

引用格式: Zhao Qiang, Yu Le, Xu Yidi, *et al.* Application of Space Observation Technology in Oil Palm Research [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2022, 37(5): 1029-1042. [赵强, 俞乐, 徐伊迪, 等. 空间观测技术在油棕研究中的应用[J]. 遥感技术与应用, 2022, 37(5): 1029-1042.]
DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2022.5.1029

空间观测技术在油棕研究中的应用

赵 强¹, 俞 乐², 徐伊迪², 李唯嘉³, 郑珏鹏², 付昊桓²,
卢 麾², 张永光¹, 宫 鹏⁴

(1. 南京大学 地理与海洋科学学院, 江苏 南京 210023;

2. 清华大学 地球系统科学系, 北京 100084;

3. 香港中文大学 CUHK—商汤联合实验室, 香港;

4. 香港大学 地理系/地球科学系, 香港)

摘要: 油棕是一种重要的热带经济作物, 在热带地区种植面积迅速扩张, 已经成为全球最大的植物油来源。油棕扩张在带来经济效益的同时, 也在不断侵占全球现有的森林、耕地和泥炭地, 造成严重的生态环境问题。空间观测技术(RS、GIS、GNSS, 3S 技术)是空间信息收集、分析和管理的有力工具, 在优化土地利用类型空间布局和可持续发展规划中发挥着重要作用。通过文献综述和文献计量学的方法, 分析 3S 技术在油棕研究中的应用进展, 并探讨影响油棕制图精度的关键因素。研究发现: 该领域的论文主要以土地覆被变化研究为知识基础, 来自马来西亚、美国、中国、印度尼西亚和英国的科研机构 and 研究人员是最主要参与者; 目前 3S 技术在油棕研究中的应用包括油棕制图、油棕变化监测、油棕树计数、树龄估算、地上生物量与碳储量估算、适宜性评估、产量估算、病虫害监测、种植园管理等; 制图精度与论文发表时间并没有明显相关性, 与遥感数据源、分类方法具有相关性; 目前油棕研究中的 3S 技术以 RS 为主导, RS 应用于油棕研究的各个关键方向, GIS 技术主要应用于油棕变化制图、适宜性评估、种植园管理、病虫害监测等, GNSS 主要作为辅助工具, 应用于病虫害监测和种植园管理等。

关键词: 油棕; 3S 技术; 文献计量学分析; 可持续发展

中图分类号: TP79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2022)05-1029-14

1 引 言

油棕是一种高产的油料作物, 其生产的棕榈油具有广泛用途, 如生产食用油、工业润滑油、食品添加剂、生物燃料等, 在世界油料市场占有重要地位^[1-3]。油棕主要种植在热带地区, 其生长对温度、降水、海拔和坡度有较高的要求, 一般种植在年平均温度 22℃ 以上、年降雨量 1 200 mm 以上、海拔高度 300 m 以下及坡度小于 10° 的地区^[4]。油棕最初只

在非洲种植, 但是自 20 世纪 80 年代以来, 棕榈油的经济价值逐渐被开发, 全球棕榈油需求量呈指数上升, 导致在全球各地出现大规模的油棕种植园, 截止 2016 年, 全球油棕种植面积估计为 29.29 Mha^[5,6], 主要集中在印度尼西亚、马来西亚、尼日利亚等国家, 分布在东南亚、非洲和拉丁美洲地区。油棕种植园的快速扩张在带来经济效益的同时, 也在不断侵占全球现有的森林、耕地和泥炭地, 造成严重的

收稿日期: 2021-07-30; 修订日期: 2021-11-10

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFA0606601, 2017YFA0604401), 国家自然科学基金项目(41661144022)。

作者简介: 赵强(1997—), 男, 江苏宜春人, 硕士研究生, 主要从事土地覆盖/土地利用变化遥感和农业遥感研究。

E-mail: qiang.zhao@smail.nju.edu.cn

通讯作者: 俞乐(1982—), 男, 浙江绍兴人, 副教授, 主要从事土地覆盖/土地利用变化遥感和农业遥感研究。E-mail: leyu@tsinghua.edu.cn

生态环境问题,例如生物多样性丧失、生态系统失衡等^[7-14]。准确绘制油棕覆盖图,估算其面积、地上生物量、树龄、产量等,对研究油棕扩张对生态环境的影响以及实现可持续发展的油棕产业具有重要意义^[15-20]。

空间观测技术,又称 3S 技术,是 RS (Remote Sensing)、GIS (Geographic Information System) 和 GNSS (Global Navigation Satellite System) 的统称,以 RS、GIS、GNSS 为基础,配合多学科、多技术高度集成,可以实现高效准确的空间信息和环境信息采集、处理、管理等。RS 技术可以提供大面积、高时效、高分辨率的地面覆盖信息^[21-24],是实现大区域、多时相油棕精细研究和监测的基础^[25]。GIS 技术具有强大的管理、处理和分析地理空间数据的能力,并且可以与 RS、GNSS 进行集成,实现油棕空间信息的分析与管理,对油棕地面覆盖信息进行精确估算^[22,26-30]。GNSS 能够提供高精度的全球位置信息,辅助实现油棕自动化种植、病虫害现场监测、空间信息的验证与采集、油棕种植园精细化管理等,但更多的是作为辅助工具来提高空间信息的位置精度^[31,32]。3S 技术已经成为开展油棕研究的强有力工具。

很多学者基于 3S 技术发表了关于油棕研究的高质量论文,这极大地拓展了 3S 技术在油棕产业可持续发展中应用的广度与深度,但是目前缺乏系统性的总结。由于我国适宜种植油棕的农业用地非常有限,在国内开展的相关研究工作也十分缺乏。因此,本文将通过文献综述和文献计量学分析的方法,对 3S 技术在油棕研究中的应用进行系统性地分析,概述该领域的研究进展,包括研究方向、研究方法、研究区域、研究数据、精度评估等,并探讨影响油棕制图精度的关键因素。研究成果可以为后续 3S 技术在油棕研究中的应用提供参考与理论基础,确定该领域的研究需求,为未来我国油棕研究工作和种植活动的开展提供参考。

2 方 法

2.1 数据搜集

本文主要通过分析相关文献探讨 3S 技术在油棕研究中的应用进展,相关文献在 ISI Web of Science (<https://www.webofscience.com/>) 和中国知网 (<https://www.cnki.net/>) 进行文献检索(截止 2020 年 12 月 31 日)。分别通过 Topic="RS or remote

sensing + oil palm" or "GIS or geographic information system + oil palm" or "GPS/GNSS or global positioning system/global navigation satellite system + oil palm" and Timespan=All Years, Database=All Databases 等关键词(在中国知网检索时替换成中文)和检索设置进行文献检索,以此获得关于 3S 技术在油棕研究中应用的出版文献,并从论文中提取研究区域、数据、主要研究方法、结果精度等信息。

