

遥感在森林精准培育中的应用现状与展望

周凯, 曹林

南京林业大学 南方现代林业协同创新中心, 南京 210037

摘要: 随着社会经济快速发展及人口增长, 中国木材供需矛盾突出, 对外依存度高。面对有限的土地资源, 迫切需要更为高效、高质量地培育森林资源, 在定向培育和集约经营等的各个环节实现培育技术精准化。现代遥感技术所构建的多平台、多角度、多模式立体观测体系及定量分析方法是森林精准培育的关键技术。以遥感技术为核心所构建的从土壤类型分析、土地适应性评价、生态环境模拟到林木育种、灌溉施肥、林木长势监测、病虫害防治等一体化、精准化的森林精准培育新体系, 将全面支撑现代林业的整体提质增效和森林质量精准提升。本文首先介绍了RGB相机、多光谱、高光谱、激光雷达、热红外和荧光传感器在森林精准培育中应用现状, 并对其应用特点及测量指标进行了综合比较; 然后, 重点介绍了遥感在林木良种选育、营养胁迫监测诊断及水肥精准喷灌以及森林病虫害防治与健康评估这3个森林精准培育重要方向上的应用, 并分析了各应用方向的共性需求; 最后, 从3个方面, 即多源遥感信息融合, 人工智能、物联网及3S技术集成, 以及遥感数据与生理生态模型和辐射传输模型等的集成应用, 分析了未来遥感技术在森林精准培育中的发展趋势及应用前景。

关键词: 森林精准培育, 遥感, 表型, 森林培育, 林木遗传育种, 森林健康

引用格式: 周凯, 曹林. 2021. 遥感在森林精准培育中的应用现状与展望. 遥感学报, 25(1): 423-438

Zhou K and Cao L. 2021. The status and prospects of remote sensing applications in precision silviculture. National Remote Sensing Bulletin, 25(1): 423-438 [DOI: 10.11834/jrs.20210506]

1 引言

近年来, 中国天然林面积和蓄积持续双增长。目前, 人工林面积已居世界首位, 是全球林产品生产第一大国 (梅梦媛和雷一东, 2019)。然而, 由于历史上的长期过度采伐, 中国天然林资源仍然存在数量较少、质量不高等问题; 同时, 随着社会经济快速发展和人口不断增长, 中国木材供需矛盾突出, 且对外依存度高。面对中国有限的土地资源, 须在充分利用有限环境、森林和人力资源等的前提下更为高效地培育森林资源。同时, 面向国家木材安全、生态安全和绿色发展等重大战略需求, 也迫切地需要提升森林资源的供给能力并揭示森林培育的科学基础。森林培育是森林从林木种子、苗木、造林到林木成林、成熟的整个培育过程中所进行的主要生产环节及各项调控措施, 其对象为人工林和天然林 (张鹏等, 2008)。为了更为高效、高质量的培育森林, 迫切

需要在人工林定向培育、集约经营以及天然林抚育等的各个环节实现培育技术的精准化, 从而对森林生长进行实时、精确的计量和监测, 获取森林生长的空间结构和时空异质性, 并采取优化的空间结构调整方法实现集约管理和可持续经营。

森林资源培育和科学化管理水平全面提升离不开智能化、精准、高效的森林资源培育与监测技术 (李世东, 2016)。通过遥感、物联网、大数据等现代信息技术构建从土壤类型分析、土地适应性评价、生态环境模拟到林木育种、灌溉施肥、林木长势监测、病虫害防治等一体化、精准化的森林培育新体系, 将全面支撑现代林业的整体提质增效和森林质量精准提升。

森林精准培育以非接触或接触式的传感器监测技术为主要手段, 而现代遥感技术所构建的多平台、多角度、多模式立体观测体系及定量数据分析方法则是其关键核心。随着激光雷达、高光

收稿日期: 2020-11-09; 预印本: 2020-12-09

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 31922055, 31770590)

第一作者简介: 周凯, 1990年生, 男, 讲师, 研究方向为森林精准培育信息化。E-mail: kaizhou@njfu.edu.cn

通信作者简介: 曹林, 1983年生, 男, 教授, 研究方向为森林资源遥感监测、森林精准培育。E-mail: lincao@njfu.edu.cn

谱、荧光成像仪等各类遥感传感器以及无人机平台等的快速发展,通过将主被动遥感与植被结构和光谱综合分析及人工智能等方法相结合,可实现森林环境、土壤及结构和生理等关键森林培育参量的精准获取,从而为森林生长状况监测诊断和林木优良品种选育提供重要的支撑;有助于明确不同培育条件下森林信息特征与生长指标之间的关系,建立森林光谱数据库和生长指标适宜动态数据库,构建森林生长指标适宜动态及实时诊断模型;从而快速准确监测森林主要生长指标,实时诊断森林的营养亏缺或病虫害受损状况,指导适时的森林精准管理与调控。同时,遥感技术的发展,也为快速准确获取高精度、高质量的林木表型信息提供了新的途径,从单木到林分尺度追踪林木基因的表现,进而实现数量性状位点的准确定位和目的基因的鉴定,并可最终应用于林

木良种选育(边黎明和张慧春,2020)。可见,遥感技术将与森林精准培育业务深度融合,有力推动人工林资源的高效培育、集约管理和可持续经营,有助于更透彻地掌握森林生长机理,从而实现森林培育、集约管理和森林质量的精准提升。

2 遥感在森林精准培育中应用现状

精确定量估算林木在不同生长阶段树高、冠幅、叶面积指数、蓄积量和生物量等生长结构信息,以及氮磷钾和水分状况等生理生化信息,对使用遥感手段在森林精准培育的应用至关重要。目前遥感手段解析森林精准培育信息采用的传感器主要为RGB数码相机、多光谱传感器、高光谱传感器、激光雷达、热红外传感器和荧光传感器等(表1)。

表1 森林精准培育常用遥感传感器类型

Table 1 A summary of commonly used remote sensors in precision silviculture

传感器对比	RGB数码相机	多光谱传感器	高光谱传感器	激光雷达	热红外传感器	荧光传感器
主要测量指标	叶色、胸径、树高、密度、冠幅、材积、覆盖度等	生物量、氮素状况、色素状况、水分状况等	生物量、色素状况、氮素状况、水分状况、光合速率等	树高、材积、生物量、叶倾角、叶面积指数等	冠层温度、水分状况、净同化速率、气孔导度等	光合状况、生产力、色素状况、氮素状况
优势	成本低、机动性强、直观便捷、高空间分辨率	成本低、机动灵活、受天气影响小	高光谱分辨率、可间接观测结构参数和理化指标、图谱合一特性	可提供三维数据、高精度获取垂直和水平森林结构参数	快速获取冠层温度,实现林木在胁迫条件下的长势判定	可探测林木光合状况和健康状况
不足	易受光照环境影响、像幅较小	需辐射校正和几何校正、光谱分辨率低、波段较少	需辐射校正和几何校正、高光谱数据预处理较为复杂	成本较高、数据处理量较大、难以用于生理生化参数分析	易受天气环境、时间、光照、土壤的影响;需频繁的校准	视场小、可探测波段范围较窄

2.1 RGB数码相机

RGB数码相机是应用广泛的高精度可见光成像传感器,具有低成本、操作简便、非破坏性等优点,可用于林木叶片叶绿素等生化参数估测(Santos等,2018;李文涛等,2018;王诣和闫志勇,2016;易时来等,2011)、氮素营养状况监测诊断(陈凤等,2014;刘连忠等,2019;赵静等,2011)、病虫害状况识别(Mutka和Bart,2015;曹乐平,2015)、苗木树高和绿色覆盖率等早期表型性状信息提取(Chéné等,2012;Montagnoli等,2016)。然而,这类直接使用RGB数码相机的近端距离测试,一般仅适用于单叶、果实、或苗木和灌木等低矮林木冠层生长状况的监测(刘连忠等,2019)。

近年来,随着无人机等近地遥感平台的发展,通过无人机搭载RGB数码相机逐渐应用于森林精准培育研究。该方式可实现林木冠层高清图像的快速采集,显著提高影像采集的效率,具有低成本、机动灵活、可云下低空飞行、对光照环境要求相对较低等特点,并可提供林木的二维和三维成像数据,主要用于监测树高、密度、冠幅、覆盖度、材积等森林冠层结构参数(Goodbody等,2017;Mu等,2018;Zarco-Tejada等,2014;王枚梅等,2017)。

RGB数码相机为森林精准培育研究提供了一种操作简单、低成本、普及率高的观测方式。通过结合无人机数字摄影测量技术,为获取树高、密度、冠幅、覆盖度、材积等森林结构参数提供了高效和可靠的方法。无人机搭载RGB数码相机

显著地提升了获取林木冠层高清影像的效率, 但该方式也常受限于续航时间, 获取的信息多来自于森林冠层的中上部, 且需要进行合理的曝光设定, 以减轻云的遮挡和环境光线的变化引起的图像曝光不足或过度等(刘建刚等, 2016)。

2.2 多光谱传感器

植被对电磁波谱的吸收、透射和反射等光谱信息, 可被用于估测生物量、水分含量、叶绿素含量等植被生理生化参数等(Berni等, 2009)。常见的多光谱传感器包括主动式非成像和被动式成像两种类型, 主要具有蓝光、绿光、红光、红边和近红外波段光谱通道, 少量多光谱传感器还具备短波红外通道(Cheng等, 2013)。

主动式非成像多光谱传感器主要搭载于近地面遥感平台, 具有时间灵活性高、不受天气光照影响等优点, 目前已广泛应用于田块尺度的作物生长状况监测(Cao等, 2013; Li等, 2018), 但在木本植物生长监测方面仍不多见(Mishra等, 2011)。此外, SPAD叶绿素仪、MutispeQ等手持叶夹式非成像多光谱传感器, 仅适用于于单叶尺度林木叶绿素、氮素营养状况的评估(Choi等, 2011; Kuhlert等, 2016; 杨亦扬等, 2008; 周济等, 2018)。星载被动式多光谱成像是林业中主要使用的成像多光谱传感器类型, 通过使用光谱指数(如NDVI、NDRE等)、纹理指数(Dube和Mutanga, 2015; 李明诗等, 2006)等, 可有效地探测森林生物量(Zhu和Liu, 2014; 郭云等, 2015)、蓄积量等结构参数(王佳等, 2015)。

近年来, 由于多光谱传感器价格低廉、受天气影响小, 通过无人机挂载多光谱传感器可高位作业, 在林木营养状况监测(Berni等, 2009; Liu等, 2016; Perry等, 2018)、水分胁迫评估(Blanco等, 2020)、森林病虫害胁迫探测(Di Nisio等, 2020; Pádua等, 2020)等领域逐渐得到推广使用。

