO₂)和臭氧危害监测

酸雨(SO₂)和臭氧是欧美国家森林健康研究的重要内容,美国、加拿大和欧盟都已将酸雨(SO₂)和臭氧纳入森林健康遥感监测指标体系。在欧洲,Landsat TM 遥感监测数据显示:SO₂ 致害落叶是导致捷克北部挪威云杉林(*Picea abies*)大面积退化的重要原因,且这一危害在海拔 600—1000 m 的南坡和东南坡尤为严重^[95]。在北美,遥感应用研究发现:臭氧是西黄松(*Pinus ponderosa*)叶面损伤的重要致害因子,且臭氧浓度与当地人口总量呈显著正相关,说明人类活动造成的臭氧浓度增加是西黄松叶面损伤的根本原因^[96]。王博在高光谱数据监测酸雨胁迫马尾松实验中发现:不同酸雨梯度胁迫下马尾松光谱反射曲线差异明显;酸雨胁迫可使马尾松叶绿素值发生改变;不同强度的酸雨胁迫与马尾松叶绿素生长速度呈正相关关系^[97]。

目前,遥感技术支持下的森林健康风险控制研究逐渐展开,但多数案例都基于特定区域的统计研究,源于生态过程的模型研究还比较薄弱,构建的少数模型都具有严格的区域限制,难以在大尺度上推广应用。同时,由于森林健康风险控制研究多基于林木受害后的落叶和叶片颜色变化,因此相关研究多针对林木受害中后期,无法完成对林木受害现象的早期监测,研究工作滞后性明显,真正做到森林健康风险实时预报道路还很漫长^[98]。

5 森林植被参数提取

虽然遥感技术破解了依赖地面调查难以完成大尺度森林综合评估的难题,但有时森林群落信息依然难以被直接获取。这种情况下,植被参数可以为相关研究提供大量、有效信息,基于遥感影像的森林植被参数已经成为森林健康状况数量化表达的重要途径^[99-100]。

5.1 植被指数

目前,国内外发展了几十种不同的植被指数模型。其中,应用最为广泛的为归一化植被指数(NDVI)^[101]。Hoffman 等^[102]基于 MODIS-NDVI 构建了森林关联识别与状态追踪系统,该系统可以有效识别自然和人为活动对森林的早期干扰,发现潜在的威胁因子,为森林健康提供第一重保护。马来西亚学者研究显示:NDVI 与红树林分布密度显著相关,是红树林生长状态及植被空间分布的最佳指示因子。一般来说,年轻、生长旺盛的红树林健康状况较好,其 NDVI 也处在一个较高的水平(0.40—0.68);而遭受风沙沉积和海潮侵蚀的红树林健康状况较差,NDVI 也相对较低的水平(0.38—0.47)^[103]。

朴世龙等^[104]利用 NOAA-AVHRR 数据,以 NDVI 作为植被活动的指标,研究了中国 1982—1999 年四季植被活动的变化,探讨植被活动对全球变化的主要响应方式。结果表明,中国植被四季平均 NDVI 均呈上升趋势,且季节性、区域性差异明显,生长及提前是中国植被对全球变化响应的最主要方式。方精云等^[105]利用 NOAA-AVHRR/NDVI 时间序列数据,研究了 1982—1999 年中国植被覆盖区的 NDVI 变化,结果表明,我国大多数地区 NDVI 都呈不同程度的增加趋势,全国平均年 NDVI 增加了 7.4%,20a 间中国植被活动在增强。

此外,为了修正土壤背景对 NDVI 的影响,Huete 等^[106]还提出了土壤调节植被指数(SAVI)。这种植被指数虽然改善了与叶面积指数的线性关系,却丢失了部分植被信号,使植被指数偏低。而垂直植被指数(PVI)则同时消除了土壤背景和大气效应的干扰与影响。

5.2 叶面积指数

叶面积指数(LAI)是指总叶面积与其覆盖下土地面积的比值,LAI 不但可以直接反映出在多样化尺度的植物冠层中的能量、CO₂ 及物质环境,还与蒸散量、土壤水分平衡、树冠层光量的截取、地上部初级生产力、总初级生产力等生态过程直接相关,是衡量森林健康状况的一个重要活力指标^[107]。从遥感影像中提取 LAI 通常有 4 种方法:植被指数法、混合象元分解法、几何光学模型法和辐射传输模型法^[108]。伴随着遥感技术的发

展,特别是光谱微分技术的应用,LAI 与遥感数据的相关性和精确度不断提高^[55]。Spanner 研究认为,受林下植被、林隙和林冠郁闭度反射作用的影响,0.63—0.69 μm 和 1.55—1.75 μm 反射带与 LAI 呈显著的反曲线关系;而当林冠郁闭度大于 89% 时,0.76—0.90 μm 反射带又与 LAI 呈极显著的正相关关系^[109]。

我国学者关于叶面积指数的研究只要集中在植被指数,特别是 NDVI 与叶面积指数的相关关系。惠凤鸣等^[110] 基于 ETM+原始图像、相应的视反射率图像和大气校正后的地面反射率图像,分别计算了贵州黎平县北部杉木林区相应的归一化植被指数;研究结果表明,归一化植被指数与相应地面实测的叶面积指数有着较好的线性相关关系,并且传感器影响去除、大气校正等技术手段将逐步提高归一化植被指数与实测 LAI 的相关系数。席建超等^[111] 利用 TM 影像建立了 NDVI 与不同针叶林有效 LAI 间的线性和非线性回归模型,其中三次曲线回归方程拟合精度最高,约为 70.0%。

5.3 光合有效辐射

光合有效辐射(PAR)是指绿色植物进行光合作用过程中,吸收太阳辐射使叶绿素分子呈激发态的那部分能量,波长约为 400—700 nm。因为森林植被的光合作用可以直接将 PAR 转化为干物质,因此 PAR 比 LAI 能更可靠地估计森林生物量,是衡量森林总初级生产量和初级生产力的一个较好指标^[101,112]。关于 PAR 的推导、验证算法及其应用,美国学者 Myneni 曾有过详细介绍,与地面实测相比,PAR 的推演结果令人满意;全球和大区域尺度 PAR 的遥感估测主要包括气候模型法和遥感资料建模法,但其推导结果并不能令人满意,还需要更大范围的参与验证^[108,113]。

