



•综述•

基于多源遥感的红树林监测

王 乐^{1,3*} 时 晨¹ 田金炎^{1,2} 宋晓楠¹ 贾明明⁴ 李小娟^{1,2}
刘晓萌¹ 钟若飞^{1,2} 殷大萌³ 杨杉杉¹ 郭先仙¹

1 (首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100048)

2 (首都师范大学北京成像技术高精尖创新中心, 北京 100048)

3 (Department of Geography, University at Buffalo, The State University of New York, 105 Wilkeson Quad, Buffalo, NY 14261, USA)

4 (中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130102)

摘要: 红树林是生长在热带以及亚热带海岸潮间带上的生态群落, 其生产力高, 固碳能力强, 对保持海岸带生物多样性具有十分重要的价值。本文介绍了利用多源遥感数据监测红树林的一些主要研究内容, 分为3个方面: (1)在时空模式研究方面, 利用高空间分辨率影像像素和对象结合的方法对红树林树种进行分类以及利用Landsat影像对红树林进行动态变化监测并分析其驱动因素; (2)在结构参数研究方面, 利用无人机多光谱数据及地面激光雷达数据对红树林叶面积指数进行反演; (3)在生理生化参数研究方面, 探讨了红树林叶绿素含量对淹没状况的响应、互花米草(*Spartina alterniflora*)入侵是否影响红树林光能利用率, 以及光化学反射指数(photochemical reflectance index, PRI)与光能利用率(light use efficiency, LUE)的关系。上述系列研究为提取红树林相关信息要素时如何选择合适的分析方法提供了有力的参考, 强调了遥感在研究红树林时空模式, 提取结构参数和生物生化参数监测的有效性, 从而更好地促进红树林生态系统的生物多样性保育工作。

关键词: 红树林; 生物多样性; 多源遥感; 树种分类; 入侵物种

Researches on mangrove forest monitoring methods based on multi-source remote sensing

Le Wang^{1,3*}, Chen Shi¹, Jinyan Tian^{1,2}, Xiaonan Song¹, Mingming Jia⁴, Xiaojuan Li^{1,2}, Xiaomeng Liu¹, Ruofei Zhong^{1,2}, Dameng Yin³, Shanshan Yang¹, Xianxian Guo¹

1 College of Resources Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China

2 Beijing Advanced Innovation Center for Imaging Technology, Capital Normal University, Beijing 100048, China

3 Department of Geography, University at Buffalo, The State University of New York, 105 Wilkeson Quad, Buffalo, NY 14261, USA

4 Laboratory for Wetland Ecology and Environment, Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, China

Abstract: Mangrove forests are ecological communities growing in the intertidal zone of tropical and subtropical coastlines. Due to their high productivity, mangrove forests are essential to persistence of biodiversity along coastlines and have high carbon sequestration ability. In this article we review aspects of monitoring mangrove forests using recent multi-source remote sensing data. First, we reviewed studies on monitoring mangrove dynamics. By integrating object-based and pixel-based classification, high spatial resolution images were used to classify different mangrove species. Landsat images were then used to monitor the dynamics of mangrove forests and analyze factors driving them. Second, we reviewed studies measuring structural parameters of mangroves. Specifically, unmanned aerial vehicle multispectral data and ground-based Light Detection and Ranging (LiDAR) data were used to compute leaf area index of mangrove forests. Finally, we reviewed studies examining physiology and biochemistry parameters. These studies explored adaption of chlorophyll content in mangrove forests under different submergence conditions, whether the invasive species *Spartina alterniflora* affects the light use efficiency and changed the response of photochemical reflectance

收稿日期: 2018-03-02; 接受日期: 2018-08-05

基金项目: 科技创新服务能力建设——基本科研业务费(025185305000/199; 025185305000/211)和国家自然科学基金(41601363)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: lewang@buffalo.edu

index (PRI) to LUE. Our review provides a useful reference for selecting appropriate analytical methods when extracting information of mangroves from remotely sensed data. We emphasize the effectiveness of remote sensing in studying mangrove spatiotemporal patterns, extracting structural parameters, monitoring biochemical parameters, thus aiding efforts to conserve mangrove ecosystems.

Key words: mangrove; biodiversity; multi-source remote sensing; species classification; invasive species

红树林(mangrove/mangrove forest)是生长在热带、亚热带海岸潮间带或河流入海口的木本植物群落,是适应陆地与海洋过渡带的一种特殊森林类型,被誉为“海岸卫士”、“造陆先锋”、“生物净化筛”。红树林与海岸湿地、上升流和珊瑚礁并称为最具生命力的四大海洋自然生态系统,是国际上湿地生态保护和生物多样性保护的重要对象(邓国芳, 2002; 林鹏, 2003)。由于其独特的海陆过渡特性,红树林已成为海平面升高和海岸线变迁的重要研究对象,同时对全球环境、气候变化也具有重要的指示意义,已作为重要的海岸湿地类型列入《湿地公约》制订的湿地分类系统(陆健健, 1996; 赵焕庭和王丽荣, 2000; Seto & Fragkias, 2007)。同时,红树林具有极大的社会、经济、生态价值,它能够稳固海岸线、防风护堤、净化水质,为当地居民提供重要的社会经济服务和森林产品,包括鱼虾繁殖和饵料基地,作为食用、药用、建筑材料以及燃料等,在防灾减灾、维持海岸带生态平衡、保护海洋生物多样性、发展生态旅游、开展科学研究等方面也起着重要的作用,是大自然赐予人类的宝贵财富(黄桂林, 1996; 林鹏, 1997; 毛丽君, 2011^①)。

由于红树林生长在潮间带,且郁闭度高,地面调查不仅需要投入大量的时间及人力,而且所能调查到的空间范围和时效都具有很大的局限性,无法满足大面积红树林监测的迫切需求(Spalding et al, 2010; Dronova, 2015)。而遥感技术具备覆盖范围广、数据更新快、相对造价低等特点,填补了红树林监测中数据缺失的空白(Giri, 2016; Jia et al, 2016)。随着遥感技术的迅速发展,遥感数据分辨率不断提高,已经能够有效获取细碎斑块状分布红树林的光谱及结构特征,为红树林研究提供及时、可靠的数据来源(李春干, 2013; Guo et al, 2017)。因此,遥感已成为国内外红树林监测的重要手段(Claudia et al, 2011; 朱耀军等, 2012; 孙永光等, 2013)。本文介绍

了近年来利用多源遥感数据监测红树林的主要进展: (1)利用中、高分辨率卫星影像研究红树林的时空分布模式; (2)利用无人机、激光雷达数据研究红树林结构参数; (3)利用高光谱数据研究红树林的生理生化参数,为红树林生态系统监测提供合适的分析方法。

1 基于中、高分辨率卫星遥感的红树林时空演变监测方法

1.1 基于高分遥感影像的红树林种间分类制图

在2000年之前,遥感方法已被广泛用来进行土地覆盖类型制图,但在红树林分类制图方面应用较少。当时的少数相关研究多集中于讨论红树林与非红树林之间的区分,很少涉及到红树林物种间的分类(李伟等, 2008; Jia et al, 2014a, b)。Venkataratnam和Thammappa (1997)使用Landsat多光谱扫描仪(MSS)影像对印度安得拉邦沿海的红树林进行了绘制。Rasolofoharinoro等(1998)使用SPOT图像(SPOT 1, 2),对马达加斯加的红树林进行了详细的绘图。Gao (1998)开发了一个基于SPOT遥感图像的两层分类方法,并将其应用于新西兰奥克兰威特马塔港的红树林制图,对红树林与非红树林土地覆盖类型的分类制图精度达到81.4%。Green等(1998)使用5种不同的分类方法,对比了SPOT XS、Landsat TM、CASI三种类型的数据在红树林物种分类制图上的适用性。Gao (1999)使用SPOT XS和Landsat TM,分别在10 m、20 m和30 m的空间分辨率上进行了红树林与非红树林之间的分类图绘制精度的比较研究。这些研究表明, Landsat TM数据可以用于红树林和非红树林的分类,但Landsat MSS和SPOT XS数据空间分辨率无法对红树林种间进行准确区分;因为红树林树种级别的斑块尺寸较小,无法在比30 m的空间分辨率还粗的情况下进行红树林物种间分类。

2000年左右高分遥感卫星的出现克服了以上传统遥感影像的空间分辨率较低和光谱不可分的缺陷,使红树林种间分类高精度制图成为可能。对

① 毛丽君 (2011) 基于遥感的广东湛江红树林湿地动态变化研究. 硕士学位论文, 南京林业大学, 南京.