星载多光谱传感器已被广泛用于林分尺度森林生物量、蓄积量等结构参数的获取, 而无人机挂载的多光谱传感器则在森林精准培育中的氮素营养状况、水分状况和病虫害状况的探测具有较大的潜力。然而, 由于多光谱传感器通道较少、光谱分辨率较低、且波段之间不连续, 在一定程度上限制了其在森林精准培育研究中的应用。

2.3 高光谱传感器

常见的高光谱传感器波段区间为400—1000 nm, 主要应用于色素含量估测(Malenovský等, 2013; Zarco-Tejada等, 2013)、产量预测(Gutiérrez等, 2019)等; 而1000—2500 nm的高光谱传感器主要用于水分状况估测(Buddenbaum等, 2012; Cheng等, 2014a)、干物质含量估测(Cheng等, 2014b)、氮含量估测(Wang等, 2016)、森林病虫害探测(Cheng等, 2010; Wu等, 2020)等。

高光谱分析方法主要包括光谱指数法(Wang等, 2016), 去包络线法(Malenovský等, 2013)、红边参数法(朱西存等, 2011)和小波特征分析法(Cheng等, 2014a; Cheng等, 2014b)等。通过优选与理化指标相关性高且可移植性强的光谱特征参数, 建立统计回归估测模型, 可在叶片尺度取得良好的估测效果(Cheng等, 2014b), 但光谱特征参数与理化指标的统计关系易受时间、地点和树种类型等的影响限制, 而在冠层尺度还受环境条件、冠层结构、土壤背景等的影响。

基于机理模型和高光谱数据估测林木理化指标的方式, 也被广泛应用于林木生长状况监测。机理模型从光与叶片、冠层的相互作用机理出发, 具有较好的普适性, 但模型较为复杂, 受模型拟合精度、算法复杂性、获取模型参数等的限制。在林业中应用较广的机理模型主要包括适用于模拟阔叶光谱的PROSPECT模型(Féret等, 2008)和针叶光谱模拟的LIBERTY模型(Dawson等, 1998), 以及SAIL(Jacquemoud等, 2009)、4-Scale(Croft等, 2013)、FLIGHT(North, 1996)、DART(Gastellu-Etchegorry等, 2004)等冠层反射率模拟模型。基于机理模型估测林木理化指标, 主要包括两种技术途径: 1) 通过使用机理模型前向模拟光谱反射率, 构建目标参数的敏感光谱指数(Zarco-Tejada等, 2013)。2) 后向反演叶片和冠层辐射传输模型(Jay等, 2016)。在后向反演中, 常用的方法有数值迭代最优化方法、查找表法、神经网络法、机器学习法等。

相较于使用多光谱数据, 通过使用连续窄光谱带的高光谱数据, 能更准确的探测到不同长势下的光谱差异, 以及叶绿素、水分含量、氮素含量等生化参数的光谱吸收特征变化, 因而可以更为精准地获取林木色素、营养和水分状况相关指

标, 为林木精准培育中优化水肥调控精准管理、森林病虫害精准防治提供重要的技术支撑。虽然高光谱传感器存在上述优点, 其也存在一些局限性, 如需要辐射校正和几何校正、预处理较为复杂(特别是山区地形); 同时, 其通常数据解译复杂、成本高、数据集较大、易受光照环境条件的影响。

2.4 热红外传感器

通过使用热红外传感器可探测植被自身红外辐射的能量, 可在极短的时间内获取植被叶片的温度信息, 而温度信息与气孔导度(赵田欣等, 2012)、蒸腾速率、叶片水势和渗透调节等水分相关指标、以及光合速率等光合生理参数(Buddenbaum等, 2015)显著相关。虽然干旱和病虫害胁迫对植物的伤害途径不一致, 但均可引起树木水分平衡失调, 造成叶片细胞缺水, 从而导致叶片气孔细胞的关闭, 影响蒸腾作用的强度, 进而引起叶温的升高。因此, 热红外传感器常用于监测林木水分胁迫(Buddenbaum等, 2015; Cohen等, 2012)、病虫害胁迫(黄华国, 2019; 王景旭等, 2019)等, 在森林早期健康危害方面具有很大的潜力。

在森林精准培育研究中, 热红外传感器主要包含挂载于近地面遥感平台和航空平台两种类型。在林木受胁迫早期, 水分亏缺还未达到植物生理的极限值, 林木冠层形态状况和光谱特征变化不大, 但通常会引起水分发生变化, 从而引起植被温度的异常变化, 而热红外传感器可以精准地获取温度变化, 为森林精准培育研究提供了一种有效监测林木早期水分胁迫的技术手段。但由于热红外成像仪受环境的影响较大, 需在晴朗、无风或微风条件下获取林木冠层热红外影像, 易受土壤背景温度等混合像元影响, 常需要对传感器进行多次校准, 且很难进行不同时间段数据的对比。

2.5 激光雷达传感器

激光雷达传感器 LiDAR (Light Detection And Ranging) 是一种通过激光器发射激光束照射物体表面和接收返回信号的主动遥感设备, 具有穿透性强、抗干扰能力强、点云精度高等优点。离散回波点云和全波形两种模式为激光雷达系统的主

要记录模式。其中, 前者记录来自不同冠层位置的单个或多个回波信号, 而后者理论上记录了返回信号的全部能量, 可提取包含更多细节的植被冠层垂直剖面。目前, 在林业遥感应用中, 更多的使用小光斑离散回波数据(李增元等, 2016), 部分机载小光斑系统(如 RIEGL LMS-Q680i) 可获取波形数据。

按照遥感平台的不同, 在森林精准培育研究中主要使用的是机载和近地面激光雷达。近地面激光雷达包括地基式(Kankare等, 2015)、手持式(Pont等, 2016)、背包式(Xie等, 2020)、无人机激光雷达(Liu等, 2018), 可获取高密度的点云数据, 实现树高、胸径、冠幅等单木结构信息的精准测量。

多项研究表明, 通过结合激光雷达和高光谱传感器, 可以进一步地协同分析不同高度层次(垂直信息)、不同方位(水平信息)的激光点云三维信息和光谱信号, 用于提升理化指标和生物量等结构参数的估测精度、以及定量评估理化指标的空间分布值测结果。Shen等(2018)通过使用机载高光谱影像和全波形激光雷达数据, 提取了激光雷达点云、全波形和光谱特征, 提升了亚热带森林生物量、蓄积量、胸径、树高等森林结构参数的估测精度。Almeida等人(2019)利用机载激光雷达数据和高光谱数据对亚马逊森林的地上生物量进行估测, 发现通过结合使用两类数据较单独使用任一类数据可取得更高的生物量估测精度。Shen等(2020)基于无人机高光谱影像和激光雷达点云数据的融合, 分别使用光谱指数估测叶绿素和类胡萝卜素含量, 进而结合三维点云数据, 定量评估亚热带人工林中不同林龄的水杉和杨树在不同高度层次、不同方位的色素含量分布情况。

通过使用激光雷达可获取精准的三维数据, 用于提取单木和林分位置、树高、生物量、蓄积量等冠层结构参数信息(刘清旺等, 2017), 且在估算生物量高的地区不易出现光学遥感数据的“饱和”现象(曹林等, 2013), 为森林精准培育研究提供了精确量化林木三维结构信息的技术手段。然而, 激光雷达在应用中也存在一些不足, 如传感器的费用较高、数据处理量较大、缺乏光谱信息(大多为单波段)。

2.6 叶绿素荧光传感器

叶绿素荧光传感器的工作原理为通过接受人工激发光后获取发出的荧光信号, 或通过探测太阳日光诱导叶绿素荧光信号, 进而提取有关植物光合状况和代谢状态的信息。其中, 前者通过使用主动式单色激光光源诱导植物发出荧光, 后者主要基于夫琅禾费暗线原理进行提取自然光照条件下的日光诱导叶绿素荧光(SIF)信号(孙刚等, 2009)。相较而言, 前一种方式发出的荧光与太阳光诱导发出荧光的物理意义差别较大, 且仅适用于小尺度观测(常用于单叶尺度), 而后者探测到的SIF在反映植物光合作用方面更为直观, 适用于单叶尺度、冠层尺度、卫星尺度。

叶绿素荧光在研究干旱胁迫(Buddenbaum等, 2015; Salvatori等, 2016)、高温胁迫(Brestic和Zivcak, 2013)、营养亏缺(Watt等, 2020)、病虫害胁迫(Zarco-Tejada等, 2018)等逆境对林木光

合作用和生长状况时被广泛应用。

叶绿素荧光与植被光合作用、热耗散等密切相关, 是光合作用的无损探针, 能有效反映光能吸收、传递、利用与分配和光化学反应等光合作用过程, 为森林精准培育研究提供了一种可以直接从生理上探测植被光合作用变化的技术手段。但叶绿素荧光传感器(尤其是主动式)多针对单一植株的荧光信号进行精准测量, 较难精准测量冠层尺度的荧光参数, 易受冠层结构、土壤背景、混合像元等的综合影响。

3 遥感在森林精准培育中应用方向

遥感技术贯穿于森林培育主要生产环节, 包括了育种、育苗、栽植方案设计、精准林分管理等。其中, 遥感技术在森林精准培育中应用较广的领域主要为林木良种的精准选育、水肥胁迫与精准喷灌以及森林病虫害精准防治与健康评估等(表2)。

表2 森林精准培育遥感的应用方向共性需求

Table 2 The common acquirments for the remote sensing application in precision silviculture

应用方向对比	林木良种的精准选育	水肥胁迫与精准喷灌	森林病虫害精准防治与健康评估	应用方向的共性需求
主要测量的结构参数或理化指标	树高、胸径、材积、冠幅等结构参数;色素含量、氮素含量、水分含量、光合速率	色素含量、氮含量、磷含量、钾含量、水分含量	色素含量、水分含量、光合速率	通过森林结构参数和理化指标的整合量化分析,辅助监测林木生长状况
主要应用的传感器	激光雷达、RGB数码相机、多光谱、高光谱	多光谱、高光谱、热红外	RGB数码相机、多光谱、高光谱、热红外、激光雷达	通过结合激光雷达、高清相机CCD成像、高光谱成像等技术,实现森林结构参数和理化指标的高精度获取
主要应用的遥感平台	地面平台、无人机平台、机载平台	地面平台、无人机平台、机载平台、星载平台	无人机平台、机载平台、星载平台	通过结合空地一体化平台,实现森林单木到林分尺度的高精度监测
主要的数据分析方法	三维结构提取法、图像特征解译法、光谱特征解析法	图像特征解译法、光谱特征解析法、冠层温度分析法	三维结构提取法、图像特征解译法、光谱特征解析法、冠层温度分析法	通过结合机器学习、模式识别等算法,实现多类遥感数据特征参数的整合分析