2.2 文献信息空间化

文献信息空间化能够更加直观地了解油棕研究的空间差异性,并识别研究热点与缺乏区域。为了实现精确的空间化,在搜集论文研究区的信息时将地名与真实地名进行核准,通过与谷歌地图 (<http://maps.google.com/>)、GeoNames 地理数据库 (<https://www.geonames.org/>) 进行校验,确定其经纬度坐标,最后以谷歌地球(Google Earth, GE)为载体实现文献信息空间化。

2.3 文献计量学分析方法

基于 CiteSpace 文献计量学软件^[33]可以进行文献的共被引和耦合网络分析、科研合作网络分析以及主题和领域共现网络分析,从而深度挖掘出某研究领域的知识基础、结构框架、研究前沿领域和合作关系,为后续研究提供参考和理论基础。

3 结果与讨论

3.1 文献概况

通过以上方法搜集并经过初步筛选的论文共 172 篇,包括英文文献 168 篇,中文文献 4 篇,其中 "RS + oil palm" 相关 143 篇, "GIS + oil palm" 相关 22 篇, "GPS/GNSS + oil palm" 相关 7 篇。最终与主题相关并且具有足够信息以实现空间化的文献共 119 篇,其中 "RS + oil palm" 相关 97 篇, "GIS + oil palm" 相关 19 篇, "GPS/GNSS + oil palm" 相关 3 篇,共有 109 篇文献收录于 Web of Science 核心合集中。其中 59 篇文献给出了明确的制图精度,为油棕制图精度问题的探讨提供基础。

3.2 文献时空分布

相关研究主要集中在东南亚、非洲和拉丁美洲的赤道附近国家(图 1)。大部分集中在东南亚地区,占到总量的 82.3%,其中马来西亚和印度尼西亚分别占总量的 54.6% 和 21.0%(图 2),是油棕研究最为频繁的两个国家。目前,东南亚是全球油棕种

植面积最大的地区^[34],印度尼西亚和马来西亚更是全球油棕种植面积最大的两个国家,占到全球油棕面积的60%以上,并且在过去几十年一直保持着全球最快的油棕面积扩张速率^[2,35]。

论文主要在2010至2020年间发表,该时间段发表的论文占到总量的93%,并且研究数量呈逐年上升趋势;被引次数在2010年之前上升较为平缓,在2010年之后上升趋势明显,特别是在2015年之

后,被引频次显著增加(图2)。一方面,近年来对地观测卫星的增加、可免费获取的遥感数据的增加、遥感数据分辨率的提高、遥感数据类型增加等都提升了学者利用遥感数据进行油棕研究的兴趣和能力。另一方面,全球油棕种植园的快速扩张所带来的生态环境问题逐渐受到了各界的关注,学者们逐渐采用3S技术开展大区域研究,促进了油棕产业的可持续发展。

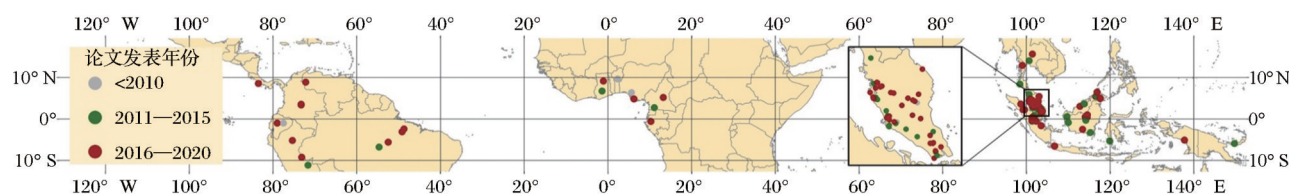


图1 不同时间段油棕研究的空间分布情况

Fig.1 The spatial distribution of oil palm researches in different periods

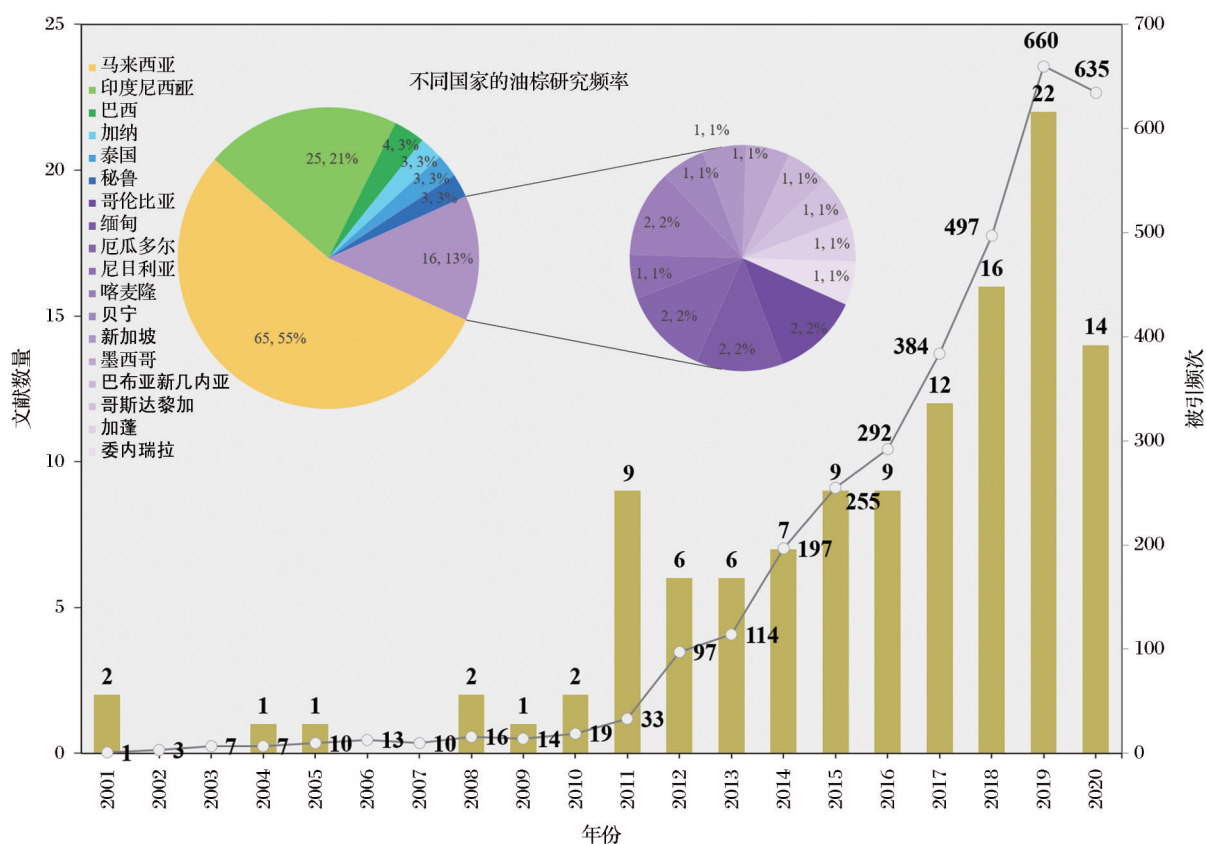


图2 逐年油棕研究论文发表数量和引用次数统计

Fig.2 Annual statistics on the number of publications and citations of oil palm research papers