我国在这方面的研究起步较晚,20 世纪 90 年代后才有相关报道出现。薛亚东等^[114] 以 1998 年 Landsat TM,2003 年 Landsat ETM+和 2007 年 IRS-P6 卫星数据为信息源,研究认为 1998—2003 年广州城市森林 PAR 逐年增强,特别是阔叶林增加较快,而针叶林保持较稳定的状态;2003—2007 年广州市区、花都区、番禺 3 个区的林分 PAR 明显减弱,说明广州市在珠三角发展的带动下城市化进程加快,人为活动的影响越来越明显。陈利军等^[115] 以 1990 年每旬 8 km 分辨率 AVHRR 影像为数据源,利用植被净第一生产力与植物吸收光合有效辐射的函数关系,对中国每旬的陆地 NPP 进行估算,累加得出 1990 年我国陆地植被 NPP 总量为 $6.13 \times 10^9 \text{ t/a}$,最高值为 1812.9 g C/m^2 。

目前,国内外学者利用遥感数据反演推算森林植被参数的方法时,多采用经验、半经验的统计回归方法。这种方法虽然较为简单清晰,但易受光照条件、植被类型、下垫面等因素的影响,从而使遥感信息与森林植被参数间的相关关系变弱,普适性较差。

6 展望

在全球气候变化情境之下,海平面上升、极端气候事件频发、森林火灾与病虫害大面积爆发,森林健康风险与压力持续增长,森林健康已经成为生态学、林学、全球气候变化研究领域的热点问题。现阶段,森林健康遥感研究正处于各学科交叉、融合、调整,由静态向动态,单一向复杂,零散向系统转变的关键发展时期,机遇与挑战并存。结合国内外基于遥感研究的森林健康研究现状,针对其存在的问题与发展趋势,笔者认为在以下几个方面还需要进行更深入的拓展研究。

(1) 推进森林生态和遥感技术重大基础理论问题的研究。对“森林健康”问题的分析与研究,很大程度上依赖于人类对森林生态系统结构、功能与过程的认识。因此,必须加强对森林生态系统结构、过程、功能等森林生态重大基础理论问题的研究,特别强调自然因素和人类活动对森林生态系统的深刻影响,明确复杂多样的森林结构、过程、功能与遥感信息之间的耦合关系,提高遥感技术对森林结构、过程、功能的表达能力和支撑水平。在经典电磁波辐射传输理论和植被生态学理论的基础上,构建生物物理、化学机理模型,以及由遥感信息反演推算生物物理、化学参数的方法,突破传统经验、半经验统计回归研究方法易受光照条件、地形地貌、植被类型等因素影响的樊篱。同时,应加强模型反演及其结果的分析验证,以增强相关研究成果的精确度与可信度。

(2) 发展新型遥感技术,加强遥感数据解译技术研究。加强高光谱遥感、雷达遥感、多角度遥感、热红外

遥感和激光荧光遥感等新型遥感技术的研究。新型遥感技术在时空分辨率、光谱波段、价格等方面优势明显,可以较为全面的反映自然要素细微的光谱差异,弥补传统遥感技术在研究精度、角度、层次方面的缺陷与不足。着力发展和完善遥感数据解译的算法和软件,力争实现影像解译的标准化和自动化,减少遥感数据信息冗余,规避图像解译过程中的人为误差,提升图像解译的精确度与效率。此外,在重视遥感光谱信息的同时,要明确遥感数据纹理信息的重要性,在小波变化、分型理论和地统计学等理论的支持下,完善纹理信息的提取与分析,不断提高遥感数据的利用率。

(3) 提升森林健康遥感研究成果的科技转化水平。在基础理论和技术突破的基础上,遥感技术在森林健康研究领域的应用不能仅仅停留在监测统计数据的发布或个案分析的层面,要全面提升森林健康遥感研究的科技转化水平,构建森林资源(健康)管理评价系统与数据库系统,进一步推进基于遥感技术的森林健康快速分析、评价与辅助决策功能研究,实现森林健康遥感研究的定量化、精细化和系统化,为基层林业部门森林健康经营活动的开展、森林健康风险的预警预报和国家相关林业政策的制定提供有力的科技支撑^[116]。

References:

- [1] FAO. Global Forest Resources Assessment 2010: Main report. Rome: FAO, 2011: 65-80.
- [2] Tkacz B, Moody B, Castillo J, Fenn M. Forest health conditions in North America. *Environmental Pollution*, 2008, 155(3): 409-425.
- [3] Xiao F J, Ouyang H, Cheng S L, Zhang Q. Forest health ecological risk assessment in China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(2): 349-353.
- [4] USDA Forest Service. Remote sensing in forest health protection. Salt City: Fort Collins Co., 2000: 5-11.
- [5] Lin H, Tong X D, Huang Z Y. A review on remote sensing's application, puzzle and prospect in forestry. *Remote Sensing Information*, 2002, 4(1): 39-43, 51.
- [6] Rock B, Vogelmann D, Williams D, Vogelmann A, Hoshizaki. Remote detection of forest damage. *Bioscience*, 1986, 36(7): 439-445.
- [7] Wulder M. Optical remote-sensing techniques for the assessment of forest inventory and biophysical parameters. *Progress in Physical Geography*, 1998, 22(4): 449-476.
- [8] Campbell J. Introduction to remote sensing. The Guilford Press: New York, 2002.
- [9] Ni J S, Li Q, Cao X J. The theory and practice of remote sensing and geographic information system. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004: 7-12.
- [10] USDA Forest Service. Forest health through silviculture and integrated pest management — A strategic plan. Washington DC: USDA Forest Service publication, 1988:1.
- [11] Kolb T E, Wagner M R, Covington W W. Utilitarian and ecosystem perspectives Concepts of forest health. *Journal of Forestry*, 1994, 92(2): 10-15.
- [12] Abrams J, Kelly E, Shindler B, Wilton J. Value orientation and forest management: the forest health debate. *Environment Management*, 2005, 36(4): 495-505.
- [13] Sampson R N. Assessing forest ecosystem health in the inland west. New York: Food Products Press, 1999.
- [14] Zhao L P. Development and application of forest ecosystem health theory in forest ecological construction of China. *Journal of Nanjing Forestry University*, 2007, 31(1): 1-7.
- [15] Xing S H, Ji W Y, Guo N, Cui G F. Forest ecosystem health: Its research progress. *Chinese Journal of Ecology*. 2009, 28(10): 2102-2106.
- [16] Chen G, Dai L M, Ji L Z, Deng H B, Hao Z Q, Wang Q L. Assessing forest ecosystem health I. Model, method, and index system. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(10): 1743-1749.
- [17] Solberg S, Næsset E, Lange H, Bollandsås. Remote sensing of forest health. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Information Sciences*, 2004, 35(8): 161-166.
- [18] Chen G, Deng H B, Dai L M, Hao Z Q, Wang Q L. Assessing forest ecosystem health II. A case study. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(1): 1-6.
- [19] Chen G, Dai L M, Fan Z H, Wang Q L. On forest ecosystem health and its evaluation. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(5): 605-610.
- [20] Kong H M, Zhao J Z, Ji L Z, Lu Z H, Deng H B, Ma K M, Zhang P. Assessment method of ecosystem health. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(4): 486-490.