3.1 林木良种的精准选育

林木种子是森林培育的物质基础, 其承载了林木遗传基因并促进了森林的世代繁衍。林木种子的质量和数量与森林生产力等质量指标密切相关。因此, 只有采用具有优良遗传品质和播种品质的良种, 才能为人工林培育提供优良的基因保障, 形成具有速生、丰产、优质、抗逆性强的林分(沈国舫, 2001)。

林木良种的精准选育是森林培育的主要任务之一, 而林木通常树体高大, 达到生殖成熟期时

间较长, 基因组较大, 且所处的立地环境条件较为复杂(多为山地)。传统的林木良种选育是一个具有高昂成本且缓慢的过程, 需要较长时间的大规模林地栽培实验, 用以测量相关的表型性状参数(如树高、生物量、材积等)。近年来, 随着遥感、林学、现代生物科学等多学科技术的进步和交叉融合(边黎明和张慧春, 2020), 植物表型检测技术已逐渐应用于林木的良种选育, 可有效加速育种进程, 提升育种效率和质量。针对林木良种的精准选育, 应用植物表型监测技术的意义主要在于实现森林遗传增益(genetic gain)与森林的

可持续经营、增加选择优异树种的几率、以及根据现有森林表型 (forest performance) 推测未来森林在不同环境下 (特别是全球变暖和极端气候等气候变化) 的表现 (Dungey 等, 2018)。

植物表型研究起源于 20 世纪末, 其核心是获取可重复的有效表型性状数据, 进而定量分析基因型和环境互作效应, 以及其对质量、抗逆等主要性状的影响 (Tester 和 Langridge, 2010)。传统表型性状的获取大多还处在林地人工测量阶段, 费时费力, 严重制约着林木良种的选育工作。近年来, 随着人工智能、大数据、物联网、云计算等新一代信息技术的发展 (赵春江, 2019), 成像光谱、激光雷达等多元遥感技术的革新, 无人机等平台的开发应用, 多层次立体化遥感监测技术正逐步应用于植物表型性状数据采集 (周济等, 2018)。同时, 随着植物表型组学理论的不断丰富和发展, 高通量获取植物表型信息, 并在此基础上高分辨、高效地解析性状调控的分子机制和基因功能 (Cardona 和 Tomancak, 2012)、植物表型及环境响应三者的相互作用机理, 已成为进行林木优良品种选育的重要组成部分。

林木良种的精准选育主要包括早期的精准育苗、以及林分中优异树种的选取, 而用于加速林木良种选育主要的两种方法分别为基因组选择 GS (Genomic Selection) 和林木早期表型性状的间接选择。通过使用这两种方法可以大幅减少林地试验的成本, 并及时辅助早期选择的决策。林木早期的精准育苗主要使用室内表型技术, 在可控的环境条件下 (如温室条件) 采集林木幼苗的表型信息, 即通过使用 RGB 数码相机、高光谱成像仪、荧光仪、热红外成像仪等对幼苗早期的生长动态、胁迫处理响应特征等进行精准监控。但是, 林木表型是基因型和环境型共同作用的结果, 室内环境条件与野外林地的光、温、水、气、肥等生长环境仍有很大差异, 因而对林地栽植的大树进行表型监测更有实际价值。基于此观点, Dungey 等 (2018) 率先在国际上提出了结合遥感技术、地理信息系统技术和基因组学技术的森林景观尺度表型平台, 用于追踪基因的表现 (如基因增益), 并最终应用于林木良种的选育。其中, 激光雷达、光谱成像等遥感技术, 可用于获取地形信息、林分和单木尺度的结构、生化参数等; 地理信息系统技术主要用于土壤、气候等环境因子以

及营林管理措施的空间信息管理与分析; 通过结合机器学习、深度学习等算法, 将表型数据、环境型数据和基因组学数据进行整合分析, 如通过大规模转录组学、基因组学和代谢组学等多组学分析, 并利用 GWAS (全基因组关联分析) 挖掘控制关键表型性状的重要 SNP 位点或基因, 追踪其基因增益 (Kimberley 等, 2015), 进而建立精准定向培育技术体系, 提升林木的遗传育种效率与进程。

3.2 水肥胁迫与精准喷灌

3.2.1 水分胁迫监测诊断

水分是林木生长发育过程中的重要物质。其不但是影响林木光合作用、蒸腾作用、净初级生产力的物质基础, 也是形成淀粉、蛋白质和脂肪等重要物质的主要成分。通过水分灌溉可有效提高造林的成活率和保存率, 促进林木生长和林分郁闭, 但过量的灌溉用水不仅浪费水、还会造成土壤通气性和含气量的下降, 不利于林木根系的生长, 甚至引起土壤的盐渍化。因此, 林木生长的水分灌溉需要根据林地土壤水分状况、林木对水分的需求情况和林木目前自身的水分状况, 进行科学判断达到合理灌溉的目的。

传统的林木水分状况估测方法主要为干燥法, 较为费时费力、具有破坏性、且易受环境因素影响, 难以及时评估林木的实际水分状况。蒸腾作用在林木水分代谢中具有调节支配的功能, 蒸腾速率可在一定程度上衡量植物水分平衡和水分代谢状况。因植被温度与蒸腾速率等水分参数紧密相关, 无损评估水分状况的早期研究多基于温度信息评估林木水分亏缺状况。然而, 植被温度信息的时空变化受环境的影响较大, 一定程度上限制了该类应用 (王纪华等, 2000)。近年来, 随着遥感技术的迅速发展, 为及时评估林木水分状况提供了新的技术方法, 对林木的精准灌溉管理和水分利用率的提升具有重要的意义。

由于水分子 O-H 键的伸缩和弯曲振动, 植被水分在 970 nm、1200 nm、1450 nm、1950 nm 和 2250 nm 处 (Rollin 和 Milton, 1998; 刘畅等, 2016; 张峰和周广胜, 2018), 对电磁辐射光谱存在独特而显著的吸收峰特征, 因而这些波段光谱信息可被用于提取光谱指数、小波特征等光谱特

征参数, 进而建立水分含量的光谱监测统计性模型。Penuelas等(1997)研究证明可以利用水分在970 nm的吸收峰估测植物水分含量, 并提出了著名的植被水分指数 R_{970}/R_{900} (PWI), 该指数可有效反映叶片水分相对含水量、叶片水势等。此外, 应用较广的植被水分光谱指数还包括归一化差异水分指数(NDWI)(Gao, 1996)、简单比值水分指数SRWI(Zarco-Tejada等, 2003)、最大差异水分指数(MDWI)(Eitel等, 2006)等。相较于光谱指数形式, 通过使用小波分析, 可从高光谱数据中挖掘出与水分更为敏感且可移植性强的小波光谱特征(Cheng等, 2011), 进而用于探测开心果和杏仁树等经济林在灌溉前后日内水分微弱的变化特征(Cheng等, 2014a)。此外, 除了上述监测水分状况的统计性模型, 通过使用PROSPECT和SAIL等机理性模型, 可分别从叶片尺度(Féret等, 2018; Gara等, 2019; Jay等, 2016)和冠层尺度反演得到林木水分含量(Jacquemoud等, 2009; Quan等, 2017)。

水分含量的变化不仅会直接引起植被光谱特征发生变化, 而且还会诱导植被生理的变化, 如叶绿素含量的降低, 从而引起对可见光光谱、或荧光光谱的显著变化。这主要是因为随着胁迫的进程, 活性氧、过氧化氢及丙二醛含量增加, 抗氧化剂含量下降, 损伤了叶绿素蛋白复合体功能, 从而引起了叶绿素的逐渐降解(刘畅等, 2016)。Eitel等(2006)和Cheng等(2014a)分别使用红边位置指数REIP、 $ND_{850,720}$ 等叶绿素相关光谱指数, 也可用于水分状况的间接估测。Buddenbaum等(2015)通过试验发现榉树苗木在水分胁迫下水分含量和色素含量均发生显著下降, 通过使用光能利用率相关的光化学植被指数PRI(Gamon等, 1992)、荧光光量子产量(F_{Syield})和热红外温度参数可有效反映榉树苗木的水分胁迫状况。

3.2.2 营养胁迫监测诊断

营养元素的盈亏影响林木的生长发育, 林木生长过程中所需的大量元素主要包括氮、磷、钾(沈国舫, 2001)。其中, 氮元素是合成氨基酸、蛋白质的主要元素, 也是叶绿素、核酸、维生素等的主要成分, 同时也与植物的光合作用强度紧密相关。磷元素直接参与植物光合作用过程中的同化和光合磷酸化。钾元素主要负责叶片气孔的

调节、光合作用相关酶的活化、以及参与光合同化物的运输等植物生理功能活动。当某些营养元素供应不足时, 林木代谢就会受到影响, 外部表现形态(如缺氮时叶色常会变淡)也会显现出异常症状。然而, 目前林业生产上的肥料运筹, 仍主要依赖“目视诊断”等经验性的手段来确定, 易受经验性和地域性的限制, 且常导致施肥过量 and 环境污染等不良后果, 甚至还会引起林木生物量下降等问题。

传统的林木营养诊断技术方法大都需要破坏性取样和室内化学分析, 用以获取实际的生物量和营养元素含量, 具有明显的滞后性。随着遥感技术和装备的发展, 已有较多研究利用遥感技术手段重点围绕林木氮素营养状况的评估。反射光谱与林木生长状况密切相关, 可为林木生长指标的快速监测及营养丰缺状况的精确诊断提供技术支撑。基于光谱遥感技术可较好地监测诊断林木营养状况, 其主要是依据营养元素的差异会引起不同波段区间反射率光谱的变化差异。例如, 低氮植被的叶绿素含量和叶面积指数均较低, 在可见光波段(400–700 nm)反射率高, 而在近红外波段(750–900 nm)反射率低, 通过系统构造选择两波段组合而成的比值型指数, 探究氮含量等营养元素指标的光谱敏感中心波段组合, 进而用于营养状况的监测诊断。

在叶片尺度上, 前人使用叶夹式叶绿素仪(Choi等, 2011; 杨亦扬等, 2008)、叶夹式光谱仪(李丙智等, 2010; 李雪飞等, 2011; 刘根华等, 2011; 王植等, 2011), 较好的评估了柿树、茶树、苹果树、紫叶稠李、山核桃等木本植物叶片的氮素营养状况。然而, 叶夹式叶绿素仪或光谱仪只能针对单个植株上的单张叶片获取其叶绿素相对值, 难以反映植株群体的信息, 并易受到外界环境的影响。基于遥感技术开发的高光谱或多光谱传感器, 提供了获取植物冠层光谱信息的可行性, 而冠层光谱可以较好地反映冠层尺度上植株群体的总体面源信息。