3.3 文献计量学分析

将上文筛选得到的共109篇文献从Web of Science核心合集中导出,基于CiteSpace软件进行文献共被引分析、关键词共现分析和合作图谱分析,为后续3S技术在油棕研究中的应用提供参考与理论基础。

3.3.1 文献共被引分析

本文基于文献共被引分析来深入分析油棕研究被引文献(图中的各个节点)之间的相互关系^[33],得到该领域的发展过程和现阶段的研究热点。本文共确定油棕研究8个聚类,分别为逐年油棕种植园制图(annual oil palm plantation map)、土地覆被变

Aerial Vehicle, UAV)、Sentinel 卫星和高分辨率 (high-resolution) 数据被大量使用,将成为未来反演更丰富、更实时油棕信息的数据源。

综合以上分析以及阅读文献情况,可以总结出关于 3S 技术在油棕研究中的 9 个关键方向:油棕制图、油棕变化制图、油棕树计数、树龄检测、地上生物量与碳储量估算、产量估算、植被病虫害监测、适宜性评估和油棕种植园管理。

3.3.3 合作图谱分析

图 4 为油棕研究中各机构或者国家的发文数量和合作关系,节点的大小代表发文数量,连线表示合作关系,节点圈层和连线的颜色代表合作发生的

时间,红色代表早期,黄色代表近期,紫色外圆环表示该节点为关键节点(中介中心性 >0.1)。从图 4(a)可以看出,马来西亚博特拉大学(Univ Putra Malaysia)发文数量最多,发文数量为 22 篇,而且开展油棕研究的时间较早。然后分别是清华大学(Tsinghua Univ)、马来西亚理工大学(Univ Teknol Malaysia)和英国邓迪大学(Univ Dundee)。

从地区合作图谱(图 4(b))来看,发文数量具有高度的集中性,发文数量前五的国家总计 112 篇(含共同发表),占到了所有国家总数的 57%。发文量最多的国家为马来西亚(46 篇),其次为美国(21 篇)、中国(16 篇)、印度尼西亚(15 篇)和英国(14 篇)。

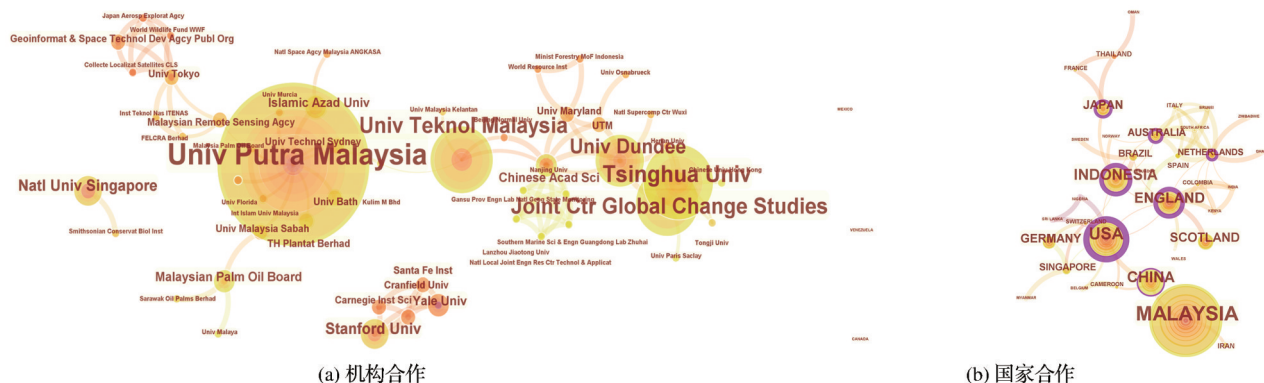


图 4 发文机构合作和地区合作图谱

Fig.4 Co-citation network at the institutional level and the regional level in oil palm research

3.4 3S 技术在油棕研究中的主要应用

在油棕研究中,RS、GIS、GNSS 之间往往相辅相成,彼此之间联系紧密^[16,26]。参考 3.3.2 节的关键词分析,对 9 个关键方向进行详细阐述。

3.4.1 油棕制图

了解油棕种植园的空间分布情况是油棕研究的基础,开展油棕制图研究的问题主要集中在大尺度制图和利用不同遥感数据与分类方法提高制图精度。现有的油棕制图研究往往追求在较大范围进行(一个国家、州或省等),比如 Cheng 等^[18]、Najib 等^[1]、Dong 等^[36]对马来西亚进行了油棕制图研究。所使用的遥感数据以光学遥感数据(Landsat、SPOT (Système Probatoire d'Observation de la Terre)、QuickBird、Sentinel-2 等)为主,越来越多的学者使用 SAR 数据(PALSAR、Sentinel-1、Radarsat 等)来表现地表纹理特征,但是结果表明使用 SAR 数据的制图精度并不稳定^[7,18]。也有部分学者使用 MODIS (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer) 数据进行制图,结果较为理想^[37]。在分类方

法上,传统的最大似然分类方法仍然被广泛使用,但是结果精度欠佳^[38,39],基于机器学习的分类方法(RF(Random Forest)、SVM、ANN)越来越受关注,制图精度相较于传统分类方法也有较大提升^[6,40]。Cheng 等^[6]利用 MLC、RF 和 SVM 对马来西亚进行油棕制图,结果表明 RF (91.07%) 和 SVM (90.41%) 比 MLC (89.72%) 具有更好的制图精度。油棕制图研究因为主要以识别油棕为主,所以分类系统主要围绕油棕,一般情况下以油棕和其他作为主要类别,但是很多研究都指出低龄油棕难以区分,会影响制图精度^[41-43]。

3.4.2 油棕变化制图

油棕的变化制图主要是为了研究油棕时空变化特征和驱动因素,监测油棕变化对其他土地覆被类型和生态环境的影响^[44,45],另外对未来油棕变化进行有效预测也十分重要。多个研究指出油棕扩张严重侵占了其他土地覆被类型,尤其是森林、农地、泥炭地等,对生态环境造成严重影响^[10,15,46]。油棕变化制图是在土地利用制图的基础上进行时间