比Landsat TM、SPOT、CASI等传统遥感影像,发现IKONOS高分图像能够提供更高精度的海洋环境专题制图,使用IKONOS图像全色波段提取的二阶纹理信息,有效提高了不同年龄冷杉(*Pseudotsuga*)森林的分类精度(Franklin et al, 2001; Mumby & Edwards, 2003)。但这期间未有人使用IKONOS和QuickBird进行红树林生态系统的土地覆盖分类制图,因此有必要对高分卫星影像在红树林与非红树林及红树林种间分类的能力进行评估。

Wang等(2004a)首创基于像素和面向对象相结合的分类方法,使用IKONOS高分影像对红树林进行了种间分类制图。结果表明:IKONOS在红树林与非红树林及红树林种间分类中均表现优秀,平均分类精度高达91.4%;相比基于像素的分类,面向对象的分类在最优尺度上可以提高具有光谱混合性的不同红树林树种的可分性;基于像素和面向对象结合的方法的分类制图精度优于单独使用基于像素或面向对象方法的精度。Wang等(2004b)结合空间和光谱信息,首次对IKONOS和QuickBird高分影像在红树林生态系统种间分类制图的效果进行了对比。结果表明:使用基于像素的方法时,在多光谱波段IKONOS的分类准确度比QuickBird略高,而在全色波段二者分类精度相差不大;考虑纹理特征的情况下,IKONOS的分类性能优于QuickBird。另外,当采用基于对象的分类时,IKONOS和QuickBird在红树林种间分类制图中均有出色表现。在最近的研究中,Wang等(2015)和Satyanarayana等(2018)分别利用高分辨率影像Worldview-3和10 m空间分辨率的ALOS影像进行了红树林种间分类,并取得了较理想的分类结果,进一步显示出高分遥感影像对于红树林种间分类能力。

1.2 基于Landsat影像的红树林变化及其驱动因素分析

近半个世纪以来,人类的砍伐、水文条件的改变、气候变化和水域污染等因素导致红树林资源急剧减少,全球35%的红树林消失(Blasco et al, 2001; Valiela et al, 2001)。按照这种趋势,全球红树林将在100年内全部消失(Duke et al, 2007)。在过去50年中,中国红树林面积从20世纪50年代的 4.2×10^4 ha (范航清和梁士楚, 1995)下降至2000年的 2.2×10^4 ha (Jia et al, 2014a),其减少速率远大于全球红树林的平均速度。有效加强我国红树林保护、管理和生态

恢复工作已刻不容缓。

要对红树林进行深入的研究和系统的管理与保护,必须准确摸清其面积、分布、结构和组成等现状以及各时期的变化情况。欧美发达国家因技术领先,在利用遥感技术对红树林湿地进行调查与评估等方面的研究起步稍早。Lorenzo等(1979)利用Landsat MSS数据监测了菲律宾三宝颜市红树林湿地的退化情况,首次将遥感技术应用于红树林湿地动态变化监测中。我国红树林的相关研究开展得比较晚。国内红树林遥感监测始于20世纪90年代,并从2007年开始呈显著上升趋势(孙永光, 2013)。当前所有红树林研究中所使用的遥感信息源包括航空摄影数据、中分辨率光学卫星数据、高分辨率数据、机载高光谱数据和雷达数据(Claudia et al, 2011)。Landsat系列卫星数据由于其分辨率适中,获取免费,是目前为止红树林湿地面积评估和遥感监测中应用最多的数据源(李春干, 2002; 王胤等, 2006)。传统的红树林遥感分类方法主要有:目视解译(邓国芳, 2002)、监督分类和非监督分类(黄桂林, 1996)、专家分类(Liu et al, 2008)、波段组合(Kovacs et al, 2004)与多时相线性变换等。除了传统的面向像元分类方法,近年来新兴的面向对象分类方法也越来越广泛地应用于红树林制图中。Conchedda等(2008)利用SPOT XS数据和面向对象分类方法对塞内加尔Low Casamance地区进行了土地覆盖制图,结果表明,面向对象方法使得包括红树林在内的所有土地覆盖类型都得到了非常好的分类精度。Jia等(2014a)利用面向对象方法和Landsat数据对中国东南沿海2010年红树林进行遥感制图,红树林湿地的分类精度达到90%以上。

贾明明等(2014)选择典型广西海岸区域,以Landsat为数据源,应用面向对象和决策树分类方法对1973年、1980年、1990年、2000年和2010年广西红树林的面积变化和驱动因素进行分析。研究结果显示,过去40年中,红树林与周边其他景观类型转化频繁,1973–1980年红树林面积减小2,999 ha。其中984 ha转化为耕地,759 ha转化为滨海盐沼,随后这些盐沼也被开垦为耕地。1981–2000年,红树林面积急剧增加,其中3,403 ha的滨海盐沼被人工改造为红树林。2000–2010年,红树林面积稍有减小。通过对红树林面积变化的驱动因素分析发现,引起红树林退化的主要原因是围海造田、围塘养殖和海岸

工程建设; 1980–2000年增加的红树林主要为人工栽植; 2000–2010年红树林面积的减少主要是因为病虫害、极端天气(冻害)和外来物种入侵。与其他亚洲国家海岸地区相比, 广西水产养殖业发展占用的红树林面积较小, 主要原因是当地养殖业发展滞后, 在大规模开发养殖池时, 红树林管理和保护的法律法规已建立, 红树林管理和保护工作已得到当地政府的重视。

2 基于无人机多光谱与地面激光雷达遥感的红树林叶面积指数反演方法

2.1 基于无人机遥感的复杂环境下红树林叶面积指数方法

无人机平台以极高的空间分辨率和灵活的采集周期等特点提供了各种经济有效的遥感数据, 包括真彩色、多光谱、高光谱、激光雷达、微波和热红外等(Hardin & Jensen, 2011; 田金炎等, 2014; Bhardwaj et al, 2016; Tian et al, 2016)。无人机遥感的飞行高度、观测角度及影像间重叠度比其他传统卫星遥感都更加灵活可控(Anderson & Gaston, 2013; 田金炎等, 2013; Ma et al, 2014; Candiago et al, 2015)。目前, 已有一些研究利用无人机真彩色或多光谱图像来反演植被叶面积指数(Córcoles et al, 2013; Song, 2013; Verger et al, 2014; Kalisperakis et al, 2015)。这里将已有方法分成两大类: 植被分类法和植被指数法。