在冠层尺度上, 前人基于机载、星载多光谱和高光谱影像, 使用氮营养相关的光谱指数(如归一化差值氮指数NDNI)、或支持向量机回归和BP神经网络等机器学习法, 成功估测了苹果树等经济林木(王凌等, 2013)、以及寒温带混交林

(杨曦光等, 2012)、温带混交林(Wang等, 2016)的冠层氮含量。然而, 此类数据易受天气和时间分辨率的影响, 因而在森林精准培育应用中受到一定的限制。近年来, 随着低成本的近地面多光谱和高光谱传感器的出现, 通过使用搭载于地面平台(Ye等, 2019)或低空无人机平台(Perry等, 2018)的成像光谱仪, 可实现植株群体冠层影像的快速无损获取(刘建刚等, 2016), 具有高时效、高分辨率、低成本等优点(李冰等, 2012), 将更适合于中小型面积的林木或苗木营养状况监测诊断。

相较于氮素营养, 磷素和钾素营养的盈亏对林木光谱特征的影响较弱, 关于利用遥感技术评估林木磷素和钾素营养状况的报道也较少。已有的研究多使用光谱技术, 分别建立了锦橙叶片钾含量(易时来等, 2010)、苹果花磷素(朱西存等, 2009)和钾素含量(朱西存等, 2010)、苹果树冠层磷素含量(潘蓓等, 2012)、苹果叶磷素(程立真等, 2016)和钾素含量(Guo等, 2017)等的估测模型。然而, 磷元素和钾元素盈亏引起的林木生理变化在林木光谱上的响应特征仍需进一步地深入研究。

3.2.3 水肥精准喷灌

水分是氮、磷、钾等营养元素的直接运输者, 对营养元素的运输效率和在各器官组织内的分配存在直接的影响。目前, 林分水肥管理多采用传统方法进行, 如采用浇灌水分、沟施肥料等, 但所需人工成本较高, 肥料利用率低, 且造成一定的水土流失和林地土壤污染等。如何提高林分的水肥利用效率, 节省人工、肥料等经济成本是林农最为关心的主要问题。施肥量可根据树种的生物学特性、土壤贫瘠程度、林龄和施用肥料的种类来确定。

为实现林木的速生、丰产、优质、高效发展, 通过遥感技术实现林木的水肥精准喷灌, 主要包括以下步骤: 首先, 通过使用不同遥感平台(航天平台、航空平台、无人机平台、车载平台、感知物联网进行林木生长信息的智能获取; 然后, 使用不同的信息特征提取算法分别提取图像特征、光谱特征等信息特征; 接着, 基于适宜生长指标动态数据库、信息特征数据库、以及云计算等方法, 实现林木营养亏缺的监测诊断; 其次, 基于

管理知识模型和GIS技术生成按需投入施肥处方和精准施肥管理决策; 最终, 分别使用车载式、机载式和水肥一体化系统实现智能装备的变量化施肥。利用传感器监测水分数据, 决定何时灌溉、何时施肥、灌溉、施肥的面积、间隔时间与次数, 数量的多少等林木生长环境参数对水肥的需求; 通过对中央控制设备, 自动控制水阀门的开启和关闭, 发出灌溉和施肥的指令, 从而开展精准灌溉施肥, 为林木生产的自动化控制提供决策与科学管理依据。通过实施水肥一体智能灌溉系统, 可减少或避免人为因素的影响。

3.3 森林病虫害精准防治与健康评估

森林病虫害是威胁森林健康生长的重要因素之一, 对其精准防治和危害程度的健康评估, 在保障森林健康方面具有重要的意义(曹春香等, 2009)。病虫害对植物的生理活动具有较大的负面影响, 不同地区、不同树种感染的病虫害类型也相应有所差异, 而不同病虫害类型所引起的森林损害的症状也有所不同。传统的林木病虫害诊断是通过目视检查外部表现形态变化而实现的, 但这种方式受限于不同评判者主观性的经验, 缺乏统一的评判标准, 且难以量化病症的程度和区域大小, 降低了森林病虫害评估的准确性。此外, 对林地大面积的病虫害程度进行目视经验性地调查, 所需人工劳动力成本和时间成本也较高(Näsi等, 2015; 边黎明和张慧春, 2020)。病虫害造成的森林受损影响不仅包括外部表现形态的变化, 也包括内部的生理变化。其中, 外部表现形态的变化主要包括叶片出现斑点、萎蔫、卷叶、枯萎、掉叶、叶面积指数下降等, 而内部生理变化较为复杂, 主要包括叶绿素降解、营养传输与分配、水分传输和蒸腾作用、光合作用、荧光作用等生理机能的衰退。

病虫害中的病害主要是由于寄于林木体内的病原生物所引发的, 易造成植物根部破坏、维管束堵塞、叶片细胞质结构的破坏, 从而引起水分吸收能力减弱、向上运输能力下降、水分散失速度加快。虫害一般是造成机械性损伤, 直接破坏林木的根、茎等水分吸收和传输通道(如钻蛀性害虫), 或直接啃咬林木叶片(如食叶害虫), 造成叶片细胞缺水, 影响气孔细胞关闭, 降低叶片

蒸腾作用, 从而影响叶温、叶面积指数、以及其他相关的生理生化指标 (如叶绿素含量、荧光参数、光合作用参数等)。病虫害造成的外部表现形态变化和内部生理变化, 易导致叶片在形态图像或光谱辐射方面发生变化, 因此通过高光谱成像或热红外成像等遥感技术可更有效地检测并量化病虫害的危害程度。

针对林木病虫害遥感监测, 已有的研究多聚焦于可见光成像、多光谱成像、高光谱成像和热红外成像方面的应用。在可见光成像技术应用方面, 较多学者使用搭载于地面平台、或无人机平台的可见光 RGB 相机结合机器视觉 (Mutka 和 Bart, 2015; Zhao 等, 2009; 曹乐平, 2015)、深度学习 (Hu 等, 2020) 等算法, 从图像上提取不同病虫害的造成的根茎、叶、果实或冠层总体的颜色特征、病灶形状尺寸、纹理特征等表现形态差异; 在多光谱成像技术应用方面, TM 等卫星影像已被广泛应用于大范围的松毛虫灾害等森林病虫害的监测 (曹春香 等, 2009; 曾兵兵 等, 2008; 武红敢和石进, 2004; 朱程浩 等, 2016), 多光谱影像可同时提供监测叶绿素衰退等所需的光谱信息和失叶等冠层形态变化的纹理信息; 在高光谱成像技术应用方面, 由于高光谱数据可以提供更精细的光谱吸收特征变化信息, 因而较之多光谱数据, 可更准确获取病虫害引起的叶绿素、水分等生化参数的变化信息 (Cheng 等, 2010; 张衡 等, 2014; Nāsi 等, 2015; Zhang 等, 2018)。相较于使用多光谱数据在出现可见受害症状后 (即红色攻击阶段) 才能探测到受损的情况, Cheng 等 (2010) 基于地面高光谱遥感数据和连续小波分析方法, 在山松甲虫引起的可见症状之前 (即早期的绿色攻击阶段) 成功地捕获了水分和叶绿素下降的信号, 率先找到指示早期山松甲虫灾害的光谱信号。Nāsi 等 (2015) 也证实通过使用无人机高光谱影像探测山松甲虫损害精度的精度要优于使用多光谱影像; 在热红外成像技术应用方面, 其监测森林病虫害的机理主要是基于森林受病虫害后易导致失水, 引起林木蒸腾作用的减弱和叶温等的变化, 而热红外成像技术可以有效地捕捉到此类温度变化信息, 并可进一步地识别不同的病虫害类型及其感染程度 (黄华国, 2019; 王景旭 等, 2019)。

4 结 语

遥感技术是促进林木生长发育规律研究、推动森林培育精准化的重要技术手段。近地面平台、机载平台和星载平台是森林精准培育遥感应用的主要遥感平台; 其中, 无人机等近地遥感平台, 具备机动灵活、成本低、效率高的特点, 在森林精准培育研究中具有较大的潜力。常见的传感器包括 RGB 数码相机、多光谱传感器、高光谱传感器、激光雷达、热红外传感器和叶绿素荧光传感器等。其中, 光谱成像技术具有图谱合一的特性, 可用于间接观测氮含量、色素含量等多项表型信息; 热红外遥感技术主要用于水分状况的间接测定; 激光雷达技术可获取丰富的激光点云信息, 进而得到高精度的三维冠层结构 (如株高、冠宽、叶型、生物量等) 参数。

通过使用多平台、多尺度、多源遥感技术, 可精准地获取森林的长势信息, 为森林精准培育研究中林木良种精准选育、水肥胁迫与精准喷灌、森林病虫害精准防治与健康评估等提供技术和数据支撑。未来, 森林精准培育中遥感技术应用的发展趋势和研究热点将重点表现在以下 3 个方面:

(1) 多平台、多时相、多源遥感信息融合。前人研究表明基于单一遥感数据源建立的模型, 通常存在通用性差、年际间和不同树种间模型预测精度不稳定等缺点, 而通过融合天一空一地多平台、多时相、多源遥感数据 (如结合高光谱影像数据和激光雷达数据源等) 可显著提升森林结构参数和理化指标等的估测精度和模型鲁棒性, 进而用于森林结构参数和理化指标的动态监测。因此, 需不断地深入挖掘和融合多源遥感信息处理的技术和方法, 用于构建通用性强、精度高的遥感预测模型。此外, 通过开发多源遥感一体化无人机平台, 可有效获取多时相的多源遥感数据, 同步获取林木的立体三维结构信息和光谱信息, 提升遥感数据获取的效率和维度。

(2) 人工智能、物联网技术、GIS 和遥感技术的融合, 以及与水肥灌溉一体 (硬件) 系统的集成。通过使用光谱成像、热红外成像、激光雷达等多层次立体化的多源遥感技术, 结合可智能采集林地气象、水分、养分的物联网技术, 以及可提供回归和分类问题求解、专家系统推理和模式识别的人工智能技术, 实现林木形态指标、结构

参数、理化指标等精细表型智能化提取的高通量表型技术；可辅助实现林木水肥亏缺的精准监测诊断，进而结合GIS技术生成精准水肥管理决策，完成水肥灌溉一体化集成系统的变量化施肥灌溉；并在此基础上，智能高效地挖掘表型与基因型和环境型三者相互作用机理，为林木优良品种选育提供技术支撑。