维度上的扩展,遥感数据的周期性使得开展逐年油棕变化制图成为可能。De Petris 等^[15]基于 MODIS 的增强植被指数(Enhanced Vegetation Index)数据估算了 2000 至 2018 年间中加里曼丹(Kalimantan Tengah)的油棕种植园扩张面积,取得了 94% 的总体精度。基于 RS 技术只能对过去的油棕变化进行检测,但是基于 GIS 技术利用时空模拟模型可以模拟未来土地覆被变化,为优化油棕和其他土地覆被类型的空间格局提供参考^[47, 48],这为未来油棕研究提供了新思路。

3.4.3 油棕树计数

油棕树计数是对油棕种植园进行产量估算、种植园管理和空间布局规划的基础。因为其对遥感数据空间分辨率的高要求,未来无人机遥感数据将是油棕树计数的主要数据源。传统的油棕树计数会消耗大量的时间和人力,遥感提供了油棕树计数的新思路。基于遥感图像,通过图像处理和机器学习技术可以准确估算图像范围内的油棕树数量。与油棕制图不同,计数对遥感图像的空间分辨率要求较高。在现有研究中,多采用 QuickBird、WorldView 等达到米级或者亚米级空间分辨率的遥感数据^[3, 49-51];越来越多的研究使用无人机遥感图像,因为无人机遥感图像不仅具有更高空间分辨率,而且数据的获取更具便捷性、实时性^[24, 52]。从检测方法上看,多采用机器学习的方法,卷积神经网络(Convolutional Neural Network, CNN)使用最多,其次为支持向量机(SVM)和面向对象的图像分析(OBIA),都取得了比较理想的精度,但是存在区域上的差异。Zheng 等^[25]提出了一种新的跨区域油棕树检测方法(Multi-level Attention Domain Adaptation Network, MADAN),统计精度要优于现有的域适应方法,但是不能保证在更复杂、更大范围仍然适用。

3.4.4 树龄检测

油棕树龄是预测产量的一个重要指标^[19, 53]。树龄估算中使用 SAR 数据要优于光学遥感数据。与油棕树计数不同的是,树龄估算不需要精确到每一棵树,因为在油棕种植时,往往是大块区域种植,而相同树龄的油棕往往具有相似的结构纹理和光谱特征。在油棕树龄估算研究中,光学遥感数据(WorldView、Landsat 等)和 SAR 数据(PALSAR 等)均有使用,使用 SAR 数据通常可以取得更好的精度。多数研究是基于纹理信息来识别油棕的不

同生长阶段^[53-55],部分研究利用光学波段比值或者油棕生物物理参数(叶面积、冠层覆盖率、茎高等)与油棕树龄进行拟合,挑选相关性强的指标估算油棕树龄^[19, 56]。Avtar 等^[54]利用多频率、多极化 SAR 数据监测马来西亚沙捞越(Sarawak)的油棕生长阶段,结果发现具有 HV 极化的 PALSAR 数据对油棕树龄的敏感性最高。

3.4.5 地上生物量和碳储量估算

准确估算油棕地上生物量和碳储量,是评估油棕在全球碳循环中作用的基础,对研究全球气候变化具有重要意义^[17, 57, 58]。虽然 MODIS 提供 GPP 产品,但是其对油棕生物量估算的精度欠佳^[58]。Morel 等^[35]利用 ALOS-PALSAR 数据估算马来西亚沙巴州的森林与油棕地上生物量,发现了区分森林和油棕的信号特征,证明该数据集用于监测油棕的潜力,但是 SAR 数据受环境状况的影响较大。Nunes 等^[59]开创性地利用激光雷达数据进行碳储量估计,结果显示基于面积的估算方法要优于以树为中心的估算方法,但是准确性仍然较低。多数研究是依据样地数据或者植被指数建立经验回归模型进行估算^[35, 60],Foody 等^[61]尝试利用人工神经网络的方法进行估算,发现 NDVI 等植被指数与生物量相关性弱且不显著,认为应该充分利用遥感数据的所有波段进行估算。Fan 等^[62]和 Xu 等^[4]在陆面模式中开发油棕生长模块,模拟油棕生长过程,为未来结合遥感观测数据估算大尺度油棕扩张造成的地上生物量与碳储量变化提供新的研究方法。

3.4.6 产量估算

棕榈油作为一个重要的全球性商品,准确估算油棕产量对制定适当的经营策略具有重要意义^[16]。目前估算油棕产量的研究工作较少,因为油棕鲜果穗隐藏在树冠之下,遥感无法直接地准确检测,利用植被指数进行间接估算成为主要的手段。有研究指出油棕产量与树龄和某些植被指数之间具有显著的相关性^[63, 64],这说明利用光学遥感数据(Landsat、QuickBird)进行产量间接估算是可行的。Balasundram 等^[64]对植被指数和产量数据进行回归建模与模型验证,最终发现比值植被指数(Ratio Vegetation Index, RVI)和绿波段归一化差值植被指数(Green Normalized Vegetation Index, GNDVI)在产量估算中具有可靠的准确性。

3.4.7 植被病虫害监测

疾病和虫害会导致油棕大幅度减产,并且降低

油棕经济寿命,造成严重的经济损失^[65]。在油棕病虫害监测中,高光谱和高空间分辨率遥感数据(QuickBird、WorldView、航空和地面平台、便携式设备等)使用较多,利用环境要素进行病虫害监测也是一种重要的方法,但是目前对疾病早期的检测仍是难点。常见的油棕病虫害包括茎基腐病(basal stem rot)、结草虫(bagworm)等。基于高光谱分辨率遥感数据研究中,通常是利用光谱反射率或者光谱反射率导数曲线特征检测茎基腐病的感染程度,而利用光谱反射率导数的方法具有更高的精度^[66-68];基于高空间分辨率遥感数据的研究则是利用光谱波段比(如植被指数)进行检测,结果精度差异较大,对于轻度染病油棕的检测仍然存在缺陷^[69-72]。越来越多学者尝试利用地面或者航空遥感方式来检测油棕染病情况,如地面激光扫描、手持式平台、直升机平台、无人机等,这些方式能够便捷、实时地获取数据^[65, 67, 68, 73, 74]。油棕茎基腐病目前没有有效的防治措施,只能延长寿命,而病虫害通常会突然爆发,利用遥感手段监测存在难度。油棕病害的发生往往与地面因素相关,因此Rakib等^[75]基于GIS技术分析泥炭人工林中铜、锌与茎基腐病发生的空间相关性,结果表明铜、锌含量低或许是茎基腐病发生的原因。对于虫害的监测需要更为实时的数据,所以多采用低空遥感数据,而且因为害虫对周围环境更为敏感,所以研究中会考虑加入环境参数,如相对湿度、地表温度、降雨等,而这些数据往往需要匹配GNSS技术提供的高精度位置信息^[29]。