- [21] Boyd D, Danson F. Satellite remote sensing of forest resources-three decades of research development. *Progress in Physical Geography*, 2005, 29(1): 1-26.
- [22] Ge H L, Fang L M. The study on extraction and analysis of forest resources information remote sensing data. Beijing: Science Press, 2007: 3-4.
- [23] Li Y N, Zahng B L, Qin S Y, Li S Y, Huang X R. Review of research and application of forest canopy closure and its measuring methods. *World Forestry Research*, 2008, 21(1): 40-46.
- [24] Asner G P, Knapp D E, Broadbent E N, Oliveira P, Keller M, Silva J N. Selective logging in the Brazilian Amazon. *Science*, 2005, 310(5747): 480-482.
- [25] Broadbent E N, Asener G P, Keller M, Knapp D, Oliveira P, Silva J N. Forest fragmentation and edge effects from deforestation and selective logging in the Brazilian Amazon. *Biological Conservation*, 2008, 141(7): 1745-1757.
- [26] Mon, M S, Mizoue N, Htun N, Kajisa T, Yoshida S. Estimating forest canopy density of tropical mixed deciduous vegetation using Landsat data: a comparison of three classification approaches. *International Journal of Remote Sensing*, 2012, 33(4): 1042-1057.
- [27] Wang W, Qu J, Hao X, Liu Y, Stantrf J. Post-hurricane forest damage assessment using satellite remote sensing. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2010, 150(1): 122-132.
- [28] Zhao J A. Study of the Forest Area Statistic Based on the RS Technology[D]. Nanjing: Nanjing Agriculture University, 2007: 1-7.
- [29] Yang D, Feng Z K. RS statistics and analysis for forest coverage of Beijing. *Journal of Beijing Forestry University*, 2005, 27(S2): 133-138.
- [30] Xu J X, Xin Z B. Extracting the information of forest coverage from Normal Difference Vegetation Index data of Loess Plateau. *Science of Soil and Water Conservation*, 2010, 8(4): 7-12.
- [31] Trichon V, Julien M P. Tree species identification on large-scale aerial photographs in a tropical rain forest, French Guiana-application for management and conservation. *Forest Ecology and Management*, 2006, 225(1): 51-61.
- [32] Wulder M, White J, Niemann K, Nelson T. Comparison of airborne and satellite high spatial resolution data for the identification of individual trees with local maxima filtering. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, 25(11): 2225-2232.
- [33] Wang L H, Zhao Z Y, Yang Q. Classification method of deciduous-conifer mixed forest in Jilin Province based on GIS-TM remote sensing image. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(4): 577-582.
- [34] Zhang Z X. Remote Sensing Monitoring of Land Coverage in China. Beijing: Star Map Press, 2010: 34-47.
- [35] Thenkabail P, Enclona E, Ashton M, Legg C, De Dieu M. Hyperion, IKONOS, ALI, and ETM+ sensors in the study of African rainforests. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 90(1): 23-43.
- [36] Sun Q, Zheng X X, Liu D L. Overview on application of hyperspectral remote sensing to acquisition of investigation data of cutting areas. *Forest Resources Management*, 2006, 35(5): 92-96.
- [37] Martin E M, Newman D S, Aber D J, Congalton R G. Determining forest species composition using high spectral resolution remote sensing data. *Remote Sensing of Environment*, 1998, 65(3): 249-254.
- [38] Gong P, Pu R L, Yu B. Conifer species recognition with seasonal hyperspectral data. *Journal of Remote Sensing*, 1998, 2(3): 211-217.
- [39] McRoberts R, Tomppo E. Remote sensing support for national forest inventories. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 110(4): 412-419.
- [40] Li C G, Zhao X W, Li C G. Theory and realization of estimation forest stock volume by remote sensing. Beijing: Science Press, 2006: 1-9.
- [41] Hyypä J, Hyypä H, Inkinen M, Engdahl M, Linko S, Zhu Y. Accuracy comparison of various remote sensing data sources in the retrieval of forest stand attributes. *Forest Ecology and Management*, 2000, 128(1/2): 109-120.
- [42] Hall R J, Skakun R S, Arsenault E J, Case B S. Modeling forest stand structure attributes using Landsat ETM+ data: Application to mapping of aboveground biomass and stand volume. *Forest Ecology and Management*, 2006, 225(1): 378-390.
- [43] Zhao X W, Li C G, Si L, Tian Y L, Yuan K X. Important Progress in Estimating Forest Resources. *Engineering Science*, 2001, 3(8): 15-28.
- [44] Liu Z H, Chang Y, Chen H W. Estimation of forest volume in Huzhong forest area based on RS, GIS and ANN. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(9): 1891-1896.
- [45] Gu H Y, Dai L M, Wu G, Xu D, Wang S Z, Wang H. Estimation of forest volumes by integrating Landsat TM imagery and forest inventory data. *Science in China: Series E Technological Sciences*, 2006, 49(S1): 54-62.
- [46] Tokola T, Heikkilä J. Improving satellite based forest inventory by using a priori site quality information. *Silva Fennica*, 1997, 1(31): 67-78.
- [47] Gillis M. Canada's national forest inventory. *Environment Monitoring and Assessment*, 2001, 67(1/2): 121-129.
- [48] Smith W B. Forest inventory and analysis: a national inventory and monitoring program. *Environment Pollution*, 2002, 116(S1): 223-242.
- [49] Xiao X W, Yao C T, Chen X F, Song C Q, Zeng W S, Zhang T P. Main Points of Forest Resource Inventory in US and Guiding Suggestions. *Forest Resources Management*, 2005, 34(2): 27-33, 42.
- [50] Zeng W S. Discussion on Application of Remote Sensing in Forest Inventories. *Central South Forest Inventory and Planning*, 2004, 2(1): 47-49.
- [51] Chen X F, Zeng W S, Xiong Z B, Zhang M. New development of China National Forest Inventory (NFI)-On revision of NFI technical regulations.