(3) 遥感观测数据与生理生态模型、辐射传输模型的集成应用。通过结合生理生态模型和辐射传输模型的机理性、预测性和遥感的空间性、实时性，可进一步增强森林精准培育遥感应用的通用性及机理解释，实现生理生态模型和辐射传输模型从样地尺度到区域尺度的尺度提升，并全面提升遥感观测数据和辐射传输模型相结合的森林生理生态关键参数模拟效果。

志 谢 本文在森林培育技术、林木良种选育、荧光遥感等方面的相关文字内容，分别得到了南京林业大学林学院曹福亮老师、汪贵斌老师、杨晓明老师、崔天翔老师的建议和帮助，在此表示衷心的感谢！

参考文献(References)

- Almeida C T D, Galvão L S, Ometto J P H B., Jacon A D, de Souza Pereira F R, Sato L Y, Lopes A P, de Alencastro Graça P M L, de Jesus Silva C V and Ferreira-Ferreira J. 2019. Combining LiDAR and hyperspectral data for aboveground biomass modeling in the Brazilian Amazon using different regression algorithms. *Remote sensing of environment*, 232: 111323 [DOI: 10.1016/j.rse.2019.111323]
- Berni J, Zarco-Tejada P J, Suarez L, Fereres E. 2009. Thermal and Narrowband Multispectral Remote Sensing for Vegetation Monitoring From an Unmanned Aerial Vehicle. *IEEE Trans. Geo. Remote Sensing*, 47(3): 722-738 [DOI: 10.1109/TGRS.2008.2010457]
- Bian L M and Zhang H C. 2020. Application of phenotyping techniques in forest tree breeding and precision forestry. *Scientia Silvae Sinicae*, 56(6): 113-126 (边黎明, 张慧春. 2020. 表型技术在林木育种和精确林业上的应用. *林业科学*, 56(6): 113-126) [DOI: 10.11707/j.1001-7488.20200612]
- Blanco V, Blaya Ros P J, Castillo C, Soto F, Torres R and Domingo R. 2020. Potential of UAS-Based Remote Sensing for Estimating Tree Water Status and Yield in Sweet Cherry Trees. *Remote Sensing*, 12(15): 2359 [DOI: 10.3390/rs12152359]
- Brestic M and Zivecak M. 2013. PSII Fluorescence Techniques for Measurement of Drought and High Temperature Stress Signal in Crop Plants: Protocols and Applications. *Molecular Stress Physiology of Plants*. Heidelberg: Springer Dordrecht: 87-131 [DOI: 10.1007/978-81-322-0807-5]
- Buddenbaum H, Rock G, Hill J and Werner W. 2015. Measuring Stress Reactions of Beech Seedlings with PRI, Fluorescence, Temperatures and Emissivity from VNIR and Thermal Field Imaging Spectroscopy. *European Journal of Remote Sensing*, 48: 263-282 [DOI: 10.5721/EuJRS20154815]
- Buddenbaum H, Stern O, Stellmes M, Stoffels J, Poeschel P, Hill J and Werner W. 2012. Field imaging spectroscopy of beech seedlings under dryness stress. *Remote Sensing*, 4(12): 3721-3740 [DOI: 10.3390/rs4123721]
- Cao C X, Xu M, He Q S and Zhang Y. 2009. The trend of applying multi-source remote sensing data into forest health studies. *The Journal of Remote Sensing*, 13(s1): 401-407 (曹春香, 徐敏, 何祺胜, 张颢. 2009. 多源遥感数据应用于森林健康研究的趋势. *遥感学报*, 13(s1): 401-407) [DOI:10.11834/jrs.20090056]
- Cao L, Shen G H, Dai J S and Xu J X. 2013. Status and prospects of the LiDAR-based forest biomass estimation. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 37(3): 163-169. (曹林, 余光辉, 代劲松, 徐建新 (2013). 激光雷达技术估测森林生物量的研究现状及展望. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 37: 163-169)
- Cao L P. 2015. The research progress on machine recognition of plant diseases and insect pests. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 31(20): 244-249 (曹乐平. 2015. 基于机器视觉的植物病虫害实时识别方法. *中国农学通报*, 31(20): 244-249)
- Cao Q, Miao Y X, Wang H Y, Huang S Y, Cheng S S, Khosla R and Jiang R F. 2013. Non-destructive estimation of rice plant nitrogen status with Crop Circle multispectral active canopy sensor. *Field Crops Research*, 154: 133-144 [DOI: 10.1016/j.fcr.2013.08.005]
- Cardona A and Tomancak P. 2012. Current challenges in open-source bioimage informatics. *Nature Methods*, 9(7): 661-665 [DOI: 10.1038/nmeth.2082]
- Chen F, Su S C, Zhang B and Wang W H. 2014. A preliminary study on nitrogen status diagnosis using digital image processing of hybrid hazel. *Journal of Northwest Forestry University*, 30(5): 111-114 (陈凤, 苏淑钗, 张兵, 王文浩, 林竹. 2014. 数码图像技术在杂交榛氮素营养诊断中的初步研究. *西北林学院学报*, 30(5): 111-114) [DOI: 10.3969/j.issn.1001-7461.2014.05.20]
- Chéné Y, Rousseau D, Lucidarme P, Bertheloot J, Caffier V, Morel P, Belin É and Chapeau-Blondeau F O. 2012. On the use of depth camera for 3D phenotyping of entire plants. *Computers & Electronics in Agriculture*, 82: 122-127 [DOI: 10.1016/j.compag.2011.12.007]
- Cheng L Z, Zhu X C, Gao L L, Wang L and Zhao G X. 2016. Hyperspectral estimation of phosphorus content for apple leaves based on the random forest model. *Journal of Fruit Science*, 33(10): 1219-1229 (程立真, 朱西存, 高璐璐, 王凌, 赵庚星. 2016. 基于随机森林模型的苹果叶片磷素含量高光谱估测. *果树学报*, 33

- (10): 1219-1229 [DOI:10.13925/j.cnki.gsxb.20150439]
- Cheng T, Riaño D, Koltunov A, Whiting M L, Ustin S L and Rodriguez J. 2013. Detection of diurnal variation in orchard canopy water content using MODIS/ASTER airborne simulator (MASTER) data. *Remote sensing of environment*, 132: 1-12 [DOI: 10.1016/j.rse.2012.12.024]
- Cheng T, Riaño D and Ustin S L. 2014a. Detecting diurnal and seasonal variation in canopy water content of nut tree orchards from airborne imaging spectroscopy data using continuous wavelet analysis. *Remote sensing of environment*, 143: 39-53 [DOI: 10.1016/j.rse.2013.11.018]
- Cheng T, Rivard B, Sánchez-Azofeifa A G, Féret J B, Jacquemoud S and Ustin S L. 2014b. Deriving leaf mass per area (LMA) from foliar reflectance across a variety of plant species using continuous wavelet analysis. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 87: 28-38 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2013.10.009]
- Cheng T, Rivard B, Sánchez-Azofeifa G, Feng J and Calvo-Polanco M. 2010. Continuous wavelet analysis for the detection of green attack damage due to mountain pine beetle infestation. *Remote Sensing of Environment*, 114(4): 899-910 [DOI: 10.1016/j.rse.2009.12.005]
- Cheng T, Rivard B and Sanchez-Azofeifa A. 2011. Spectroscopic determination of leaf water content using continuous wavelet analysis. *Remote Sensing of Environment*, 115: 659-670 [DOI: 10.1016/j.rse.2010.11.001]
- Choi S T, Park D S, Kang S M and Park S J. 2011. Use of a chlorophyll meter to diagnose nitrogen status of 'Fuyu' persimmon leaves. *HortScience*, 46(5): 821-824 [DOI: 10.21273/HORTSCI.46.5.821]
- Cohen Y, Alchanatis V, Prigojin A, Levi A, Soroker V and Cohen Y. 2012. Use of aerial thermal imaging to estimate water status of palm trees. *Precision Agriculture*, 13(1): 123-140 [DOI: 10.1007/s11119-011-9232-7]
- Croft H, Chen J, Zhang Y and Simic A. 2013. Modelling leaf chlorophyll content in broadleaf and needle leaf canopies from ground, CASI, Landsat TM 5 and MERIS reflectance data. *Remote Sensing of Environment*, 133: 128-140 [DOI: 10.1016/j.rse.2013.02.006]
- Dawson T P, Curran P J and Plummer S E. 1998. LIBERTY-Modeling the effects of leaf biochemical concentration on reflectance spectra. *Remote Sensing of Environment*, 65(1): 50-60 [DOI: 10.1016/S0034-4257(98)00007-8]
- Di Nisio A, Adamo F, Acciani G and Attivissimo F. 2020. Fast detection of olive trees affected by xylella fastidiosa from UAVs using multispectral imaging. *Sensors*, 20(17): 4915 [DOI: 10.3390/s20174915]
- Dube T and Mutanga O. 2015. Investigating the robustness of the new Landsat-8 operational land imager derived texture metrics in estimating plantation forest aboveground biomass in resource constrained areas. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 108, 12-32 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2015.06.002]
- Dungey H S, Dash J P, Pont D, Clinton P W, Watt M S and Telfer E J. 2018. Phenotyping whole forests will help to track genetic performance. *Trends in Plant Science*, 23(10): 854-864 [DOI: 10.1016/j.tplants.2018.08.005]
- Eitel J U, Gessler P E, Smith A M and Robberecht R. 2006. Suitability of existing and novel spectral indices to remotely detect water stress in *Populus* spp. *Forest Ecology and Management*, 229(1-3): 170-182 [DOI: 10.1016/j.foreco.2006.03.027]
- Féret J B, Francois C, Asner G, Gitelson A, Martin R, Bidel L, Ustin S L, le Maire G and Jacquemoud S. 2008. PROSPECT-4 and 5: Advances in the leaf optical properties model separating photosynthetic pigments. *Remote Sensing of Environment*, 112(6): 3030-3043 [DOI: 10.1016/j.rse.2008.02.012]
- Féret J B, le Maire G, Jay S, Bernecker D, Bendoula R, Hmimina G, Cheriai A, Oliveira J, Ponzoni F, Solanki T, De Boissieu F, Chave J, Nouvellon Y, Porcar-Castell A, Proisy C, Soudani K, Gastellu-Etchegorry J P and Lefèvre-Fonollosa M. 2018. Estimating leaf mass per area and equivalent water thickness based on leaf optical properties: Potential and limitations of physical modeling and machine learning. *Remote Sensing of Environment*, 231: 110959 [DOI: 10.1016/j.rse.2018.11.002]
- Gamon J, Penuelas J and Field C. 1992. A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency. *Remote Sensing of Environment*, 41(1): 35-44 [DOI: 10.1016/0034-4257(92)90059-S]
- Gao B C. 1996. NDWI-A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 58(3): 257-266 [DOI: 10.1016/S0034-4257(96)00067-3]
- Gara T, Darvishzadeh R, Skidmore A and Heurich M. 2019. Evaluating the performance of PROSPECT in the retrieval of leaf traits across canopy throughout the growing season. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 83: 101919 [DOI: 10.1016/j.jag.2019.101919]
- Gastellu-Etchegorry J P, Martin E and Gascon F. 2004. DART: a 3D model for simulating satellite images and studying surface radiation budget. *International Journal of Remote Sensing*, 25(1): 73-96 [DOI: 10.1080/0143116031000115166]
- Goodbody T R H, Coops N C, Tompalski P, Crawford P and Day K J K. 2017. Updating residual stem volume estimates using ALS- and UAV-acquired stereo-photogrammetric point clouds. *International Journal of Remote Sensing*, 38: 2938-2953 [DOI: 10.1080/01431161.2016.1219425]
- Guo X, Zhu X, Li C, Wei Y, Yu X, Zhao G and Sun H. 2017. Hyperspectral inversion of potassium content in apple leaves based on vegetation index. *Agricultural Sciences*, 08(08): 825-836 [DOI: 10.4236/as.2017.88061]
- Guo Y, Li Z Y, Chen E X, Tian X and Ling F L. 2015. Estimating forest above-ground biomass in the upper reaches of heihe river ba-