3.4.8 适宜性评估

探索油棕种植适宜性并且评估可种植区域是油棕产业可持续发展的重要环节。当前研究表明,气候条件是限制油棕生长的主要因素,地形、土壤和社会经济等条件均会起到限制作用,而GIS技术是进行适宜性评估的主要手段。马来西亚和印度尼西亚的油棕面积即将超过或者已经超过其维持可持续发展的油棕种植面积^[76],探索其他地区可种植油棕的土地迫在眉睫。Pirker等^[76]评估了全球的油棕可种植区,发现气候条件是主要限制性因素,并且可种植区与高碳储量森林和保护区高度重合,这导致剩余可种植油棕的土地极少。土壤是一切植物生长的基础,Ogunkunle等^[77]评估了尼日利亚的4个土壤系列的油棕可种植性,发现土壤肥力和颗粒大小是主要限制条件。社会经济条件在土地

适宜性评估中同样重要,结合社会经济条件有助于改善对未来可扩张地区的预测^[78]。Olaniyi等^[79]在考虑社会经济条件的情况下评估了马来西亚的农业用地适宜性,结果发现油棕最适宜种植区在雪莪兰州的沙白安南区(Sabak Bernam district)和瓜拉冷岳(Kuala Langat)县。

3.4.9 油棕种植园管理

对油棕种植园合理的管理不仅可以减少对环境的污染,而且可以提高种植园的经济效益。种植园管理包括种植道路规划、地形规划、油棕种植、水肥管理、病虫害监测等,传统管理方法费时费力,经济效益低,3S技术为其提供了新思路。3S技术是实现精准农业的核心技术,利用雷达遥感数据获取无云图像,光学遥感数据获取种植园的重要物理参数,可以获得种植园的整体状况^[80];GNSS可以提供精确位置信息,辅助信息采集和空间配准;配合GIS整合各种环境数据,可以实现对种植园的信息监控和智慧管理。Shafri等^[81]利用LiDAR和光学遥感数据为油棕种植园进行种植道路和地形规划,极大地提升了种植园管理的准确度和效率,为种植园带来更大的利润,但是目前仍没有在更大规模油棕种植园的实践。

3.5 油棕制图精度相关问题

油棕研究的领域跨度大,其结果的精度评估很难统一标准,如制图时多基于混淆矩阵评估整体精度,但有时也会用Kappa系数和 R^2 来评估分类精度;又如在油棕树计数研究中,通常使用F1-score来评估精度,这与研究使用的方法相关。在本研究中选用最具代表性的精度评估方法,即基于混淆矩阵的精度评估,来讨论油棕制图精度及其影响因素。

在油棕制图研究中,制图精度与论文出版时间并无显著关系(图5),可能的原因是随着制图技术的发展,研究区域和使用的遥感数据量越来越大,制图目标也越来越复杂^[82]。

本文主要探讨具有代表性并且能够直接影响到制图精度的几个因素,包括遥感数据源、分类方法和分类系统。

3.5.1 遥感数据源

目前应用于油棕制图研究中的主要遥感数据是Landsat、ALOS-PALSAR和MODIS数据,结合多源遥感数据是未来遥感制图的趋势之一(图6)。

遥感图像的空间分辨率大小对分类精度有重

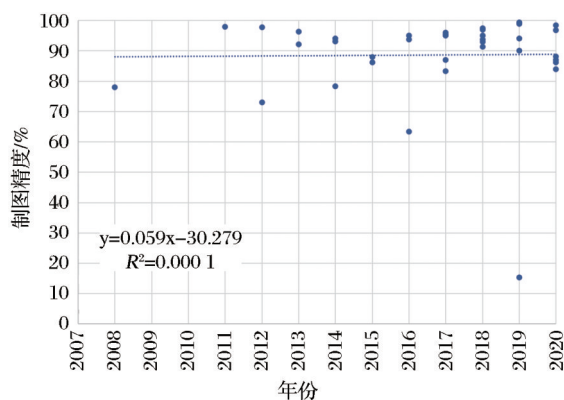


图5 制图精度与论文出版时间的关系

Fig.5 The relationship between mapping accuracy and publication time

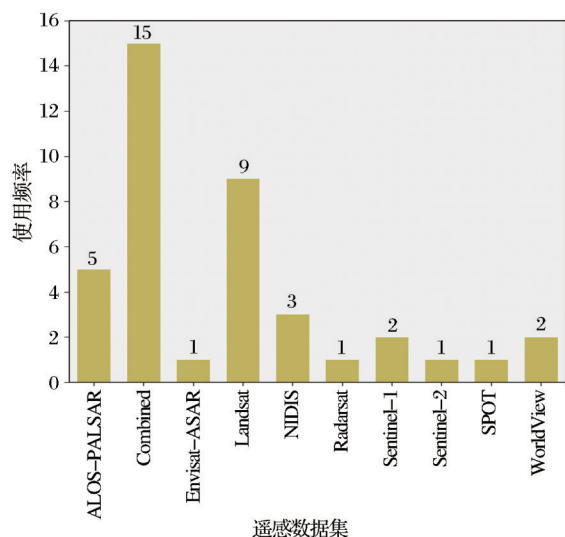


图6 不同遥感数据源的使用频率

Fig.6 Frequency of use of different remote sensing data sources

要影响,因此最佳空间分辨率的选择被认为是对地观测的主要挑战之一^[83]。因此,依据遥感卫星数据类型(光学:高(High)、中(Medium)、低(Low)空间分辨率,SAR,多源遥感数据结合(Combined)),分析不同遥感数据集的分类精度差异(图7)。但是如图7所示,不同分辨率遥感数据在油棕制图精度方差棒重叠,因此,分辨率对制图精度的影响差异并不明显。相较于高分辨率数据,低空间分辨率遥感数据能够更好地表现出油棕的大尺度空间现象,且更少受图像噪声的影响^[84]。高空间分辨率遥感数据可以减少混合像元数量,在一定程度上提高油棕制图分类精度^[83],如Yusoff等^[85]就曾采用相同的分类方法和分类系统,分别基于SPOT-6与Landsat OLI(Operational Land Imager)遥感数据在马来西亚霹雳州的瓜拉江沙区(Kuala Kangsar district)进