- Forest Resources Management, 2004, 33(5): 40-45.
- [52] State Forestry Administration. Seventh national forest inventory results. (2010-01-28) [2011-05-04]. <http://www.forestry.gov.cn/>.
- [53] IPCC. Climate change: 2007 synthesis report. IPCC, Geneva, 2007: 11-50.
- [54] Ciesla W M. Describing signatures — a key to successful use of remote sensing for forest damage assessment. *Ambiência*, 2006, 2(1): 153-167.
- [55] Tan B X. Application of hyperspectral remote sensing in forestry. *World Forestry Research*, 2003, 16(2): 33-37.
- [56] Pu R L, Gong P. Hyperspectral remote sensing and its application. Beijing: Higher Education Press, 2000: 185-229.
- [57] Niu Z, Chen Y H, Sui H Z, Zhang Q Y, Zhao C J. Mechanism analysis of leaf biochemical concentration by high spectral remote sensing. *Journal of Remote Sensing*, 2000, 4(2): 125-130.
- [58] Cho M, Debba P. Potential utility of SumbandilaSat imagery for monitoring indigenous forest health// CSIR. Proceeding of Science real and relevant conference 2010. Pretoria: CSIR, 2010: 1-11.
- [59] Sampson P, Zarco-Tejada P, Mohammed G, Miller J, Noland T. Hyperspectral remote sensing of forest condition-Estimating chlorophyll content in tolerant hardwoods. *Forest Sciences*, 2003, 49(3): 381-391.
- [60] Li G S. The dependence of the remote sensing information on the chlorophyll of the conifer and its application. *Journal of Northeast Forestry University*, 1986, 14(3): 34-38.
- [61] Shi R H, Zhuang D F, Niu Z. Design and Implement of Satellite-Ground Synchronous Experiment for Biochemical Information Extraction Using Remote Sensing. *Journal of Natural Resources*, 2007, 22(4): 579-584.
- [62] Gao N. A Study on Retrieving Information of *Mycosphaerella Larici-leptolepis* Ito Etal Based on Remote Sensing [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2007: 65-68.
- [63] Yan C Y. Study on Methods and Models for Vegetation Biochemical Information Retrieval by Remote Sensing [D]. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2003: 3-5.
- [64] China National Development and Reform Commission. The China National Action Plan on Climate Change. (2007-06-04) [2011-05-15]. <http://www.gov.cn>.
- [65] Zhang L P, Zheng L F, Tong Q X. The estimation of vegetation variables based on high resolution spectra. *Journal of Remote Sensing*, 1997, 1(2): 111-114.
- [66] Myneni R B, Dong J, Tucker C J, Kaufmann R K, Kaippi P E, Liski J, Zhou L, Hughes M K. A large carbon sink in the woody biomass of Northern forests. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2001, 98(26): 14784-14789.
- [67] DeFries R S, Houghton R A, Hansen M C, Field C B, Skole D, Townshend J. Carbon emissions from tropical deforestation and regrowth based on satellite observations for the 1980s and 1990s. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2002, 99(22): 14256-14261.
- [68] Conard S, Sukhinin A, Stocks B, Cahoon D, Davidenko E, Ivanova G. Determining effects of area burned and fire severity on carbon cycling and emissions in Siberia. *Climate Change*, 2002, 55(1/2): 197-211.
- [69] FAO. State of the World's Forests 2011. Rome: FAO, 2011: 62.
- [70] Fang J Y, Guo Z D, Piao S L, Chen A P. Terrestrial vegetation carbon sinks in china, 1981—2000. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2007, 37(6): 804-812.
- [71] Piao S L, Fang J Y. Terrestrial net primary production and its spatio-temporal patterns in Qinghai-Xizang Plateau, China during 1982—1999. *Journal of Natural Resources*, 2002, 17(5): 373-380.
- [72] Fang J Y, Chen A P, Peng C H, Zhao S Q, Ci L J. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998. *Science*, 2001, 292(5525): 2320-2322.
- [73] Fang J Y, Chen A P, Zhao S Q, Ci L J. Estimating Biomass Carbon of China's forests; Supplementary Notes on report published in *Science* (291: 2320-2322) by Fang et al. (2001). *Acta Phytocologica Sinica*, 2002, 26(2): 243-249.
- [74] Justice C, Giglio L, Roy D, Boschetti L, Csiszar I, Davies D, Korontzi S, Schroeder W, O'Neal K, Morissette J. MODIS-Derived global fire products// Ramachandran B, Justice C, Abrams M. Land remote sensing and global environment change-NASA's Earth Observing System and the ASTER and MODIS. New York: Springer, 2011: 661-681.
- [75] Saatchi S, Halligan K, Despain D, Crabtree R. Estimation of forest fuel load from radar remote sensing. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(6): 1726-1740.
- [76] Wang Y M, Shu L F, Zhao F J, Wang Q H, Yan H, Dai X A, Tian X R. Quantity analysis of forest fuel under the impacts of snow damage in South of China- case study in Hunan Province. *Scientia Silvae Sinicae*, 2009, 44(11): 69-74.
- [77] Tian X R, Dai X A, Wang Y M, Shu L F, Gao C D. Study on the fuel types classification of forests in Beijing. *Scientia Silvae Sinicae*, 2006, 4(11): 76-80.