植被分类法是利用植被和背景的分类结果来反演叶面积指数, 植被所占每个样方的比例越大则叶面积指数越大(Córcoles et al, 2013)。但该方法的效果受限于分类结果的精度, 往往只适用于背景简单、类型单一的植被, 在背景和植物种类复杂的海岸带红树林生中很难取得满意的效果(Tian et al, 2017a)。除了受分类结果精度的限制之外, 混合像元现象也会影响叶面积指数的反演精度, 无论无人机多光谱图像的分辨率有多高, 都不能保证每个像元全是纯净像元, 两类地物交界处仍存在大量混合像元, 如叶子边缘等。植被指数法是利用无人机图像的光谱信息来计算植被指数, 然后建立植被指数和叶面积指数之间的关系模型, 最常用的是归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)。Lelong等(2008)发现10种小麦的平均NDVI与叶面积指数的相关性都很强。Berni等(2009)和

Kalisperakis等(2015)首先对无人机多光谱图像进行分类, 将其分为植被和背景两部分; 然后仅利用植被像素计算样方尺度的平均NDVI, 进而估算玉米和葡萄园的叶面积指数。这种仅利用植被部分像素计算的NDVI比样方尺度的平均NDVI的反演效果要好, 主要是因为它在一定程度上消除了背景的影响。但是, 该方法仍然受限于分类结果的精度。

无人机作为一种灵活的高空间、高时间分辨率的遥感数据获取手段, 已在农业叶面积指数反演方面取得了一系列成果。但在海岸带红树林中, 复杂的背景和植被种类加大了叶面积指数反演的难度, 目前仍未有相关研究报道。因此, 有必要利用植被指数法找到一种适用于海岸带红树林的叶面积指数反演方法, 克服子复杂背景和树种给叶面积指数带来的影响(Tian et al, 2017b)。3种最具代表性的NDVI被分别用于红树林叶面积指数反演, 分别是: 样方内的平均NDVI (average NDVI, AvNDVI)、去掉背景后只利用植被部分计算出的平均NDVI (vegetated specific NDVI, VsNDVI)和一种经过拉伸的NDVI (Scaled NDVI, ScNDVI)。对比结果显示ScNDVI的效果要明显优于其他两种方法, 这主要是因为ScNDVI经过拉伸后, 不仅改善了背景对叶面积指数反演的影响, 还有效抑制了植被种类复杂的影响。总之, 无人机在红树林叶面积指数反演方法上具有巨大的应用潜力, 它提供了一种便捷、低成本的数据获取手段, 是未来研究的一个热点。

2.2 基于地面激光雷达的植被遮挡指数在密集红树林叶面积指数上的反演方法

地面激光雷达(terrestrial laser scanning, TLS)因其能够快速精确地获取植被详细的三维结构信息而被当作获取地面实测叶面积指数(leaf area index, LAI)的一种工具, 已被广泛应用于各类植被中, 如灌木、乔木、阔叶林等(Hosoi & Omasa, 2006; Zheng & Moskal, 2012a; Zhao et al, 2015)。本文中, 我们将现有的关于地面激光雷达估测叶面积指数的方法分为两组: 经验统计模型和基于比尔定律的泊松模型。基于经验统计模型的相关研究很少(Greaves et al, 2015; Olsoy et al, 2016), 这类算法是通过建立其他参数(如植株的体积、地上生物量、冠层间隙度)与叶面积指数之间的关系来间接获取叶面积指数, 其估测方法更多使用其他数据源, 如机载激光雷达(Tian et al, 2017b)。

Beer-Lambert定律是现今TLS估测LAI主流算法的理论依据(Zhao et al, 2015)。利用此理论计算LAI需要计算冠层间隙度。按照植株冠层间隙度的算法, 又可以将TLS估测LAI的方法分为基于三维冠层间隙度的估测方法以及基于二维冠层间隙度的估测方法(Danson et al, 2007; Zheng & Moskal, 2012b; Zheng et al, 2013; Li et al, 2017)。虽然TLS技术成功应用到许多植被, 但精确估测LAI依赖于全面的点云数据(point cloud data, PCD)。而利用TLS获取数据时, 往往会因为遮挡的原因导致获取的数据源三维结构信息不够全面(在这里, 我们定义为质量差的数据源)。在实际研究中, 往往通过布设合适的站点来降低遮挡的影响, 如多站点扫描方式(Greaves et al, 2015)、自下而上的扫描方式(Zheng & Moskal, 2012a)。一些实验也探讨了不同站点的布设带来的遮挡对估测结果的影响。Zheng等(2012b)探讨了站点的放置位置、站点的个数以及仪器参数的设置对LAI估测值的影响, 结果显示多站点数据估测的LAI值是单站点数据估测值的2倍; 同时, 认为中心单站点和额外的侧面站点相结合的方法可以获取完整或近似完整的林分结构信息的数据源。van der Zande等(2006)总结了TLS仪器的参数和放置位置对人工盆栽LAI估测的影响, 认为单方向的扫描方式不足以获取全面的TLS数据。然而在茂密、低矮的红树林环境中, 即使采用上述的扫描方式, 仍然会出现遮挡, 甚至会出现根本就无法进行多站点布设的情况。这样极易导致获取的数据源质量出现好坏不一。因此, 能够筛选出全面或接近全面的点云数据是精确估测LAI的关键。然而, 并没有量化评估数据质量的相关研究。针对这种情况, 我们提出植被遮挡指数(vegetation occlusion index, VOI), 利用该指数量化评估数据源的质量。我们将其定

义为: 真实场景中的植被在水平面上的投影面积和地面激光雷达扫描植被在水平面上的投影面积之差与真实场景中植被水平面上的投影面积之比。其值范围为0–1, 值越小, 数据源质量越高, 数据源三维结构信息越接近全面。

我们基于TLS点云数据和消费者无人机(consumer unmanned aerial vehicle)光学影像数据计算了102个以5 m为半径的圆形样本的VOI。同时, 基于PCD计算了102个样本的有效叶面积指数。在本次实验中, 我们探索了新的评价参数(即植被遮挡指数, VOI)挑选出好质量数据的能力以及TLS技术估测红树林LAI的能力。结果显示(表1): (1)随着设置的VOI值的增加, 估测LAI与野外实测LAI之间的相关性系数 R^2 整体呈下降的趋势, 且VOI的值在0.35附近时, R^2 急剧下降; (2)以阈值0.3为临界值, 随着VOI的值增加, 相关性系数 R^2 的最高值仅为0.5 ($\text{VOI} = 0.35$), 随着VOI的值降低, 相关性系数 R^2 的最低值能达到0.67 ($\text{VOI} = 0.3$)。上述结果说明VOI能够用来筛选出质量好的数据源; 当数据源质量好时, TLS技术能够用来精确估测红树林叶面积指数。

3 红树林生理生化参数反演方法

3.1 基于高光谱指数的红树林光能利用率反演研究

红树林生态系统像热带雨林一样具有很高的生产力(Heumann, 2011), 是海湾河口生态系统重要的第一生产力。因此, 定量估算其初级生产力对于准确监测全球碳循环动态变化具有重要意义。用光学遥感估算陆地生态系统初级生产力最主要的方法是基于光能利用率(light use efficiency, LUE)模型(Song, 2013)。而植被光能利用率是该模型中的一个重要输入参数, 因此准确估计LUE对于植被生理生态学研究有重要意义(陈晋等, 2008)。现有的光能利

表1 通过不同范围的植被遮挡指数(VOI)筛选出的样本个数(plot)以及通过该样本数据估测的叶面积指数(LAI)与实测LAI之间的 R^2 , RMSE, %RMSE

Table 1 The R^2 , RMSE (root-mean-square error), % RMSE (a percentage between RMSE and the mean value of the field LAI) between LAI estimated from terrestrial laser scanning (TLS) and LAI from LAI2200 PCA, and the number of plots under the different threshold of vegetation occlusion index (VOI)