行油棕制图研究,结果分别取得了96%和87%的分类精度。

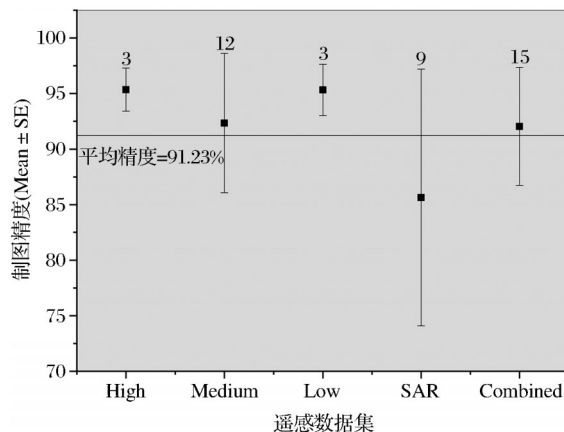


图7 不同遥感数据集的分类精度

Fig.7 Classification accuracy of different remote sensing data sets

基于合成孔径雷达(SAR)数据,可以利用油棕种植园规则的种植形态使油棕与其他覆被类型相区别^[5, 35, 84, 86, 87]。SAR在对地观测上,相较于光学遥感具有明显的优势^[39],已经有较多的学者采用了SAR数据,开展基于纹理特征的机器学习等方法的油棕制图研究^[5, 39, 42, 84, 87],但是取得的精度并不理想。SAR数据在具有巨大优势的同时也存在着明显的不足,SAR数据波段较少而且影像信噪比低,这就使得SAR数据的油棕制图结果精度不稳定(图7)。

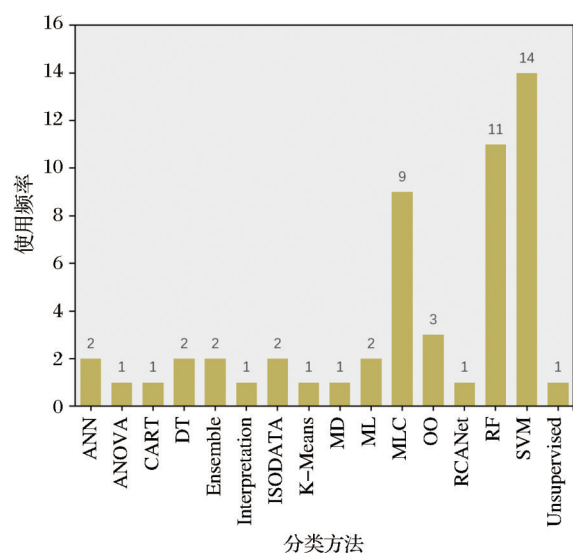
目前,多源遥感数据的联合是油棕制图的重要方向,尤其是结合光学遥感数据和SAR数据进行油棕制图^[1, 7, 18]。结合遥感图像的光谱特征和纹理信息可以更容易地将油棕与周围地物区分开来,从而提高油棕制图的精度^[60, 88]。

3.5.2 分类方法

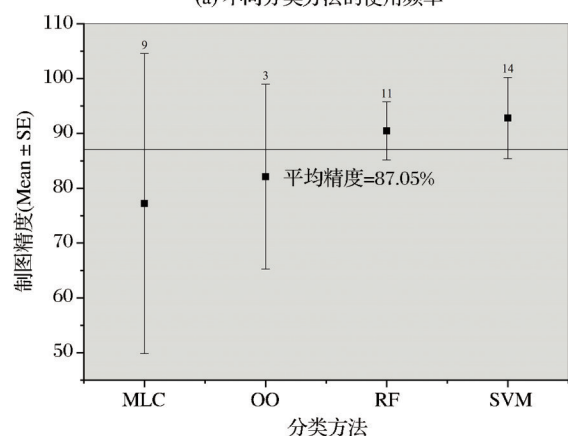
在油棕制图研究中,主要采用的分类方法是最大似然分类(MLC)、随机森林(RF)和支持向量机(SVM),而RF与SVM取得的精度更为理想(图8)。计算机视觉技术和机器学习技术的蓬勃发展极大地促进了遥感图像识别及信息提取研究^[89],并被越来越多地应用于油棕制图研究中^[5, 6, 40, 87, 90]。

3.5.3 分类系统

一般认为,制图时使用的分类系统越复杂,分类精度将会越低^[82]。在油棕制图研究中,因为制图对象主要是油棕,所以分类系统较为简单,如仅区分油棕和非油棕。图9显示随着分类系统的类别数量增加,制图精度有着略微下降的趋势。Descals



(a) 不同分类方法的使用频率



(b) 主要分类方法的分类精度

(MLC(Maximum Likelihood Classifier):最大似然分类器, OO(Object Based):基于对象的图像分析, RF(Random Forest):随机森林, SVM(Support Vector Machine):支持向量机)

图8 不同分类方法的使用频率与分类精度

Fig.8 Frequency and accuracy of different classification methods

等^[42]曾基于 Sentinel 数据,利用 RF 分类方法对北苏门答腊的比南加村(village of Binanga)进行油棕制图,结果显示当分类系统类别数量为3时取得的精度(88.6%)要优于类别数量为5时取得的精度(87.2%),这一研究也支持了分类系统类别数量增加会降低制图精度的判断。

4 结论

本文基于已发表的论文,较为全面地综述了3S技术在油棕研究中的应用现状,发现相关研究大量集中在东南亚地区,主要集中在2010—2020年间,2015年后发文量与被引次数显著增加,呈现逐年上升趋势。油棕研究主要以土地覆被变化研究为知

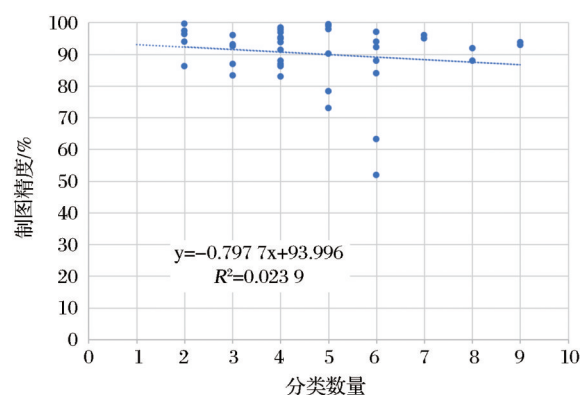


图9 分类系统类别数量与精度的关系

Fig.9 The relationship between the number of classes and the accuracy of the classification system

识基础,目前3S技术在油棕研究中的应用包括油棕制图、油棕变化监测、油棕树计数、树龄估算、地上生物量与碳储量估算、适宜性分析、产量估算、病虫害监测、种植园管理等关键方向。2000至2020年间,油棕研究经历了缓慢发展期(2001—2010年)、平稳发展期(2011—2015年)和高速发展期(2016—2020年),目前仍处于蓬勃发展时期。现阶段马来西亚、美国、中国、印度尼西亚和英国是开展油棕研究最多的国家。目前的油棕研究中的3S技术以RS为主导,RS技术为研究提供主要的观测数据,应用于油棕研究的各个关键方向;GIS技术主要应用于油棕变化制图,适宜性分析,种植园管理,病虫害监测等;GNSS主要作为辅助工具,应用于病虫害监测和种植园管理等。

油棕研究在近十年来受到了广泛关注,基于3S技术的可持续油棕的研究方兴未艾,但仍有不少技术空缺需要在未来努力填补。一方面,作为油棕研究基础的油棕制图的精度并没有随着时间得到显著提升;另一方面,油棕种植的自然条件和生长状态的监测精度也需更高。更高分辨率遥感数据、多源遥感数据和机器学习技术、云计算技术的深入应用将是提高油棕制图精度、油棕自然条件生长状态监测精度的重要手段,也将更好地服务于区域碳循环、农业管理、生物多样性保护以及油棕产业的可持续发展等研究。

参考文献(References):

- [1] Najib N E M, Kanniah K D, Cracknell A P, *et al.* Synergy of active and passive remote sensing data for effective mapping of oil palm plantation in Malaysia[J]. *Forests*, 2020, 11(8): 858. DOI: 10.3390/f11080858.