- [78] Guo Z H, Xiao W F, Zhang Z, Chen C H, Zhao X W. Utilization of remote sensing for detecting forest damage caused by insect infestation or diseases. *Journal of Natural Disasters*. 2003, 12(4): 73-81.
- [79] An S J. The Research on Predictive Model of *Bursaphelenchus Xylophilus* by RS and GIS[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2006: 1-12.
- [80] Spruce J, Sader S, Ryan R, Smoot J, Kuper P, Ross K, Prados D, Russell J, Gasser G, McKellip R, Hargrove W. Assessment of MODIS NDVI time series data products for detecting forest defoliation by gypsy moth outbreaks. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(2): 427-437.
- [81] Ismail. Remote sensing of forest health-the detection and mapping of *Pinus patula* trees infested by *Sirex noctilio*[D]. Pietermaritzburg: University of KwaZulu-Natal, 2008: 13-91.
- [82] Coops N, Waring R, Wulder M, White J. Prediction and assessment of bark beetle-induced mortality of lodgepole pine using estimates of stand vigor derived from remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(5): 1058-1066.
- [83] Yang C J, Chen D Q, Wei Y M. Application of remote sensing and GIS in monitoring and management of forest disease and insect damage. *Journal of Catastrophology*, 1999, 14(1): 6-10.
- [84] Wu H G. Application of satellite remote sensing technology in the assessment of forest damage. *World Forest Research*, 1995, 8(2): 24-28.
- [85] Wu H G, Shi J. Monitoring technique of pine caterpillars with TM image. *Journal of Remote Sensing*, 2004, 8(2): 172-177.
- [86] Li M Y, Jian L R, Liu L. Potential Suitability Assessment of Invasive Alien Species to the Scenic Forests in Zijin Mountain. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2007, 27(1): 99-104.
- [87] Wang Z. Dynamic Monitoring of Forest Ecosystem with Remote Sensing Technology after *Bursaphelenchus Xylophilus* Invasion[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2007: 61-63.
- [88] Gao Z X, Ji R, Xu R M, Xie M Y, Li D M. Biological invasions: process, mechanism and prediction. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(3): 559-570.
- [89] Chen H, Chen L J. Predicting the Potential Distribution of Invasive Exotic Species Using GIS and Remote Sensing. *Journal of Remote Sensing*, 2007, 11(3): 426-432.
- [90] Joshi C, de Leeuw J, van Duren I. Remote sensing and GIS applications for mapping and spatial modelling of invasive species// ISPRS. Proceedings of the XXth ISPRS Congress: Geo-imagery bridging continents. Istanbul: ISPRS Xplore, 2004: 669-677.
- [91] May C, Neale C, Henderson N. Mapping riparian resources in semiarid watersheds using airborne multispectral imagery. New Mexico: IAHS Publication, 2001: 539-541.
- [92] Müllerová J, Pešek P, Jarošík V, Pergl J. Aerial photographs as a tool for assessing the regional dynamics of the invasive plant species *Heracleum mantegazzianum*. *Journal of Applied Ecology*, 2005, 42(6): 1042-1053.
- [93] Asner G, Knapp D, Kennedy-Bowdoin T, Jones M, Martin R, Boardman J, Hughes R. Invasive species detection in Hawaiian rainforests using airborne imaging spectroscopy and LiDAR. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(5): 1942-1955.
- [94] Schnase J, Stohlgren T, Smith J. The National Invasive Species Forecasting System: A strategic NASA/USGS partnership to manage biological invasions. *Earth Observing Magazine*, 2002, 11(5): 46-49.
- [95] Jonas A. Remote sensing of forest decline in the Czech Republic[D]. Sweden: Lund University, 1998: 5.
- [96] Diem J. Remote assessment of forest health in southern Arizona, USA-Evidence for ozone-induced foliar injury. *Environment Management*, 2002, 29(3): 373-384.
- [97] Wang B. Using Hyperspectral Data to Detect the Influence of Acid Rain Stress on the Needle's Reflectance of Masson Pine[D]. Chongqing: Southwest University, 2007: 7-30.
- [98] Wang L. Remote Sensing Monitoring of Insect Pests in Larch Forest Based on Physical Mode[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2009: 1-10.
- [99] Turner W, Spector S, Gardiner N, Fladeland M, Sterling E, Steininger M. Remote sensing for biodiversity science and conservation. *Trends in Ecology and Evolution*, 2003, 18(6): 306-313.
- [100] Kerr J, Ostrovsky M. From space to species-ecological applications for remote sensing. *Trends in Ecology and Evolution*, 2003, 18(6): 299-305.
- [101] Fang H L, Tian Q J. A review of hyperspectral remote sensing in vegetation monitoring. *Remote Sensing Technology and Application*, 1998, 13(1): 62-69.
- [102] Hoffman F, Mills R, Kumar J, Vulli S, Hargrove W. Geospatiotemporal data mining in an early warning system for forest threats in the United States. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Society. 2010 IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium Proceedings*. Honolulu: IEEE Xplore, 2010: 170-173.
- [103] Satyanarayana B, Mohamad K, Idris I, Husain M, Dahdouh-Guebas F. Assessment of mangrove vegetation based on remote sensing and ground-truth measurements at Tumpat, Kelantan Delta, East Coast of Peninsular Malaysia. *International Journal of Remote Sensing*, 2011, 32(6): 1635-

1650.