VOI≤	0.10	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90
R^2	0.73	0.70	0.72	0.67	0.50	0.35	0.31	0.21	0.21	0.22	0.15
RMSE	0.277	0.292	0.27	0.264	0.288	0.312	0.329	0.347	0.346	0.349	0.374
% RMSE	16.77	17.88	17.20	17.23	18.54	20.12	21.72	22.56	22.68	23.06	24.47
Plot	9	16	19	25	35	46	65	85	93	97	102

用率模型一般考虑通过环境条件变化对最大光能利用率的胁迫求取实际光能利用率。然而实际光能利用率与环境的关系十分复杂, 实际光能利用率不仅与温度、水分条件有关, 而且与植被的叶面积指数等因素密切相关。大部分模型中实际光能利用率的求取方法过于简单, 由此可能极大地错误估计植被初级生产力(Turner et al, 2003)。在站点尺度上, 涡度相关测量数据既可以提供较为准确的估算光能利用率的数据基础, 又可以作为光能利用率估算结果的主要验证数据, 但是该技术难于将站点尺度的结果升至更大范围(张乾, 2016)。遥感技术彻底改变了估算陆地生态系统初级生产力的方式, 特别是在大陆和全球范围内。遥感具有观测范围广、时效性强、获取数据具有综合性、信息量大等优点, 可以快速、准确地估算植被生理参数, 对各尺度生态系统进行宏观监测, 可以大大提高红树林光合作用及研究的技术含量和工作效率。因此, 如何利用遥感手段准确估算植被光能利用率, 是光能利用率模型应用所必须解决的一个问题。

随着高光谱遥感数据的获取和使用, 位于可见光和近红外区域的狭窄波段可以更加准确地捕捉到植被叶片反射率的细微变化, 也促进了光能利用率反演方法的发展。近年来, 越来越多的研究发现光化学反射指数(photochemical reflectance index, PRI)在直接估计实际光能利用率方面具有极大的潜力。Gamon 等(1990, 1992)等在观察向日葵(*Helianthus annuus*)的生理生化特性时首次观察到并提出PRI, 即利用531 nm处的光谱变化估算光能利用率。很多人研究了不同植物PRI和光合参数之间的关系, 认为PRI为光能利用率的评估提供了一个简单可行的方法(Weng et al, 2006)。虽然PRI与各种光合参数的关系得到了很好的证明, 但是这种关系会随植物类型和时间尺度变化, 在受到严重压力胁迫(例如干旱)时会发生显著变化(Garbulaky et al, 2011; Gamon, 2015; Fr  chette et al, 2016)。而它们的关系在生产力较高的红树林生态系统仍然很少被探索, 可能与潮汐环境增加了测定难度有关。Nichol等(2006)对不受潮汐影响的红树林进行了实地研究, 首次证明了PRI和实际光化学量子效率(Φ PSII)之间的关系显著。Song等(2011)发现红树林种植区的土壤盐分和PRI之间有显著的关系, 展现出利用高光谱数据估算红树林生产力及评价红树林

健康状况的潜力(Wang & Sousa, 2009)。

我们使用便携式光合作用系统(LI-6400, LI-COR, USA)和野外高光谱测量仪(ASD FieldSpec 4, ASD, USA)分别获取红树林的光合数据和高光谱数据, 探索了受到潮汐作用的红树林PRI与LUE的关系。首先评估了未受入侵种互花米草(*Spartina alterniflora*)影响的天然红树林白骨壤(*Avicennia marina*)和桐花树(*Aegiceras corniculatum*)的PRI与LUE的相关关系, 其次研究了互花米草对红树林LUE及LUE-PRI关系的影响。结果表明: (1)天然红树林PRI与LUE有着显著的指数关系, 相关系数 R^2 达到0.5729, 而单物种的白骨壤和桐花树LUE-PRI相关系数分别是0.57和0.56, 再次证明PRI是一个良好的光合参数预测者; (2)互花米草入侵使得红树林LUE值及LUE-PRI相关性降低: 白骨壤LUE-PRI的相关系数从0.57下降到0.47, 桐花树的从0.56下降到0.42 (图1)。互花米草对桐花树的LUE、PRI及二者关系影响更大, 反映出桐花树对外界胁迫更为敏感(图2)。此研究能够为红树林提供光合参数的有效测量, 是未来评估红树林生态系统光合能力及生产力的重要基础, 同时也是分析入侵物种互花米草对红树林造成干扰的重要方面(Yang et al, 2018)。

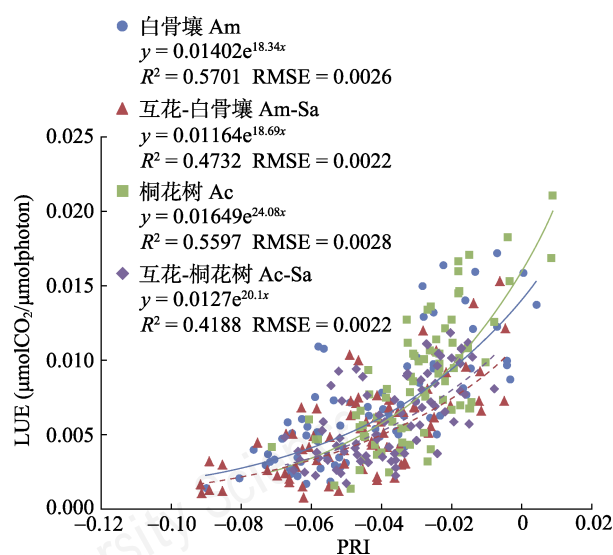


图1 白骨壤、互花米草影响下的白骨壤(简称互花-白骨壤)、桐花树、互花米草影响下的桐花树(互花-桐花树)等4种研究对象的光化学发射指数(PRI)与光能利用率(LUE)关系(引自Yang et al, 2018)

Fig. 1 LUE-PRI relationship of the four types of mangrove trees, i.e. *Avicennia marina* (Am), *Avicennia marina* affected by *Spartina alterniflora* (Am-Sa), *Aegiceras corniculatum* (Ac), *Aegiceras corniculatum* affected by *Spartina alterniflora* (Ac-Sa). Adopted from Yang et al (2018).

3.2 基于Landsat 8影像对不同淹没状况下的红树林冠层叶绿素含量的研究

作为环境压力的指示器,叶绿素在一定程度上能够反映植被的健康状况。研究不同季节和不同淹没状况对红树林冠层叶绿素含量的影响,有助于红树林造林时间和区域的选择,也有助于应对海平面上升带来的胁迫。在遥感领域,植被的叶绿素含量通常被分为两个尺度:叶片叶绿素尺度和冠层叶绿素尺度。

叶片叶绿素尺度的研究主要集中在叶绿素含量的无破坏估测。基于遥感的无破坏估计主要包括两种方法:叶绿素荧光法和叶片光谱特征法。国际上, Lichtenthaler和Buschmann (1987)认为叶绿素荧光发射光谱的比率(F685/F735)能够反映叶片中叶绿素的含量。利用叶片光谱特征法来估测叶绿素含量的模型通常分为3类:光谱指数模型、叶片辐射传输模型和统计回归模型。辐射传输模型需要一些辅助信息(如叶片厚度、叶片角度等),但这些信息就红树林来说很难获取。光谱指数模型可以快速获取红树林叶片叶绿素含量,但受叶片种类、结构及组分等因素的影响,其估测精度较低。统计回归具有较高精度,但模型的训练和计算需要大量时间。偏最小二乘回归(partial least squares regression, PLSR)作为统计回归模型的一种,在生化参数反演中具有良好的稳定性和计算能力。因此,一般选择PLSR模型来拟合红树林叶片叶绿素和叶片光谱之间的关系。