- [2] Xu Y, Yu L, Li W, *et al.* Annual oil palm plantation maps in Malaysia and Indonesia from 2001 to 2016[J]. *Earth System Science Data*, 2020, 12(2): 847–867. DOI: 10.5194/essd-12-847-2020.
- [3] Li W, Dong R, Fu H, *et al.* Large-scale oil palm tree detection from high-resolution satellite images using two-stage convolutional neural networks[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(1): 11. DOI: 10.3390/rs11010011.
- [4] Xu Y, Ciais P, Yu L, *et al.* Oil palm modelling in the global land-surface model ORCHIDEE-MICT [J]. *Geoscientific Model Development*, 2021, 14(7): 4573–4592. DOI: 10.5194/gmd-14-4573-2021.
- [5] Cheng Y, Yu L, Xu Y, *et al.* Towards global oil palm plantation mapping using remote-sensing data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2018, 39(18): 5891–5906. DOI: 10.1080/01431161.2018.1492182.
- [6] Cheng Y, Yu L, Xu Y, *et al.* Mapping oil palm plantation expansion in Malaysia over the past decade (2007–2016) Using ALOS-1/2 PALSAR-1/2 Data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2019, 40(19): 7389–7408. DOI: 10.1080/01431161.2019.1580824.
- [7] Sarzynski T, Giam X, Carrasco L, *et al.* Combining radar and optical imagery to map oil palm plantations in Sumatra, Indonesia, using the Google Earth Engine[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(7): 1220. DOI: 10.3390/rs12071220.
- [8] Barnes A D, Jochum M, Mumme S, *et al.* Consequences of tropical land use for multitrophic biodiversity and ecosystem functioning[J]. *Nature Communications*, 2014, 5: 5351. DOI: 10.1038/ncomms6351.
- [9] Busch J, Ferretti-Gallon K, Engelmann J, *et al.* Reductions in emissions from deforestation from Indonesia's Moratorium on new oil palm, timber, and logging concessions[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2015, 112(5): 1328–1333. DOI: 10.1073/pnas.1412514112.
- [10] Glinskis E A, Gutierrez-Velez V H. Quantifying and understanding land cover changes by large and small oil palm expansion regimes in the Peruvian Amazon[J]. *Land Use Policy*, 2019, 80: 95–106. DOI: 10.1016/j.landusepol.2018.09.032.
- [11] Ramdani F, Moffiet T, Hino M, *et al.* Local surface temperature change due to expansion of oil palm plantation in Indonesia [J]. *Climatic Change*, 2014, 123(2): 189–200. DOI: 10.1007/s10584-013-1045-4.
- [12] Horton A J, Lazarus E D, Hales T C, *et al.* Can riparian forest buffers increase yields from oil palm plantations? [J]. *Earth's Future*, 2018, 6(8): 1082–1096. DOI: 10.1029/2018ef000874.
- [13] Furumo R P, Aide T M. Characterizing commercial oil palm expansion in Latin America: Land use change and trade[J]. *Environmental Research Letters*, 2017, 12(2): 024008. DOI: 10.1088/1748-9326/aa5892.
- [14] Englund O, Berndes G, Persson U M, *et al.* Oil palm for biodiesel in Brazil—Risks and opportunities[J]. *Environmental Research Letters*, 2015, 10(4): 044002. DOI: 10.1088/1748-9326/10/4/044002.
- [15] De Petris S, Boccardo P, Borgogno-Mondino E, *et al.* Detection and characterization of oil palm plantations through MODIS EVI time series[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2019, 40(19): 7297–7311. DOI: 10.1080/01431161.2019.1584689.
- [16] Chong K L, Kanniah K D, Pohl C, *et al.* A review of remote sensing applications for oil palm studies[J]. *Geo-Spatial Information Science*, 2017, 20(2): 184–200. DOI: 10.1080/10095020.2017.1337317.
- [17] Asari N, Suratman M N, Jaafar J, *et al.* Modelling and mapping of Above Ground Biomass (AGB) of oil palm plantations in Malaysia using remotely-sensed data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2017, 38(16): 4741–4764. DOI: 10.1080/01431161.2017.1325533.
- [18] Cheng Y, Yu L, Cracknell A P, *et al.* Oil palm mapping using landsat and palsar: A case study in Malaysia[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2016, 37(22): 5431–5442. DOI: 10.1080/01431161.2016.1241448.
- [19] Chemura A, van Duren I, van Leeuwen L M, *et al.* Determination of the age of oil palm from crown projection area detected from WorldView-2 multispectral remote sensing data: The case of Ejisu-Juaben district, Ghana[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2015, 100: 118–127. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2014.07.013.
- [20] de Almeida A S, Guimaraes Vieira I C, Ferraz S F B, *et al.* Long-term assessment of oil palm expansion and landscape change in the Eastern Brazilian Amazon[J]. *Land Use Policy*, 2020: 90. DOI: 10.1016/j.landusepol.2019.104321.
- [21] Vargas H, Camacho A, Arguello H, *et al.* Spectral unmixing approach in hyperspectral remote sensing: A tool for oil palm mapping [J]. *Tecnológicas*, 2019, 22(45): 131–145. DOI: 10.22430/22565337.1228.
- [22] Abd Mubin N, Nadarajoo E, Shafri H Z M, *et al.* Young and mature oil palm tree detection and counting using convolutional neural network deep learning method[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2019, 40(19): 7500–7515. DOI: 10.1080/01431161.2019.1569282.
- [23] Broich M, Hansen M C, Potapov P, *et al.* Time-series analysis of multi-resolution optical imagery for quantifying forest cover loss in Sumatra and Kalimantan, Indonesia[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2011, 13(2): 277–291. DOI: 10.1016/j.jag.2010.11.004.
- [24] Shafri H Z M, Hamdan N, Saripan M I, *et al.* Semi-automatic detection and counting of oil palm trees from high spatial resolution airborne imagery[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2011, 32(8): 2095–2115. DOI: 10.1080/0143116100