- [104] Piao S L, Fang J Y. Seasonal changes in vegetation activity in response to climate changes in China between 1982 and 1999. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(1):119-125.
- [105] Fang J Y, Piao S L, He J S, Ma W H. Activity of vegetation in China has been augmented in recent 20 years. *Science in China Series C: Biological Sciences*, 2003, 33(6):554-565.
- [106] Huete A R. A soil-adjusted vegetation index(SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 1988, 25(3):295-309.
- [107] Wu B F, Zeng Y, Huang J L. Overview of LAI/FPAR retrieval from remotely sensed data. *Advance in Earth Sciences*, 2004, 19(4):585-590.
- [108] Chen X F, An S Q, Chen J M, Liu Y H, Xu C, Yang H B. A review on forest ecosystem biophysical parameter retrieval from remotely sensed data. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(9):1074-1079.
- [109] Spanner M, Pierce L, Peterson D, Running S. Remote sensing of temperate coniferous forest leaf area index The influence of canopy closure, understory vegetation and background reflectance. *International Journal of Remote Sensing*, 1990, 11(1):95-111.
- [110] Hui F M, Tian Q J, Jian Z Y. Research and Quantitative Analysis of the Correlation between Vegetation Index and Leaf Area Index. *Remote Sensing Information*, 2003, 18(2):10-13.
- [111] Xi J C, Zhao H Q, Zhang Z Q. Retrieving effective leaf area index of conifer forests using Landsat TM images. *Journal of Beijing Forestry University*, 2004, 26(6):36-39.
- [112] Turner D P, Urbanski S, Bremer D, Wofsy S, Meyers T, Gower S, Gregory M. Across-biome comparison of daily light use efficiency for gross primary production. *Global Change Biology*, 2003, 9(3):383-395.
- [113] Myneni R, Hoffman S, Knyazikhin Y, Privette J, Glassy J, Tian Y, Wang Y, Song X, Zhang Y, Smith G, Lotsch A, Friedl M, Morissette J, Votava P, Nemani R, Running S. Global products of vegetation leaf area and fraction absorbed PAR from year one of MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 83(1/2):214-231.
- [114] Xue Y D, Yang Y Q. RS-based Analysis on Guangzhou Forest Stand PAR. *Forest resources Management*, 2010, 39(3):115-119.
- [115] Chen L J, Liu G H, Li H G. Estimating Net Primary Productivity of Terrestrial Vegetation in China Using Remote Sensing. *Journal of Remote Sensing*, 2002, 6(2):129-135.
- [116] Wei S A, Xiao Z H, Huang P. The study of forest resources and year-on-year ecological condition monitoring based on "3S". Beijing: Chinese Forestry Press, 2010:276-279.

参考文献:

- [3] 肖风劲, 欧阳华, 程淑兰, 张强. 中国森林健康生态风险评价. *应用生态学报*, 2004, 15(2):349-353.
- [5] 林辉, 童显德, 黄忠义. 遥感技术在我国林业中的应用与展望. *遥感信息*, 2002, 4(1):39-43, 51.
- [9] 倪金生, 李琦, 曹学军. 遥感与地理信息系统基本理论和实践. 北京: 电子工业出版社, 2004:7-12.
- [14] 赵良平. 森林生态系统健康理论的形成与实践. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2007, 31(3):1-7.
- [15] 邢韶华, 姬文元, 郭宁, 崔国发. 森林生态系统健康研究进展. *生态学杂志*, 2009, 28(10):2102-2106.
- [16] 陈高, 代力民, 姬兰柱, 邓红兵, 郝占庆, 王庆礼. 森林生态系统健康评估 I. 模式、计算方法和指标体系. *应用生态学报*, 2004, 15(10):1743-1749.
- [18] 陈高, 邓红兵, 代力民, 郝占庆, 王庆礼. 森林生态系统健康评估 II. 案例实践. *应用生态学报*, 2005, 16(1):1-6.
- [19] 陈高, 代力民, 范竹华, 王庆礼. 森林生态系统健康及其评估监测. *应用生态学报*, 2002, 13(5):605-610.
- [20] 孔红梅, 赵景柱, 姬兰柱, 陆兆华, 邓红兵, 马克明, 张萍. 生态系统健康评价方法初探. *应用生态学报*, 2002, 13(4):486-490.
- [22] 葛宏立, 方陆明. 遥感图像森林资源信息提取与分析研究. 北京: 科学出版社, 2007:3-4.
- [23] 李永宁, 张宾兰, 秦淑英, 李帅英, 黄选瑞. 郁闭度及其测定方法的研究与应用. *世界林业研究*, 2008, 21(1):40-46.
- [28] 赵君爱. 基于 RS 技术的森林面积统计方法的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2007:1-7.
- [29] 杨丹, 冯仲科. 北京市森林覆盖率遥感统计及其分析. *北京林业大学学报*, 2005, 27(S2):133-138.
- [30] 许炯心, 信忠保. 从黄土高原植被指数数据中提取森林覆盖率信息. *中国水土保持科学*, 2010, 8(4):7-12.
- [33] 王立海, 赵正勇, 杨旗. 利用 GIS 对吉林针阔混交林 TM 遥感图像分类方法的初探. *应用生态学报*, 2006, 17(4):577-582.
- [34] 张增祥. 中国土地覆盖遥感监测. 北京: 星球地图出版社. 2010:34-47.
- [36] 孙琦, 郑小贤, 刘东兰. 高光谱遥感获取伐区调查数据的应用综述. *林业资源管理*, 2006, 35(5):92-96.
- [38] 宫鹏, 浦瑞良, 郁彬. 不同季相针叶树种高光谱数据识别分析. *遥感学报*, 1998, 2(3):211-217.
- [40] 李崇贵, 赵宪文, 李春干. 森林蓄积量遥感估测理论与实现. 北京: 科学出版社, 2006:1-9.
- [43] 赵宪文, 李崇贵, 斯林, 田永林, 袁凯先. 森林资源遥感估测的重要进展. *中国工程科学*, 2001, 3(8):15-28.
- [44] 刘志华, 常禹, 陈宏伟. 基于遥感、地理信息系统和人工神经网络的呼中林区森林蓄积量估测. *应用生态学报*, 2008, 19(9):

1891-1896.