冠层叶绿素含量是由叶片叶绿素和叶面积指

数(LAI)的乘积决定的。Gitelson等(2005)利用高光谱数据成功估测了玉米的冠层叶绿素含量; Schlemmer (2013)发现来自Sentinel-2的红边叶绿素指数能够用来估测玉米冠层叶绿素含量; Pastor-Guzmann (2015)利用Landsat 8多光谱数据在景观尺度上对红树林叶绿素进行估测; Heenkenda等(2015)利用WorldView-2高光谱影像通过随机森林模型实现了红树林冠层叶绿素的估测。国内在利用遥感进行冠层叶绿素反演方面,多集中于地面高光谱数据的反演,卫星尺度的研究较少,关于红树林冠层叶绿素反演的研究目前还少有报道。

对红树林来说,叶绿素含量与环境因素有关。生态方面的研究表明,潮汐淹没时红树林生长和生理状况会受到影响(Ye et al, 2003; Chen et al, 2005; He et al, 2007)。我们考虑了种类、季节和淹没状况这3种因素,通过传统的实地调查方法对红树林种类直接进行记录。针对红树林的淹没状况因其相对于潮高基准面的高程不同而存在差异的情况,提出了一种新的提取红树林淹没状况的方法——结合Landsat 8多光谱影像和潮汐数据,利用修正归一化水体指数(modified normalized difference water index, MNDWI)来提取。研究区4年平均潮位为538 cm,选取潮位为537 cm (接近538 cm)的Landsat 8影像将研究区划分出经常被淹没区域和很少被淹没区域。

我们利用PLSR模型从叶片光谱中推断出红树林叶片叶绿素含量,并获得较高的精度(平均值 $R^2 = 0.869$)(图3)。此外,红树林绿色叶绿素指数(green

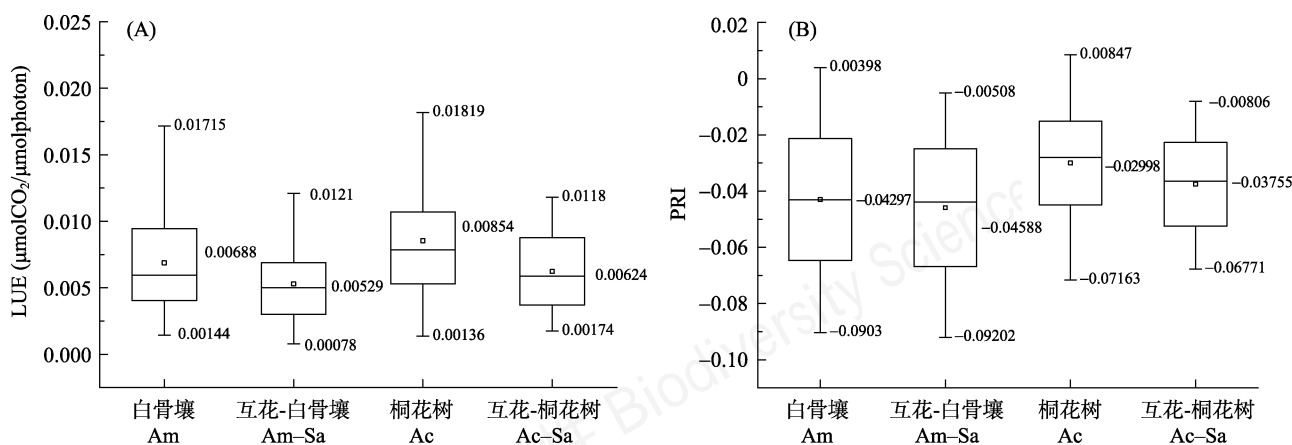


图2 4种类型红树林的光能利用率(LUE) (A)与光化学发射指数(PRI) (B)

Fig. 2 The light use efficiency (LUE) (A) and photochemical reflectance index (PRI) (B) of four types of mangrove trees. Am, *Avicennia marina*; Sa, *Spartina alterniflora*; Ac, *Aegiceras corniculatum*; Am-Sa, *Avicennia marina* affected by *Spartina alterniflora*; Ac-Sa, *Aegiceras corniculatum* affected by *Spartina alterniflora*.

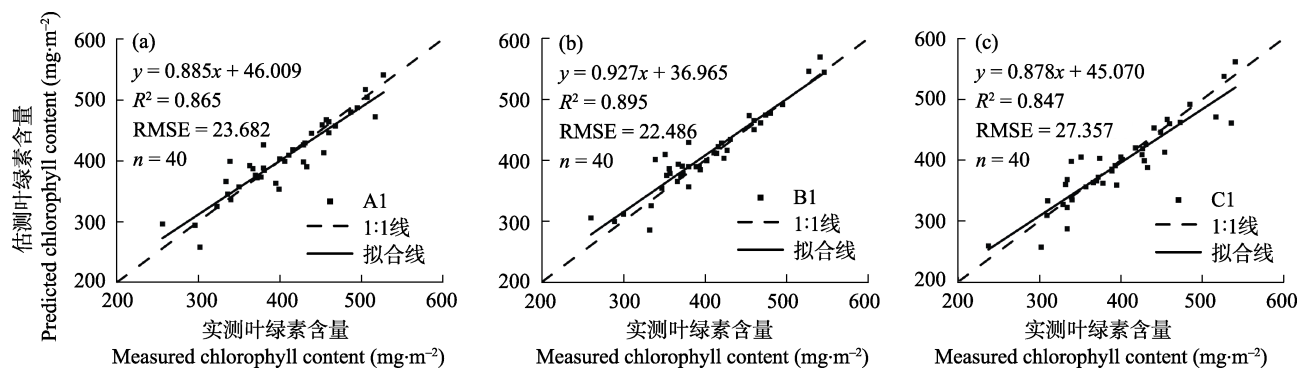


图3 分别利用数据集A、B和C构建的PLSR模型的独立验证图。实线表示拟合线, 虚线表示1:1线

Fig. 3 Independence verification of PLSR based on dataset a, b and c. The solid line represents the regression line, and the broken black line represents the 1:1 line.

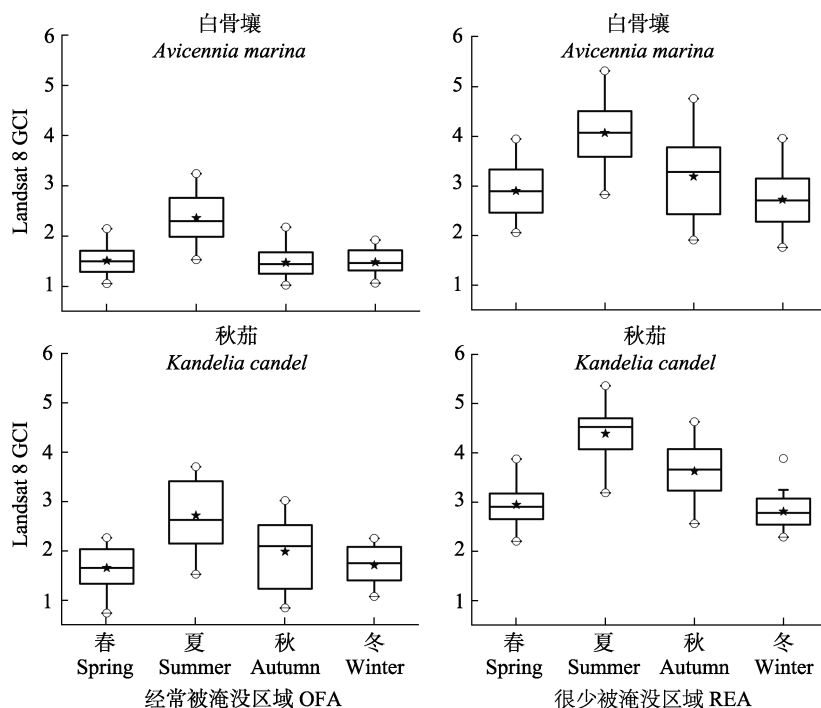


图4 基于种类和季节的不同淹没状况的绿色叶绿素指数(GCI)分布箱体图。每个箱体包含第一四分位数到第三四分位数; 箱体中的粗线表示中位数, 星点表示平均值, 而空白点表示异常值。