- sin using multi-spectral remote sensing. *Scientia Silvae Sinicae*, 51(1): 140-149 (郭云, 李增元, 陈尔学, 田昕, 凌飞龙. 2015. 甘肃黑河流域上游森林地上生物量的多光谱遥感估测. *林业科学*, 51(1): 140-149) [DOI: 10.11707/j.1001-7488.20150117]
- Gutiérrez S, Wendel A and Underwood J. 2019. Ground based hyperspectral imaging for extensive mango yield estimation. *Computers and Electronics in Agriculture*, 157: 126-135 [DOI: 10.1016/j.compag.2018.12.041]
- Hu G S, Yin C J, Wan M Z, Zhang Y and Fang Y. 2020. Recognition of diseased pinus trees in UAV images using deep learning and AdaBoost classifier. *Biosystems Engineering*, 194: 138-151 [DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2020.03.021]
- Huang H G. 2019. Progress and perspective of quantitative remote sensing of forestry. *Journal of Beijing Forestry University*, 41(12): 1-14 (黄华国. 2019. 林业定量遥感研究进展和展望. *北京林业大学学报*, 41(12): 1-14) [DOI:10.12171/j.1000-1522.20190326]
- Jacquemoud S, Verhoef W, Baret F, Bacour C, Zarco-Tejada P J, Asner G P, François C and Ustin S L. 2009. PROSPECT+ SAIL models: A review of use for vegetation characterization. *Remote Sensing of Environment*, 113: S56-S66 [DOI: 10.1016/j.rse.2008.01.026]
- Jay S, Bendoula R, Hadoux X, Féret J B and Gorretta N. 2016. A physically-based model for retrieving foliar biochemistry and leaf orientation using close-range imaging spectroscopy. *Remote Sensing of Environment*, 177: 220-236 [DOI: 10.1016/j.rse.2016.02.029]
- Kankare V, Liang X, Vastaranta M, Yu X, Holopainen M and Hyypä J. 2015. Diameter distribution estimation with laser scanning based multisource single tree inventory. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 108: 161-171 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2015.07.007]
- Kimberley M, Moore J and Dungey H. 2015. Quantification of realised genetic gain in radiata pine and its incorporation into growth and yield modelling systems. *Canadian Journal of Forest Research*, 45(12): 1676-1687 [DOI: 10.1139/cjfr-2015-0191]
- Kuhlgert S, Austic G, Zegarac R, Osei-Bonsu I, Hoh D, Chilvers M I, Roth M G, Bi K, Teravest D and Weebadde P. 2016. MultispeQ Beta: a tool for large-scale plant phenotyping connected to the open PhotosynQ network. *Royal Society Open Science*, 3(10): 160592 [DOI: 10.1098/rsos.160592]
- Li B, Liu R Y, Liu S H, Liu Q, Liu F and Zhou G Q. 2012. Monitoring vegetation coverage variation of winter wheat by low-altitude UAV remote sensing system. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 28(13): 160-165 (李冰, 刘镛源, 刘素红, 刘强, 刘峰, 周公器. 2012. 基于低空无人机遥感的冬小麦覆盖度变化监测. *农业工程学报*, 28(13): 160-165) [DOI: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.13.026]
- Li B Z, Li M X, Zhou X, Zhang L S and Zhang H Y. 2010. Hyperspectral estimation models for nitrogen contents of apple leaves. *Journal of Remote Sensing*, 14(4): 761-773 (李丙智, 李敏夏, 周璇, 张林森, 张海燕. 2010. 苹果树叶片全氮含量高光谱估算模型研究. *遥感学报*, 14(4): 761-773)
- Li M S, Tan Y, Pan J and Peng S K. 2006. Modeling forest above-ground biomass by combining the spectrum, textures with topographic features. *Remote Sensing Information*, 6: 6-9 (李明诗, 谭莹, 潘洁, 彭世揆. 2006. 结合光谱、纹理及地形特征的森林生物量建模研究. *遥感信息*, 6: 6-9)
- Li S, Ding X Z, Kuang Q L, Ata-Ul-Karim S T, Cheng T, Liu X J, Tian Y C, Zhu Y and Cao Q. 2018. Potential of UAV-based active sensing for monitoring rice leaf nitrogen status. *Frontiers in Plant Science*, 9: 1834 [DOI: 10.3389/fpls.2018.01834]
- Li S D. 2016. Smart Forestry: New journey of Forestry in China. *Information Construction*, 8: 23-25 (李世东. 2016. 智慧林业: 中国林业新征途. *信息化建设*, 8: 23-25)
- Li W T, Yang J B, Zhang J, Wang K J, Deng L, Lv Q, He S L, Xie R J, Zheng Y Q and Ma Y Y. 2018. The evaluation of chlorophyll content detection in the leaves of newhall navel orange based on different sensors. *Scientia Agricultural Sinica*, 51(6): 1057-1066 (李文涛, 杨江波, 张绩, 王克健, 邓烈, 吕强, 何绍兰, 谢让金, 郑永强, 马岩岩. 2018. 基于不同传感器的纽荷尔脐橙叶片叶绿素含量检测技术评价. *中国农业科学*, 51(6): 1057-1066) [DOI: 10.3864/j.issn.0578-1752.2018.06.005]
- Li X F, Han T T, Dong Y, Wu M and Shen X. 2011. Relationships between Spectral Reflectance and Pigment or Nitrogen Concentrations in Leaves of *Padus virginiana* 'Schubert'. *Scientia silvae Sinicae*, 47(8): 75-81 (李雪飞, 韩甜甜, 董彦, 吴曼, 沈向. 2011. 紫叶稠李叶片色素及氮含量与其光谱反射特性的相关性. *林业科学*, 47(8): 75-81)
- Li Z Y, Liu Q W, Pang Y. 2016. Review on forest parameters inversion using LiDAR. *Journal of Remote Sensing*, 20(5): 1138-1150 (李增元, 刘清旺, 庞勇. 2016. 激光雷达森林参数反演研究进展. *遥感学报*, 20(5): 1138-1150) [DOI:10.11834/jrs.20165130]
- Liu C, Sun P S and Liu S R. 2016. A review of plant spectral reflectance response to water physiological changes. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 40(1): 80-91 (刘畅, 孙鹏森, 刘世荣. 2016. 植物反射光谱对水分生理变化响应的研究进展. *植物生态学报*, 40(1): 80-91) [DOI: 10.17521/cjpe.2015.0267]
- Liu G H, Huang J Q, Pan C X, Wang Z J, Zheng B S and Jin S H. 2011. Analysis of the nitrogen levels in leaves of hickory seedling by reflectance spectra. *Scientia Silvae Sinicae*, 47(1): 165-171 (刘根华, 黄坚钦, 潘春霞, 王正加, 郑炳松, 金松恒. 2011. 基于反射光谱的山核桃幼苗氮素营养状况分析. *林业科学*, 47(1): 165-171)
- Liu J G, Zhao C J, Yang G J, Yu H Y, Zhao X Q, Xu B and Niu Q L. 2016. Review of field-based phenotyping by unmanned aerial vehicle remote sensing platform. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 32(24): 98-106 (刘建刚, 赵春江, 杨贵军, 于海洋, 赵晓庆, 徐波, 牛庆林. 2016. 无人机遥感解析田间作物表型信息研究进展. *农业工程学报*, 32(24): 98-106) [DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.24.013]
- Liu K, Shen X, Cao L, Wang G B and Cao F L. 2018. Estimating forest structural attributes using UAV-LiDAR data in Ginkgo plantations