- [49] 肖兴威, 姚昌恬, 陈雪峰, 宋常青, 曾伟生, 张铁平. 美国森林资源清查的基本做法和启示. 林业资源管理, 2005, 34(2): 27-33, 42.
- [50] 曾伟生. 遥感技术在森林资源清查中的应用问题探讨. 中南林业调查规划, 2004, 2(1): 47-49.
- [51] 陈雪峰, 曾伟生, 熊泽彬, 张敏. 国家森林资源连续清查的新进展——关于国家森林资源连续清查技术规定的修订. 林业资源管理, 2004, 33(5): 40-45.
- [52] 国家林业局. 第七次全国森林资源清查结果. (2010-01-28) [2011-05-04]. <http://www.forestry.gov.cn/>.
- [55] 谭炳香. 高光谱遥感森林应用研究探讨. 世界林业研究, 2003, 16(2): 33-37.
- [56] 蒲瑞良, 宫鹏. 高光谱遥感及其应用. 北京: 高等教育出版社, 2000: 185-229.
- [57] 牛铮, 陈永华, 隋洪智, 张庆员, 赵春江. 叶片化学组分成像光谱遥感探测机理分析. 遥感学报, 2000, 4(2): 125-130.
- [60] 李古生. 遥感信息与针叶树叶绿素含量的相关及其应用. 东北林业大学学报, 1986, 14(3): 34-38.
- [61] 施润和, 庄大方, 牛铮, 等. 植被生化信息遥感提取的星地同步试验设计与实施. 自然资源学报, 2007, 22(4): 579-584.
- [62] 高娜. 基于遥感的落叶松早落病信息提取研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2007: 65-68.
- [63] 颜春燕. 遥感提取植被生化组分信息方法与模型研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(遥感应用研究所), 2003: 3-5.
- [64] 中国国家发展和改革委员会. 中国应对气候变化国家方案. (2007-06-04) [2011-05-15]. <http://www.gov.cn>.
- [65] 张良培, 郑兰芬, 童庆禧. 利用高光谱对生物变量进行估计. 遥感学报, 1997, 1(2): 111-114.
- [70] 方精云, 郭兆迪, 朴世龙, 陈安平. 1981—2000 年中国陆地植被碳汇的估算. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2007, 37(6): 804-812.
- [71] 朴世龙, 方精云. 1982—1999 年青藏高原植被净第一性生产力及其时空变化. 自然资源学报, 2002, 17(5): 373-380.
- [73] 方精云, 陈安平, 赵淑清, 慈龙骏. 中国森林生物量的估算: 对 Fang 等 Science 一文(Science, 2001, 291: 2320—2322)的若干说明. 植物生态学报, 2002, 26(2): 243-249.
- [76] 王玉明, 舒立福, 赵凤君, 王秋华, 阎厚, 戴兴安, 田晓瑞. 中国南方冰雪灾害对森林可燃物影响的数量化分析——以湖南为例. 林业科学, 2009, 44(11): 69-74.
- [77] 田晓瑞, 戴兴安, 王明玉, 舒立福, 高成德. 北京市森林可燃物分类研究. 林业科学, 2006, 4(11): 76-80.
- [78] 郭志华, 肖文发, 张真, 陈昌洁, 赵宪文. RS 在森林病虫害检测研究中的应用. 自然灾害学报, 2003, 12(4): 73-81.
- [79] 安树杰. 应用遥感与 GIS 的松材线虫病预测模型的研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2006: 1-12.
- [83] 杨存建, 陈德清, 魏一鸣. 遥感和 GIS 在森林病虫害监测管理中的应用模式. 灾害学, 1999, 14(1): 6-10.
- [84] 武红敢. 卫星遥感技术在森林病虫害监测中的应用. 世界林业研究, 1995, 8(2): 24-28.
- [85] 武红敢, 石进. 松毛虫灾害的 TM 影像监测技术. 遥感学报, 2004, 8(2): 172-177.
- [86] 李明阳, 营利荣, 刘礼. 紫金山风景林外来入侵物种潜在适生性评价. 中南林业科技大学学报(自然科学版), 2007, 27(1): 99-104.
- [87] 王震. 松材线虫入侵后森林生态系统的遥感动态监测[D]. 北京: 北京林业大学, 2007: 61-63.
- [88] 高增祥, 季荣, 徐汝梅, 谢宝瑜, 李典谟. 外来种入侵的过程、机理和预测. 生态学报, 2003, 23(3): 559-570.
- [89] 陈浩, 陈利军. 利用遥感和 GIS 的方法预测外来入侵物种的潜在分布. 遥感学报, 2007, 11(3): 426-432.
- [97] 王博. 利用高光谱数据监测酸雨胁迫对马尾松针叶光谱特征的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2007: 7-30.
- [98] 王蕾. 基于物理模型的落叶松林虫害遥感监测[D]. 北京: 北京林业大学, 2009: 1-10.
- [101] 方红亮, 田庆久. 高光谱遥感在植被监测中的研究综述. 遥感技术与应用, 1998, 13(1): 62-69.
- [104] 朴世龙, 方精云. 1982—1999 年我国陆地植被活动对气候变化响应的季节差异. 地理学报, 2003, 58(1): 119-125.
- [105] 方精云, 朴世龙, 贺金生, 马文红. 近 20 年来中国植被活动在增强. 中国科学 C 辑: 生物科学, 2003, 33(6): 554-565.
- [107] 吴炳方, 曾源, 黄进良. 遥感提取植物生理参数 LAI/FPAR 的研究进展与应用. 地球科学进展, 2004, 19(4): 585-590.
- [108] 陈新芳, 安树青, 陈镜明, 刘玉虹, 徐驰, 杨海波. 森林生态系统生物物理参数遥感反演研究进展. 生态学杂志, 2005, 24(9): 1074-1079.
- [110] 惠凤鸣, 田庆久, 金震宇, 等. 植被指数与叶面积指数关系研究及量化分析. 遥感信息, 2003, 18(2): 10-13.
- [111] 席建超, 张红旗, 张志强. 应用遥感数据反演针叶林有效叶面积指数. 北京林业大学学报, 2004, 26(6): 36-39.
- [114] 薛亚东, 杨燕琼. 基于遥感的广州市林分光合有效辐射分析研究. 林业资源管理, 2010, 39(3): 115-119.
- [115] 陈利军, 刘高焕, 励惠国. 中国植被净第一性生产力遥感动态监测. 遥感学报, 2002, 6(2): 129-135.
- [116] 魏世安, 肖智慧, 黄平. 基于“3S”的森林资源与生态状况年度检测技术研究. 北京: 中国林业出版社, 2010: 276-279.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 33, No. 6 March, 2013 (Semimonthly)