Fig. 4 Green chlorophyll index (GCI) distribution of the submerged level based on two mangrove species for four seasons. Each box embodies the first as well as the third quartile, and whiskers are located at 1.5 times the interquartile range. The bold line represents the median in the middle of the box. OFA, Often flooded area; REA, Rare flooded area.

chlorophyll index, GCI)在估测红树林冠层叶绿素方面表现出强大的能力($R^2 = 0.7635$), 被认为是能够反映红树林冠层叶绿素含量变化的最佳指数。无论是区分种类和季节, 经常被淹没区域和很少被淹没区域的红树林GCI指数分布均极为显著($P < 0.001$), 且前者的平均GCI值比后者的小。此外, 红树林GCI指数的分布在夏季和其他3个季节之间存在极为显著的差异($P < 0.001$), 而冬季和春季之间无显著差异($P < 0.001$); 夏季的平均GCI值最高, 春

季和冬季最低(图4)。

4 总结

本文从三方面介绍了利用多源遥感数据监测红树林的一些主要研究内容: 在时空动态变化监测方面, 提出了基于高分辨率像素与对象结合的分类方法, 对比了IKONOS和QuickBird在红树林种间分类的效果, 利用Landsat影像对红树林进行动态变化监测并分析其驱动因素; 在结构参数研究方面, 利

用无人机多光谱数据及地面激光雷达数据对红树林叶面积指数进行反演;在生理生化参数研究方面,探讨了红树林叶绿素含量对淹没状况的响应及互花米草入侵是否影响了红树林光能利用率,是否改变了PRI对LUE的响应。文中提到的为提取红树林的相关信息要素时如何选择合适的分析方法提供了参考,强调了遥感在研究红树林时空模式,提取结构参数和生物生化参数监测的有效性,从而更好地促进红树林生态系统的生物多样性保育工作。

参考文献

- Anderson K, Gaston KJ (2013) Lightweight unmanned aerial vehicles will revolutionize spatial ecology. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 11, 138–146.
- Berni JAJ, Zarco-Tejada PJ, Suarez L, Fereres E (2009) Thermal and narrowband multispectral remote sensing for vegetation monitoring from an unmanned aerial vehicle. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Society*, 47, 722–738.
- Bhardwaj A, Sam L, Akanksha, Martín-Torres FJ, kumer R (2016) UAVs as remote sensing platform in glaciology: Present applications and future prospects. *Remote Sensing of Environment*, 175, 196–204.
- Blasco F, Aizpuru M, Gers C (2001) Depletion of the mangroves of Continental Asia. *Wetlands Ecology and Management*, 9, 255–266.
- Candiago S, Remondino F, Giglio MD, Dubbini M, Gattelli M (2015) Evaluating multispectral images and vegetation indices for precision farming applications from UAV images. *Remote Sensing*, 7, 4026–4047.
- Chen J, Tang YH, Chen XH, Yang W (2008) The review of estimating light use efficiency through photochemical reflectance index (PRI). *International Journal of Remote Sensing*, 12, 331–337. (in Chinese with English abstract) [陈晋, 唐艳鸿, 陈学泓, 杨伟 (2008) 利用光化学反射植被指数估算光能利用率研究的进展. *遥感学报*, 12, 331–337.]
- Chen LZ, Wang WQ, Lin P (2005) Photosynthetic and physiological responses of *Kandelia candel* L. Druce seedlings to duration of tidal immersion in artificial seawater. *Environmental and Experimental Botany*, 54, 256–266.
- Claudia K, Andrea B, Steffen G, Tuan Vo Q, Stefan D (2011) Remote sensing of mangrove ecosystems: A review. *Remote Sensing*, 3, 878–928.
- Conchedda G, Durieux L, Mayaux P (2008) An object-based method for mapping and change analysis in mangrove ecosystems. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 63, 578–589.
- Córcoles JI, Ortega JF, Hernández D, Moreno MA (2013) Estimation of leaf area index in onion (*Allium cepa* L.) using an unmanned aerial vehicle. *Biosystems Engineering*, 115, 31–42.
- Danson FM, Hetherington D, Morsdorf F, Koetz B, Allgower B (2007) Forest canopy gap fraction from terrestrial laser scanning. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 4, 157–160.
- Deng GF (2002) Application of remote sensing technology in the investigation of mangrove resources. *Central South Forestry Inventory and Planning*, 21(1), 27–28. (in Chinese) [邓国芳 (2002) 遥感技术在红树林资源调查中的应用. *中南林业调查规划*, 21(1), 27–28.]
- Dronova I (2015) Object-based image analysis in wetland research: A review. *Remote Sensing*, 7, 6380–6413.
- Duke NC, Meynecke JO, Dittmann, S, Ellison AM, Anger K, Berger U, Cannicci S, Diele K, Ewel KC, Field CD, Koedam N, Lee SY, Marchand N, Lee SY, Marchand C, Nordhaus I, Dahdouh-Guebas F (2007) A world without mangroves? *Science*, 317, 41.
- Fan HQ, Liang SC (1995) Mangrove Research and Management in China. Science Press, Beijing. (in Chinese) [范航清, 梁士楚 (1995) 中国红树林研究与管理. 科学出版社, 北京.]
- Franklin SE, Wulder MA, Gerylo GR (2001) Texture analysis of IKONOS panchromatic data for Douglas-fir forest age class separability in British Columbia. *International Journal of Remote Sensing*, 22, 2627–2632.
- Fréchette E, Chang CY, Ensminger I (2016) Photoperiod and temperature constraints on the relationship between the photochemical reflectance index and the light use efficiency of photosynthesis in *Pinus strobus*. *Tree Physiology*, 36, 311.
- Gamon JA (2015) Optical sampling of the flux tower footprint. *Biogeosciences Discussions*, 12, 4973–5014.
- Gamon JA, Field CB, Bilger W, Björkman O, Fredeen A, Peñuelas J (1990) Remote sensing of the xanthophyll cycle and chlorophyll fluorescence in sunflower leaves and canopies. *Oecologia*, 85, 1–7.
- Gamon JA, Peñuelas J, Field CB (1992) A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency. *Remote Sensing of Environment*, 41, 35–44.
- Gao J (1998) A hybrid method toward accurate mapping of mangroves in a marginal habitat from SPOT multispectral data. *International Journal of Remote Sensing*, 19, 1887–1899.
- Gao J (1999) A comparative study on spatial and spectral resolutions of satellite data in mapping mangrove forests. *International Journal of Remote Sensing*, 20, 2823–2833.
- Garbulsky MF, Peñuelas J, Gamon J, Inoue Y, Filella I (2011) The photochemical reflectance index (PRI) and the remote sensing of leaf, canopy and ecosystem radiation use efficiencies: A review and meta-analysis. *Remote Sensing of Environment*, 115, 281–297.
- Giri C (2016) Observation and monitoring of mangrove forests using remote sensing: Opportunities and challenges. *Remote Sensing*, 8, 783.