- tions. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 146: 465-482 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2018.11.001]
- Liu L Z, Li M J, Lin Y F, Zhang Z Z and Zhang M M. 2019. A preliminary study on nitrogen diagnosis of tea plant based on image processing. *Journal of Beihua University (Natural Science)*, 20(1): 114-120 (刘连忠, 李孟杰, 林源丰, 张正竹, 张媛媛. 2019. 基于图像处理的茶树含氮量诊断方法初步研究. *北华大学学报(自然科学版)*, 20(1): 114-120) [DOI: 10.11713/j.issn.1009-4822.2019.01.024]
- Liu Q W, Li S M, Li Z Y, Fu L Y and Hu K L. 2017. Review on the applications of UAV-based lidar and photogrammetry in forestry. *Scientia Silvae Sinicae*, 53(7): 134-148 (刘清旺, 李世明, 李增元, 符利勇, 胡凯龙. 2017. 无人机激光雷达与摄影测量林业应用研究进展. *林业科学*, 53(7): 134-148) [DOI: 10.11707/j.1001-7488.20170714]
- Liu X F, Lyu Q, He S L, Yi S L, Hu D Y, Wang Z T, Xie R J, Zheng Y Q and Deng L. 2016. Estimation of carbon and nitrogen contents in citrus canopy by low-altitude remote sensing, 9: 149-157 [DOI: 10.3965/j.ijabe.20160905.2246]
- Malenovský Z, Homolová L, Zurita-Milla R, Lukeš P, Kaplan V, Hanuš J, Gastellu-Etchegorry J P and Schaepman M E. 2013. Retrieval of spruce leaf chlorophyll content from airborne image data using continuum removal and radiative transfer. *Remote Sensing of Environment*, 131: 85-102 [DOI: 10.1016/j.rse.2012.12.015]
- Mei M Y and Lei Y D. 2019. Analysis on Development Trend of China's Plantation in New Era. *World Forestry Research*, 32(3): 73-77 (梅梦媛, 雷一东. 2019. 我国人工林新时代发展形势分析. *世界林业研究*, 32(3): 73-77) [DOI: 10.13348/j.cnki.sjlyyj.2019.0006.y]
- Mishra A, Karimi D, Ehsani R and Albrigo L G. 2011. Evaluation of an active optical sensor for detection of Huanglongbing (HLB) disease. *Biosystems Engineering*, 110(3): 302-309 [DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2011.09.003]
- Montagnoli, A, Terzaghi, M, Fulgaro, N, Stoew, B, Wipenmyr, J, Ilver, D, Rusu, C, Scippa, G and Chiatante, D. 2016. Non-destructive phenotypic analysis of early stage tree seedling growth using an automated stereovision imaging method. *Frontiers in Plant Science*, 7(e0119): 1644 [DOI: 10.3389/fpls.2016.01644]
- Mu Y, Fujii Y, Takata D, Zheng B, Noshita K, Honda K, Ninomiya S and Guo W. 2018. Characterization of peach tree crown by using high-resolution images from an unmanned aerial vehicle. *Horticulture Research*, 5: 74 [DOI: 10.1038/s41438-018-0097-z]
- Mutka, A M and Bart, R S. 2015. Image-based phenotyping of plant disease symptoms. *Frontiers in Plant Science*, 5: 734 [DOI: 10.3389/fpls.2014.00734]
- Näsi R, Honkavaara E, Paivi L S, Blomqvist M, Litkey P, Hakala T, Viljanen N, Tuula K, Tanhuanpää T and Holopainen M. 2015. Using UAV-based photogrammetry and hyperspectral imaging for mapping bark beetle damage at tree-level. *Remote Sensing*, 7(11): 15467-15493 [DOI: 10.3390/rs71115467]
- North P R J. 1996. Three-dimensional forest light interaction model using a Monte Carlo method. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 34(4): 946-956 [DOI: 10.1109/36.508411]
- Pádua L, Marques P, Martins L, Sousa A, Peres E and Sousa J. 2020. Monitoring of chestnut trees using machine learning techniques applied to UAV-based multispectral data. *Remote Sensing*, 12(18): 3032 [DOI: 10.3390/rs12183032]
- Pan B, Zhao G X, Zhu X C and Wang N N. 2012. Estimation of phosphorus content in apple tree canopy based on hyperspectrum. *Infrared*, 33(6): 27-31 (潘蓓, 赵庚星, 朱西存, 王娜娜. 2012. 基于高光谱的苹果树冠层磷素状况估测模型研究. *红外*, 33(6): 27-31) [DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2012.06.006]
- Penuelas J, Pinol J, Ogaya R and Filella I. 1997. Estimation of plant water concentration by the reflectance water index WI (R900/R970). *International Journal of Remote Sensing*, 18(13): 2869-2875 [DOI: 10.1080/014311697217396]
- Perry E, Goodwin I and Cornwall D. 2018. Remote sensing using canopy and leaf reflectance for estimating nitrogen status in red-blush pears. *HortScience*, 53(1): 78-83 [DOI: 10.21273/HORTSCI112391-17]
- Pont D, Dungey H, Watt M, Morgenroth J and Stovold T. 2016. The use of LiDAR for phenotyping. In *Forest Genetics for Productivity Conference*, Rotorua, New Zealand. [2016-03-01] <https://www.researchgate.net/publication/304864832>
- Quan X, He B, Yebra M, Yin C, Liao Z and Li X. 2017. Retrieval of forest fuel moisture content using a coupled radiative transfer model. *Environmental Modelling and Software*, 95: 290-302 [DOI: 10.1016/j.envsoft.2017.06.006]
- Rollin E M and Milton E J. 1998. Processing of high spectral resolution reflectance data for the retrieval of canopy water content information. *Remote Sensing of Environment*, 65(1): 86-92 [DOI: 10.1016/S0034-4257(98)00013-3]
- Salvatori E, Fusaro L and Manes F. 2016. Chlorophyll fluorescence for phenotyping drought-stressed trees in a mixed deciduous forest. *Annali Di Botanica*, 6: 39-49 [DOI: 10.4462/annbotrm-13263]
- Santos D A E, Daniela V S, Letícia D A, Cristina S A, Carla D N and Schramm M M. 2018. Relationships between reflectance and absorbance chlorophyll indices with RGB (Red, Green, Blue) image components in seedlings of tropical tree species at nursery stage. *New Forests*, 50: 377-388 [DOI: 10.1007/s11056-018-9662-4]
- Shen G F. 2001. *Silviculture*. Beijing: China Forestry Publishing: 94-97 (沈国防. 2001. 森林培育学. 北京: 中国林业出版社: 94-97)
- Shen X, Cao L, Coops N C, Fan H, Wu X Q, Liu H, Wang G B and Cao F L. 2020. Quantifying vertical profiles of biochemical traits for forest plantation species using advanced remote sensing approaches. *Remote Sensing of Environment*, 250: 112041 [DOI: 10.1016/j.rse.2020.112041]
- Shen X, Cao L, Dong C, Sun Y, Wang G and Ruan H H. 2018. Prediction of forest structural parameters using airborne full-waveform

- LiDAR and hyperspectral data in subtropical forests. *Remote Sensing*, 10(11): 1729 [DOI: 10.3390/rs10111729]
- Sun G, Liu L Y, Zheng W G, Huang W J and Yin M. 2009. Development of a solar-induced chlorophyll fluorescence monitor based on fraunhofer line principle. *Transactions of The Chinese Society of Agricultural Machinery*, 40: 248-236 (孙刚, 刘良云, 郑文刚, 黄文江, 尹鸣 (2009). 基于夫琅和费暗线原理的太阳诱导叶绿素荧光仪. *农业机械学报*, 040, 248-236)
- Tester M and Langridge P. 2010. Breeding technologies to increase crop production in a changing world. *Science*, 327(5967): 818-822 [DOI: 10.1126/science.1183700]
- Wang J, Yin H L, Wang X Y and Feng Z K. 2015. Remote sensing factor optimization for forest volume estimation based on ZY-3 images. *Journal of Central South University of Forestry and Technology*, 35(12): 29-33 (王佳, 尹华丽, 王晓莹, 冯仲科. 2015. 基于资源三号影像的森林蓄积量估测遥感因子选择. *中南林业科技大学学报*, 35(12): 29-33) [DOI: 10.14067/j.cnki.1673-923x.2015.12.005]
- Wang L, Zhao G X, Zhu X C, Wang R Y and Chang C Y. 2013. Satellite remote sensing retrieval of canopy nitrogen nutritional status of apple trees at blossom stage. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 24: 2863-2870 (王凌, 赵庚星, 朱西存, 王瑞燕, 常春艳. 2013. 花期苹果树冠氮素营养状况的卫星遥感反演. *应用生态学报*, 24: 2863-2870) [DOI: 10.13287/j.1001-9332.2013.0462]
- Wang Y and Yan Z Y. 2016. Detection system of chlorophyll content of cyclobalanopsis glauca using image processing technology. *Journal of agricultural science and technology*, 19(4): 59-64 (王诣, 闫志勇. 2016. 基于图像处理的青冈栎叶绿素含量检测系统研究. *中国农业科技导报*, 19(4): 59-64) [DOI: 10.13304/j.nykjdb.2016.424]
- Wang Z, Wang T, Darvishzadeh R, Skidmore A K, Jones S, Suarez L, Woodgate W, Heiden U, Heurich M and Hearne J. 2016. Vegetation indices for mapping canopy foliar nitrogen in a mixed temperate forest. *Remote Sensing*, 8(6): 491 [DOI: 10.3390/rs8060491]
- Wang Z, Zhou L D, Li H, Jia J S. 2011. Predicting Nitrogen Concentrations in fresh peach leaf from hyper spectral remote sensing. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 27(04): 85-90 (王植, 周连第, 李红, 贾劲松. 2011. 桃树叶片氮素含量的高光谱遥感监测. *中国农学通报*, 27(04): 85-90)
- Wang J H, Zhao C J, Guo X W, Huang W J and Tian Q J. 2000. Study on the water content of wheat leaves by the remote sensing. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 15: 68-72 (王纪华, 赵春江, 郭晓维, 黄文江, 田庆久. 2000. 利用遥感方法诊断小麦叶片含水量的研究. *华北农学报*, 15, 68-72)
- Wang J X, Huang H G, Lin Q N, Wang B and Huang C. 2019. Shoot beetle damage to *Pinus yunnanensis* monitored by infrared thermal imaging at needle scale. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 43(11): 959-968 (王景旭, 黄华国, 林起楠, 王冰, 黄侃. 2019. 红外热成像监测云南松切梢小蠹虫害: 针叶尺度观测. *植物生态学报*, 43(11): 959-968) [DOI: 10.17521/cjpe.2019.0180]
- Wang M M, Lin J Y, Lin Y and Li Y. 2017. Subalpine coniferous forest crown information automatic extraction based on optical UAV remote sensing imagery. *Forest Resources Management*, 4: 82-88 (王枚梅, 林家元, 林沂, 李翔. 2017. 基于无人机可见光影像的亚高山针叶林树冠参数信息自动提取. *林业资源管理*, 4: 82-88) [DOI: 10.13466/j.cnki.lyzygl.2017.04.013]
- Watt M, Buddenbaum H, Estarija H, Bown H, Gómez-Gallego M, Hartley R, Massam P, Wright L, Zarco-Tejada P and Leonardo E. 2020. Using hyperspectral plant traits linked to photosynthetic efficiency to assess N and P partition. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 169: 406-420 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2020.09.006]
- Wu H G and Shi J. 2004. Monitoring Technique of Pine Caterpillars with TM Image. *Journal of Remote Sensing*, 8(2): 172-177 (武红敢, 石进. 2004. 松毛虫灾害的TM影像监测技术. *遥感学报*, 8(2): 172-177)
- Wu W B, Zhang Z B, Zheng L J, Han C Y, Wang X M, Xu J and Wang X R. 2020. Research progress on the early monitoring of pine wilt disease using hyperspectral techniques. *Sensors*, 20(13): 3729 [DOI: 10.3390/s20133729]
- Xie Y, Zhang J, Chen X, Pang S, Zeng H and Shen Z. 2020. Accuracy assessment and error analysis for diameter at breast height measurement of trees obtained using a novel backpack LiDAR system. *Forest Ecosystems*, 7: 33 [DOI: 10.1186/s40663-020-00237-0]
- Yang X G, Yu Y, Huang H J and Fan W Y. 2012. *Journal of Infrared Millimeter Waves*, 31(6): 536-543 (杨曦光, 于颖, 黄海军, 范文义. 2012. 森林冠层氮含量遥感估算. *红外与毫米波学报*, 31(6): 536-543) [DOI: 10.3724/SP.J.1010.2012.00536]
- Yang Y Y, Ma L F, Shi Y Z, Ruan, J Y and Li X H. 2008. Evaluation of nitrogen status in tea plants by SPAD. 28(4): 301-308 (杨亦扬, 马立锋, 石元值, 阮建云, 黎星辉. 2008. 叶绿素仪 (SPAD) 在茶树氮素营养诊断中的适用性研究. *茶叶科学*, 28(4): 301-308)
- Ye X, Abe S and Zhang S. 2019. Estimation and mapping of nitrogen content in apple trees at leaf and canopy levels using hyperspectral imaging. *Precision Agriculture*, 21: 198-225 [DOI: 10.1007/s11119-019-09661-x]
- Yi S L, Deng L, He S L, Zheng Y Q and Mao S S. 2010. *Scientia Agricultura Sinica*, 43(4): 780-786 (易时来, 邓烈, 何绍兰, 郑永强, 毛莎莎. 2010. 锦橙叶片钾含量光谱监测模型研究. *中国农业科学*, 43(4): 780-786) [DOI: 10.3864/j.issn.0578-1752.2010.04.015]
- Yi S L, Deng L, He S L, Zheng Y Q, Wang L, Zhao X Y and Niu TX. 2011. Diagnosis model of Jincheng orange leaf chlorophyll content- based on digital image analysis technique. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 33: 110-115 (易时来, 邓烈, 何绍兰, 郑永强, 王亮, 赵旭阳, 牛廷香. 2011. 锦橙叶片叶绿素含量诊断模型—基于数字图像分析技术. *农机化研究*, 33: 110-115)
- Zarco-Tejada P J, Rueda C and Ustin S L. 2003. Water content estimation in vegetation with MODIS reflectance data and model inver-