CONTENTS

Review and Monograph

- Forest health studies based on remote sensing: a review GAO Guanglei, XIN Zhongbao, DING Guodong, et al (1675)
- Progress of agent-based agricultural land change modeling: a review YU Qiangyi, WU Wenbin, YANG Peng, et al (1690)

Autecology & Fundamentals

- Dynamic distribution of *Nemopilema nomurai* in inshore waters of the northern Liaodong Bay, Bohai Sea WANG Bin, QIN Yubo, DONG Jing, et al (1701)
- Full length cDNA cloning and tissue expression of prophenoloxidase from *Oratosquilla oratoria* LIU Haiying, LIU Lianwei, JIANG Yusheng, et al (1713)
- Morphometrics investigation of the skulls, mandibles and molar in *Tupaia belangeri* from Yunnan, Guizhou, Guangxi ZHU Wanlong, JIA Ting, HUANG Chunmei, et al (1721)
- Effects of litter thickness on leaf litter decomposition and enzyme activity of three trees in the subtropical forests JI Xiaoyan, JIANG Hong, HONG Jianghua, et al (1731)
- The photosynthetic carbon fixation characteristics of common tree species in northern Zhejiang ZHANG Jiao, SHI Yongjun, ZHU Yueqing, et al (1740)
- Diurnal changes in the photosynthetic characteristics of two high yield and high quality grasses during different stages of growth and their response to changes in light intensity GUO Chunyan, LI Jinchuan, YUE Jianying, et al (1751)
- Evaluation technology on drought disaster to yields of winter wheat based on WOFOST crop growth model ZHANG Jianping, ZHAO Yanxia, WANG Chunyi, et al (1762)
- Genetic diversity of *Conocephalus maculatus* of different geographic populations based on mitochondrial DNA control region analysis ZHOU Zhijun, SHANG Na, LIU Jing, et al (1770)
- Relationships among female body size, clutch size, and egg size in captive *Deinagkistrodon acutus* HU Minghang, TAN Qunying, YANG Daode (1778)
- The field control of *Bactrocera dorsalis* (Hendel) with parasitoid and sterile male ZHENG Sining, HUANG Juchang, YE Guanglu, et al (1784)
- Allelopathic effects of artemisinin on ectomycorrhizal fungi LI Qian, YUAN Ling, WANG Mingxia, et al (1791)

Population, Community and Ecosystem

- Establishment of integrated methodology for bay ecosystem health assessment and its application in Daya Bay LI Chunhou, LIN Lin, XU Shannan, et al (1798)
- The influence of upwelling and water mass on the ecological group distribution of zooplankton in Zhejiang coastal waters SUN Lufeng, KE Chang, XU Zhaoli, et al (1811)
- Identification of key ecosystem for ecological restoration in semi-arid areas: a case study in Helin County, Inner Mongolia PENG Yu, GAO Ying, FENG Jinzhao, et al (1822)
- The great rainfall effect on soil respiration of *Pinus tabulaeformis* plantation in Taiyue Mountain JIN Guanyi, ZHAO Xiuhai, KANG Fengfeng, et al (1832)
- The litter-fall characteristics and their response to drought stress in the Masson pins forests damaged by acid rain at Chongqing, China WANG Yihao, WANG Yanhui, YU Pengtao, et al (1842)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Thermal environment effect of urban water landscape YUE Wenze, XU Lihua (1852)
- Landscape ecological security pattern associated with the introduction of exotic tree species *Eucalyptus* ZHAO Xiaoqing, HE Chunlan (1860)
- Ecological balance between supply and demand in Chongqing City based on cultivated land ecological footprint method SHI Kaifang, DIAO Chengtai, SUN Xiufeng, et al (1872)
- Effect of elevated CO₂ on methanotrophs in the rhizosphere of rice plant YAN Chen, XU Jing, ZHONG Wenhui, et al (1881)

Resource and Industrial Ecology

- The seawater environment quality evaluation research base on variable fuzzy pattern recognition model KE Lina, WANG Quanming, SUN Xinguo, et al (1889)
- An *in situ* study on biodeposition of ascidian (*Styela plicata*) in a subtropical aquaculture bay, southern China YAN Jiaguo, QI Zhanhui, TIAN Ziyang, et al (1900)
- Distribution of soil NPK nutrient content in deep soil profile of typical apple orchards on the Loess Plateau ZHANG Lina, LI Jun, FAN Peng, et al (1907)
- Soil respiration and its responses to soil moisture and temperature under different tillage systems in dryland maize fields ZHANG Dingchen, CAI Dianxiong, DAI Kuai, et al (1916)
- Photosynthetic characteristics of soybean and salvia in an agroforestry system in the Hilly Region, Shangluo, China PENG Xiaobang, ZHANG Shuoxin (1926)
- Regulation of exogenous brassinosteroid on growth and photosynthesis of *Helianthus tuberosus* seedlings and cadmium biological enrichment under cadmium stress GAO Huiling, LIU Jinlong, ZHENG Qingsong, et al (1935)
- Calibration coefficients of Granier original formula based on sap flow of *Platycladus orientalis* LIU Qingxin, MENG Ping, ZHANG Jinsong, et al (1944)

Research Notes

- An evaluation index system classifying the conservation value of wetland nature reserves based on AHP SUN Rui, CUI Guofa, LEI Ting, et al (1952)
- Root biomass and its distribution of *Azadirachta indica* and *Acacia auriculiformis* plantations in the Dry-hot Valley GAO Chengjie, TANG Guoyong, LI Kun, et al (1964)
- Physiological response of *Vitex trifolia* to sand burial in the sand coast ... ZHOU Ruilian, WANG Jin, YANG Shuqin, et al (1973)
- Soil fertility under different forest types in the Helan and Liupan Mountain ranges of Ningxia Province JIANG Lin, GENG Zengchao, ZHANG Wen, et al (1982)

Opinions

- Dynamic of litterfall in ten typical community types of Xiaoxing'an Mountain, China HOU Lingling, MAO Zijun, SUN Tao, et al (1994)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索自然奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 33 卷 第 6 期 (2013 年 3 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 6 (March, 2013)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元