- Gitelson AA, Viña A, Ciganda V, Rundquist DC, Arkebauer TJ (2005) Remote estimation of canopy chlorophyll content in crops. *Geophysical Research Letters*, 32, 93–114.
- Greaves HE, Vierling LA, Eitel JUH, Boelman NT, Magney TS, Prager CM, Griffin KL (2015) Estimating aboveground biomass and leaf area of low-stature Arctic shrubs with terrestrial LiDAR. *Remote Sensing of Environment*, 164, 26–35.
- Green EP, Clark CD, Mumby PJ, Edwards AJ, Ellis AC (1998) Remote sensing techniques for mangrove mapping. *International Journal of Remote Sensing*, 5, 935–956.
- Guo M, Li J, Sheng C, Xu J, Wu L (2017) A review of wetland remote sensing. *Sensors*, 17, 777.
- Hardin P, Jensen R (2011) Small-scale unmanned aerial vehicles in environmental remote sensing: Challenges and opportunities. *Mapping Sciences & Remote Sensing*, 48, 99–111.
- He B, Lai T, Fan H, Wang W, Zheng H (2007) Comparison of flooding-tolerance in four mangrove species in a diurnal tidal zone in the Beibu Gulf. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 74, 254–262.
- Heenkenda MK, Joyce KE, Maier SW, Bruin SD (2015) Quantifying mangrove chlorophyll from high spatial resolution imagery. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 108, 234–244.
- Heumann BW (2011) Satellite remote sensing of mangrove forests: Recent advances and future opportunities. *Progress in Physical Geography*, 35, 87–108.
- Hosoi F, Omasa K (2006) Voxel-based 3-D modeling of individual trees for estimating leaf area density using high-resolution portable scanning lidar. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44, 3610–3618.
- Huang GL (1996) Conservation and development of mangrove wetlands in China. *Forestry Resource Management*, (5), 14–17. (in Chinese) [黄桂林 (1996) 中国红树林湿地的保护与发展. *林业资源管理*, (5), 14–17.]
- Jia M, Liu M, Wang Z, Mao D, Ren C, Cui H (2016) Evaluating the effectiveness of conservation on mangroves: A remote sensing-based comparison for two adjacent protected areas in Shenzhen and Hong Kong, China. *Remote Sensing*, 8, 627.
- Jia M, Wang Z, Li L, Song K, Ren C, Liu B, Mao D (2014a) Mapping China's mangroves based on an object-oriented classification of Landsat Imagery. *Wetlands*, 34, 277–283.
- Jia M, Wang Z, Zhang Y, Ren C, Song K (2014b) Landsat-based estimation of mangrove forest loss and restoration in Guangxi Province, China, influenced by human and natural factors. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 8, 311–323.
- Jia MM (2014) Remote Sensing Analysis of Dynamic Changes of Chinese Mangrove Forest from 1973 to 2013. PhD dissertation, Northeast Institute of Geography and Agricultural Ecology, Chinese Academy of Sciences. (in Chinese with English abstract) [贾明明 (2014) 1973–2013年中国红树林动态变化遥感分析. 博士学位论文, 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春.]
- Kalisperakis I, Stentoumis C, Grammatikopoulos L, Karantzalos K (2015) Leaf area index estimation in vineyards from UAV hyperspectral data, 2D image mosaics and 3D canopy surface models. *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*, XL-1/W4, pp. 299–303.
- Kovacs JM, Flores-Verdugo F, Wang J, Aspden LP (2004) Estimating leaf area index of a degraded mangrove forest using high spatial resolution satellite data. *Aquatic Botany*, 80, 13–22.
- Lelong CCD, Burger P, Jubelin G, Roux B, Labbé S, Baret F (2008) Assessment of unmanned aerial vehicles imagery for quantitative monitoring of wheat crop in small plots. *Sensors*, 8, 3557–3585.
- Li CG (2002) Review on mangrove mapping based on remote sensing. *Central South Forestry inventory and Planning*, 21, (4), 52–58. (in Chinese with English abstract) [李春干 (2002) 红树林遥感成图研究综述. *中南林业调查规划*, 21(4), 52–58.]
- Li CG (2013) Mangrove Remote Sensing Information Extraction and Spatial Evolution Mechanism. Science Press, Beijing. (in Chinese) [李春干 (2013) 红树林遥感信息提取与空间演变机理研究. 科学出版社, 北京.]
- Li W, Cui LJ, Zhang MY, Wang YF (2008) A review of monitoring mangrove forest using 3S technologies in China. *Wetland Science and Management*, 4(2), 60–64. (in Chinese with English abstract) [李伟, 崔丽娟, 张曼胤, 王义飞 (2008) 基于3S技术的中国红树林湿地监测研究概述. *湿地科学与管理*, 4(2), 60–64.]
- Li Y, Guo Q, Su Y, Tao S, Zhao K, Xu G (2017) Retrieving the gap fraction, element clumping index, and leaf area index of individual trees using single-scan data from a terrestrial laser scanner. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 130, 308–316.
- Lichtenthaler HK, Buschmann C (1987) Chlorophyll fluorescence spectra of green bean leaves. *Journal of Plant Physiology*, 129, 137–147.
- Lin P (1997) Mangrove Ecosystem in China. Science Press, Beijing. (in Chinese) [林鹏 (1997) 中国红树林生态系. 科学出版社, 北京.]
- Lin P (2003) The characteristics of mangrove wetlands and some ecological engineering questions in China. *Engineering Science*, 5(6), 33–38. (in Chinese) [林鹏 (2003) 中国红树林湿地与生态工程的几个问题. *中国工程科学*, 5(6), 33–38.]
- Liu K, Li X, Shi X, Wang S (2008) Monitoring mangrove forest changes using remote sensing and GIS data with decision-tree learning. *Wetlands*, 28, 336.
- Lorenzo R, DeJesus BR, Jara RB (1979) Assessment of mangrove forest deterioration in Zamboanga Peninsula, Philippines, using Landsat MSS data. *Thirteenth International*

Symposium on Remote Sensing of Environment, 106(11), 166A–167A.