- sion methods. *Remote Sensing of Environment*, 85(1): 109-124 [DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00197-9]
- Zarco-Tejada P J, Camino C, Beck P S A, Calderon R, Hornero A, Hernández-Clemente R, Kattenborn T, Montes-Borrego M, Susca L, Morelli M, Gonzalez-Dugo V, North P R J, Landa B B, Boscia D, Saponari M and Navas-Cortes J A. 2018. Previsual symptoms of *Xylella fastidiosa* infection revealed in spectral plant-trait alterations. *Nature Plants*, 4: 432-439 [DOI: 10.1038/s41477-018-0189-7]
- Zarco-Tejada, P J, Diaz-Varela, R, Angileri V and Loudjani P. 2014. Tree height quantification using very high resolution imagery acquired from an unmanned aerial vehicle (UAV) and automatic 3D photo-reconstruction methods. *European Journal of Agronomy*, 55: 89-99 [DOI: 10.1016/j.eja.2014.01.004]
- Zarco-Tejada, P J, Guilléncliment, M L, Hernándezclemente, R, Catalina A, González M R and Martín P. 2013. Estimating leaf carotenoid content in vineyards using high resolution hyperspectral imagery acquired from an unmanned aerial vehicle (UAV). *Agricultural and Forest Meteorology*, 171-172: 281-294 [DOI: 10.1016/j.agrformet.2012.12.013]
- Zeng B B, Zhang X L, Lu C K, Bi H M and Zhu F E. 2008. Current situation and prospects of the research on remote sensing in the monitor of forest pests. *Forest Pest and Disease*, 27(2): 24-29 (曾兵兵, 张晓丽, 路宽宽, 毕华明, 朱凤恩. 2008. 森林病虫害遥感监测研究的现状与展望. *中国森林病虫害*, 27(2): 24-29)
- Zhang F and Zhou G S. 2018. Research progress on monitoring vegetation water content by using hyperspectral remote sensing. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 42: 517-525 (张峰, 周广胜. 2018. 植被含水量高光谱遥感监测研究进展. *植物生态学报*, 42: 517-525) [DOI: 10.17521/cjpe.2017.0313]
- Zhang H, Pan J, Ju Y W and Liao Z F. 2014. Early Detection of Pine Wilt Disease in *Pinus massioniana* with Hyperspectral Data. *Journal of Northeast Forestry University*, 42(11): 115-119 (张衡, 潘洁, 巨云为, 廖振峰. 2014. 基于高光谱数据的马尾松松萎蔫病早期监测. *东北林业大学学报*, 42(11): 115-119) [DOI:10.13759/j.cnki.dlxb.20141106.001]
- Zhang N, Zhang X, Guijun Y, Zhu C, Huo L and Feng H. 2018. Assessment of defoliation during the *Dendrolimus tabulaeformis* Tsai et Liu disaster outbreak using UAV-based hyperspectral images. *Remote Sensing of Environment*, 217: 323-339 [DOI: 10.1016/j.rse.2018.08.024]
- Zhang P, Yang L, Cong J and Shen H L. 2008. A discussion on precision of silviculture technology. *World Forestry Research*, 21(1): 34-39 (张鹏, 杨玲, 丛健, 沈海龙. 2008. 论森林培育技术的精准化. *世界林业研究*, 21(1): 34-39)
- Zhao C J. 2019. Big data of plant phenomics and its research progress. *Journal of Agricultural Big Data*, 1(2): 5-14 (赵春江. 2019. 植物表型组学大数据及其研究进展. *农业大数据学报*, 1(2): 5-14) [DOI: 10.19788/j.issn.2096-6369.190201]
- Zhao J, Han T T, Zhang X X, Li X and Shen X. 2011. Preliminary study of whangkeumbae leaf nutrients status diagnosis by using digital image processing technique. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 27(13): 272-276 (赵静, 韩甜甜, 张鲜鲜, 李欣, 沈向. 2011. 应用数码图像技术对梨树叶片营养诊断的初探. *中国农学通报*, 27(13): 272-276)
- Zhao T X, Guo B, An X M and Zhang W J. 2012. The study of stomatal conductance estimation of *Populus deltoids* Bartr. × *Populus ussuriensis* Kom. by infrared thermography. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 28(31): 65-70 (赵田欣, 郭斌, 安新民, 张文杰. 2012. 美洲黑杨与大青杨杂种叶片气孔导度的红外热像测量方法研究. *中国农学通报*, 28(31): 65-70)
- Zhao X, Burks T F, Qin J W and Ritenour M A. 2009. Digital microscopic imaging for citrus peel disease classification using color texture features. *Applied Engineering in Agriculture*, 25(5): 769-776 [DOI: 10.13031/2013.28845]
- Zhou J, Tardieu F, Pridmore T, Doonan J, Reynolds D, Hall N, Griffiths S, Cheng T, Zhu Y and Wang X E. 2018. Plant phenomics: history, present status and challenges. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 41(4): 580-588 (周济, Tardieu, F., Pridmore, T., Doonan, J., Reynolds, D., Hall, N., Griffiths, S., 程涛, 朱艳, 王秀娥. 2018. 植物表型组学: 发展、现状与挑战. *南京农业大学学报*, 41(4): 580-588) [DOI: 10.7685/jnau.201805100]
- Zhu C H, Qu S and Zhang X L. 2016. *Dendrolimus tabulaeformis* disaster monitoring and analysis of its influencing factors through remote sensing technology. *Journal of Remote Sensing*, 20(4): 653-664 (朱程浩, 瞿帅, 张晓丽. 2016. 油松毛虫灾害遥感监测及其影响因子分析. *遥感学报*, 20(4): 653-664) [DOI: 10.11834/jrs.20165299]
- Zhu X C, Zhao G X, Dong F, Wang L, Lei T and Zhan B. 2009. Monitoring models for phosphorus content of apple flowers based on hyperspectrum. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 20(10): 2424-2430 (朱西存, 赵庚星, 董芳, 王凌, 雷彤, 战兵. 2009. 基于高光谱的苹果花磷素含量监测模型. *应用生态学报*, 20(10): 2424-2430)
- Zhu X C, Zhao G X, Jiang Y M, Wang L, Chen H Y and Wang L. 2011. Estimation of SPAD value of apple leaf in different phenophase based on hyperspectral red edge parameters. *Infrared*, 32(12): 31-38 (朱西存, 赵庚星, 姜远茂, 王凌, 陈红艳, 王利. 2011. 基于高光谱红边参数的不同物候期苹果叶片的SPAD值估测. *红外*, 32(12): 31-38)
- Zhu X C, Zhao G X, Sui X Y, Lei T and Sun D G. 2010. Estimation of kalium content in apple flowers based on spectral analysis technique. *Infrared*, 31: 19-23 (朱西存, 赵庚星, 隋学艳, 雷彤, 孙顶国. 2010. 基于光谱分析技术的苹果花钾素含量估测研究. *红外*, 31: 19-23)
- Zhu X L and Liu D S. 2014. Accurate mapping of forest types using dense seasonal Landsat time-series. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 96: 1-11 [10.1016/j.isprsjprs.2014.06.012]

The status and prospects of remote sensing applications in precision silviculture

ZHOU Kai, CAO Lin

Co-Innovation Center for Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China

Abstract: With the rapid development of the society and economy as well as the growth of population, the contradiction between our country's timber supply and demand is still prominent, and its dependence on foreign countries is high. Faced with limited land resources, there is an urgent need to cultivate forest resources more efficiently and with high quality, and to apply precision silviculture technologies in various links such as directive breeding and intensive management. The multi-platform, multi-angle, multi-mode three-dimensional observation system and quantitative analysis method constructed by modern remote sensing technology are the key technologies for precision silviculture. The integrated and accurate new precision silviculture system, built with remote sensing technology as the core, from soil type analysis, land adaptability evaluation, ecological environment simulation to tree breeding, irrigation and fertilization, forest growth monitoring, pest control, etc., will fully support the overall quality and efficiency improvement of modern forestry as well as the precise improvement of forest quality. This review article first introduces the application status of RGB cameras, multispectral, hyperspectral, LiDAR, thermal infrared and fluorescence sensors in precision silviculture, and makes a comprehensive comparison of their application characteristics and measurement indicators; then, focuses on the use of remote sensing in the three key application directions i.e., high-quality species selection, monitoring and diagnosis of nutrient stress, accurate water and fertilizer sprinkler irrigation, as well as the analysis of the common needs of each application direction; finally, from three aspects, i.e., multi-source remote sensing information fusion, artificial intelligence, Internet of Things and 3S technology integration, and the integrated application of remote sensing data with physiological and ecological models and radiation transmission models, the development trend and application prospects of future remote sensing technology in precision silviculture are analyzed.

Key words: precision silviculture, remote sensing, phenotyping, forest genetics, tree breeding, forest health

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 31922055, 31770590)