- Lu JJ (1996) Classification of coastal wetlands in China. Environmental Report, (1), 1–2. (in Chinese) [陆健健 (1996) 中国滨海湿地的分类. 环境导报, (1), 1–2.]
- Ma L, Cheng L, Han W, Zhong L, Li M (2014) Cultivated land information extraction from high-resolution unmanned aerial vehicle imagery data. Journal of Applied Remote Sensing, 8, 1–25.
- Mumby PJ, Edwards AJ (2003) Mapping marine environments with IKONOS imagery: Enhanced spatial resolution can deliver greater thematic accuracy. Remote Sensing of Environment, 82, 248–257.
- Nichol CJ, Rasche U, Matsubara S, Osmond B (2006) Assessing photosynthetic efficiency in an experimental mangrove canopy using remote sensing and chlorophyll fluorescence. Trees, 20, 9–15.
- Olsoy PJ, Mitchell JJ, Levia DF, Clark PE, Glenn NF (2016) Estimation of big sagebrush leaf area index with terrestrial laser scanning. Ecological Indicators, 61, 815–821.
- Pastorguzman J, Atkinson P, Dash J, Riojanieto R (2015) Spatiotemporal variation in mangrove chlorophyll concentration using Landsat 8. Remote Sensing, 7, 14530–14558.
- Rasolofoharinoro M, Blasco F, Bellan MF, Aizpuru M, Gauguelin T, Denis J (1998) A remote sensing-based methodology for mangrove studies in Madagascar. International Journal of Remote Sensing, 19, 1873–1886.
- Satyanarayana B, Muslim AM, Izzaty Horsali NA, Mat Zauki NA, Otero V, Nadzri MI, Ibrahim S, Husain ML, Dahdouh-Guebas F (2018) Status of the undisturbed mangroves at Brunei Bay, East Malaysia: A preliminary assessment based on remote sensing and ground-truth observations. PeerJ, 6, e4397.
- Schlemmer M, Gitelson A, Schepers J, Ferguson R, Peng Y, Shanahan J, Rundquist D (2013) Remote estimation of nitrogen and chlorophyll contents in maize at leaf and canopy levels. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 25, 47–54.
- Seto KC, Fragkias M (2007) Mangrove conversion and aquaculture development in Vietnam: A remote sensing-based approach for evaluating the Ramsar Convention on Wetlands. Global Environmental Change, 17, 486–500.
- Song C (2013) Optical remote sensing of forest leaf area index and biomass. Progress in Physical Geography, 37, 98–113.
- Song C, White BL, Heumann BW (2011) Hyperspectral remote sensing of salinity stress on red (*Rhizophora mangle*) and white (*Laguncularia racemosa*) mangroves on Galapagos Islands. Remote Sensing Letters, 2, 221–230.
- Spalding MD, Kainuma M, Collins L (2010) World atlas of mangroves. Earthscan, 90, 304.
- Sun YG, Zhao DZ, Guo WY, Gao Y, Su X, Wei BQ (2013) A review on the application of remote sensing in mangrove ecosystem monitoring. Acta Ecologica Sinica, 33, 4523–4538. (in Chinese with English abstract) 33, 4523–4538. [孙永光, 赵冬至, 郭文永, 高阳, 苏岫, 卫宝泉 (2013) 红树林生态系统遥感监测研究进展. 生态学报, 33, 4523–4538.]
- Tian J, Li X, Duan F, Wang J, Qu Y (2016) An efficient Seam elimination method for UAV images based on Wallis Dodging and Gaussian distance weight enhancement. Sensors, 16, 662.
- Tian J, Wang L, Li X, Gong H, Shi C, Zhong R, Liu X (2017b) Comparison of UAV and WorldView-2 imagery for mapping leaf area index of mangrove forest. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 61, 22–31.
- Tian J, Wang L, Li X, Shi C, Gong H (2017a) Differentiating tree and shrub LAI in a mixed forest with ICESat/GLAS spaceborne LiDAR. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 10, 87–94.
- Tian JY, Duan FZ, Wang L, Li XJ, Qu XY (2014) Elimination of image mosaic joints of UAV based on Wallis and distance weight enhancement. Chinese Journal of Image and Graphics, 19, 806–812. (in Chinese with English abstract) [田金炎, 段福洲, 王乐, 李小娟, 屈新原 (2014) 基于Wallis与距离权重增强的无人机影像拼接缝消除. 中国图像图形学报, 19, 806–812.]
- Tian JY, Duan FZ, Yuan Y, Qu XY, Gao ML (2013) UAV flight quality assessment method based on image matching. Science of Surveying and Mapping, 38(5), 175–177. (in Chinese) [田金炎, 段福洲, 袁媛, 屈新原, 高明亮 (2013) 基于图像匹配的无人机飞行质量评估方法. 测绘科学, 38(5), 175–177.]
- Turner DP, Urbanski S, Bremer D, Wofsy SC, Meyers T, Gower ST, Matthew G (2003) A cross biome comparison of daily light use efficiency for gross primary production. Global Change Biology, 9, 383–395.
- Valiela I, Bowen JL, York JK (2001) Mangrove forests: One of the world's threatened major tropical environments. BioScience, 51, 807–815.
- Van der Zande D, Hoet W, Jonckheere I, Aardt JV, Coppin P (2006) Influence of measurement set-up of ground-based LiDAR for derivation of tree structure. Agricultural and Forest Meteorology, 141, 147–160.
- Venkataratnam L, Thammappa SS, Ravisankar T, SaifuddinAnis (1997) Mapping and monitoring Prawn farming areas through remote sensing techniques. Geocarto International, 12, 23–29.
- Verger A, Vigneau N, Chéron C, Gilliol JM, Comar A, Baret F (2014) Green area index from an unmanned aerial system over wheat and rapeseed crops. Remote Sensing of Environment, 152, 654–664.
- Wang T, Zhang H, Lin H, Fang C (2015) Textural-spectral feature-based species classification of mangroves in Mai Po Nature Reserve from Worldview-3 imagery. Remote Sensing, 8, 24.
- Wang L, Sousa WP (2009) Distinguishing mangrove species

- with laboratory measurements of hyperspectral leaf reflectance. *International Journal of Remote Sensing*, 30, 1267–1281.
- Wang L, Sousa WP, Gong P (2004a) Integration of object-based and pixel-based classification for mapping mangroves with IKONOS imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 25, 5655–5668.
- Wang L, Sousa WP, Gong P, Biging GS (2004b) Comparison of IKONOS and QuickBird images for mapping mangrove species on the Caribbean coast of Panama. *Remote Sensing of Environment*, 91, 432–440.
- Wang Y, Zuo P, Huang ZQ, Zou XQ (2006) Research and analysis the changes of mangrove wetland areas and reasons in Dong Zhaigang. *Sichuan Environment*, 25, 44–50. (in Chinese with English abstract) [王胤, 左平, 黄仲琪, 邹欣庆 (2006) 海南东寨港红树林湿地面积变化及其驱动力分析. *四川环境*, 25, 44–50.]
- Weng JH, Jhaung LH, Jiang JY, Lai GM, Liao TS (2006) Down-regulation of photosystem 2 efficiency and spectral reflectance in mango leaves under very low irradiance and varied chilling treatments. *Photosynthetica*, 44, 248–254.
- Yang SS, Wang L, Chen S, Lu Y (2018) Evaluating the relationship between the photochemical reflectance index and light use efficiency in a mangrove forest with *Spartina alterniflora* invasion. *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation*, 73, 778–785.
- Ye Y, Tam NFY, Wong YS, Lu CY. (2003) Growth and physiological responses of two mangrove species (*Bru-guiera gymnorrhiza* and *Kandelia candel*) to waterlogging. *Environmental and Experimental Botany*, 49, 209–221.
- Zhang Q (2016) Correlation Between Photochemical Reflectance Index and Canopy Light Energy Utilization Based on Multi-angle Spectral Data. PhD dissertation, Nanjing University, Nanjing. (in Chinese with English abstract) [张乾 (2016) 基于多角度光谱数据光化学反射指数与冠层光能利用率关系的构建. 博士学位论文, 南京大学, 南京.]
- Zhao HT, Wang LR (2000) Classification of the coastal wetland in China. *Marine Science Bulletin*, 19(6), 72–82. (in Chinese with English abstract) [赵焕庭, 王丽荣 (2000) 中国海岸湿地的类型. *海洋通报*, 19(6), 72–82.]
- Zhao K, García M, Liu S, Guo Q, Chen G, Zhang X, Zhou Y, Meng X (2015) Terrestrial lidar remote sensing of forests: Maximum likelihood estimates of canopy profile, leaf area index, and leaf angle distribution. *Agricultural and Forest Meteorology*, 209/210, 100–113.
- Zheng G, Moskal LM (2012a) Computational-geometry-based retrieval of effective leaf area index using terrestrial laser scanning. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 50, 3958–3969.
- Zheng G, Moskal LM (2012b) Spatial variability of terrestrial laser scanning based leaf area index. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 19, 226–237.
- Zheng G, Moskal LM, Kim SH (2013) Retrieval of effective leaf area index in heterogeneous forests with terrestrial laser scanning. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 51, 777–786.
- Zhu YJ, Guo JL, Wu GJ, Guo ZH (2012) Application of high resolution satellite remote sensing in monitoring mangrove resource. *World Forestry Research*, 25, 39–44. (in Chinese with English abstract) [朱耀军, 郭菊兰, 武高洁, 郭志华 (2012) 高分辨率卫星遥感在红树林资源监测中的应用. *世界林业研究*, 25, 39–44.]

(特邀责任编辑: 郭庆华 责任编辑: 黄祥忠、周玉荣)