- 3662928.
- [25] Zheng J, Fu H, Li W, *et al.* Cross-regional oil palm tree counting and detection via a multi-level attention domain adaptation network[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2020, 167: 154–177. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2020.07.002.
- [26] Phua M H, Chong C W, Ahmad A H, *et al.* Understanding rat occurrences in oil palm plantation using high-resolution satellite image and GIS data[J]. *Precision Agriculture*, 2018, 19(1):42–54. DOI: 10.1007/s11119-016-9496-z.
- [27] Tajudin N S, Musa M H, Abu Seman I, *et al.* Predicting the variability of copper and zinc in leaf and soil of oil palm planted on a 12 Ha land using geospatial information system technology[J]. *Jurnal Teknologi*, 2015, 77(24):113–118.
- [28] Phua M H, Chong C W, Ahmad A H, *et al.* Predicting rat occurrence in oil-palm plantation using GIS and geospatial data[J]. *Environmental Engineering and Management Journal*, 2016, 15(11):2511–2518. DOI: 10.30638/eemj.2016.275.
- [29] Ruslan S A, Muharam F M, Zulkafli Z, *et al.* Using satellite-measured relative humidity for prediction of metisa Plana's population in oil palm plantations: A comparative assessment of regression and artificial neural network models[J]. *PLOS One*, 2019, 14(10):e0223968. DOI: 10.1371/journal.pone.0223968.
- [30] Johaerudin, Nakagoshi N. GIS-based land suitability assessment for oil palm production in landak regency, West Kalimantan[J]. *Hikobia*, 2011, 16(1):21–31.
- [31] Viera-Torres M, Sinde-Gonzalez I, Gil-Docampo M, *et al.* Generating the baseline in the early detection of bud rot and red ring disease in oil palms by geospatial Technologies[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(19): 3229. DOI: 10.3390/rs12193229.
- [32] Hoffmann C, Weise C, Koch T, *et al.* From UAS data acquisition to actionable Information-How an End-to-end solution helps oil palm plantation operators to perform a more sustainable plantation management[J]. *ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2016, XLI-B1: 1113–1120. DOI: 10.5194/isprsjarchives-XLI-B1-1113-2016.
- [33] Chen C, Ibekwe-SanJuan F, Hou J, *et al.* The structure and dynamics of cocitation clusters: A multiple-perspective cocitation analysis[J]. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, 2010, 61(7): 1386–1409. DOI: 10.1002/asi.21309.
- [34] Gaveau D L, Sheil D, Husnayaen, *et al.* Rapid conversions and avoided deforestation: Examining four decades of industrial plantation expansion in Borneo[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6:32017. DOI: 10.1038/srep32017.
- [35] Morel A C, Saatchi S S, Malhi Y, *et al.* Estimating above-ground biomass in forest and oil palm plantation in Sabah, Malaysian Borneo using ALOS PALASAR data[J]. *Forest Ecology and Management*, 2011, 262(9): 1786–1798. DOI: 10.1016/j.foreco.2011.07.008.
- [36] Dong R, Li W, Fu H, *et al.* Oil palm plantation mapping from high-resolution remote sensing images using deep learning[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2020, 41(5): 2022–2046. DOI: 10.1080/01431161.2019.1681604.
- [37] Razali S M, Marin A, Nuruddin A A, *et al.* Capability of Integrated MODIS imagery and ALOS for oil palm, rubber and forest areas mapping in tropical forest regions[J]. *Sensors*, 2014, 14(5):8259–8282. DOI: 10.3390/s140508259.
- [38] Santos C, Messina J P. Multi-sensor data fusion for modeling african palm in the ecuadorian Amazon[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2008, 74(6): 711–723. DOI: 10.14358/pers.74.6.711.
- [39] Dong X, Quegan S, Yumiko U, *et al.* Feasibility study of C- and L-band SAR time series data in tracking Indonesian plantation and natural forest cover changes[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2015, 8(7): 3692–3699. DOI: 10.1109/jstars.2015.2400439.
- [40] Shaharum N S N, Shafri H Z M, Ghani W A W A K, *et al.* Mapping the distribution of oil palm using Landsat 8 data by comparing machine learning and non-machine learning algorithms[J]. *Pertanika Journal of Science and Technology*, 2019, 27:123–135.
- [41] Charters L J, Aplin P, Marston C G, *et al.* Peat swamp forest conservation withstands pervasive land conversion to oil palm plantation in North Selangor, Malaysia[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2019, 40(19): 7409–7438. DOI: 10.1080/01431161.2019.1574996.
- [42] Descals A, Szantoi Z, Meijaard E, *et al.* Oil palm (*Elaeis guineensis*) mapping with details: Smallholder versus Industrial plantations and their extent in Riau, Sumatra[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(21):2590. DOI: 10.3390/rs11212590.
- [43] Ahmed A A, Pradhan B, Sameen M I, *et al.* An optimized object-based analysis for vegetation mapping using integration of QuickBird and Sentinel-1 data[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2018, 11(11): 1–10. DOI: 10.1007/s12517-018-3632-1.
- [44] Salas-Gonzalez D M. Changes in the area cultivated with oil palm in the canton of Osa, Puntarenas, 2014–2018 Period[J]. *Revista Geografica de America Central*, 2020(65): 93–120. DOI: 10.15359/rgac.65-2.4.
- [45] Hernandez-Rojas D A, Lopez-Barrera F, Bonilla-Moheno M, *et al.* Preliminary analysis of the land use dynamic associated with oil palm (*Elaeis Guineensis*) plantations in Mexico[J]. *Agrociencia*, 2018, 52(6):875–893.
- [46] Li W, Fu D, Su F, *et al.* Spatial-temporal evolution and analysis of the driving force of oil palm patterns in Malaysia from 2000 to 2018[J]. *ISPRS International Journal of Geo-Infor-*

- mation, 2020, 9(4): 280. DOI: 10.3390/ijgi9040280.
- [47] Nourqolipour R, Shariff A R B M, Balasundram S K, *et al.* A GIS-based model to analyze the spatial and temporal development of oil palm land use in Kuala Langat District, Malaysia [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 73(4): 1687-1700. DOI: 10.1007/s12665-014-3521-1.
- [48] Nourqolipour R, Shariff A R B M, Ahmad N B, *et al.* Multi-Objective-based modeling for land use change analysis in the South West of Selangor, Malaysia [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 74(5): 4133-4143. DOI: 10.1007/s12665-015-4486-4.
- [49] Dong T, Zhang J, Gao S, *et al.* Single-tree detection in high-resolution remote-sensing images based on a cascade neural network [J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2018, 7(9). DOI: 10.3390/ijgi7090367.
- [50] Li W, Fu H, Yu L, *et al.* Deep learning based oil palm tree detection and counting for high-resolution remote sensing images [J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(1): 22. DOI: 10.3390/rs9010022.
- [51] Santoso H, Tani H, Wang X F, *et al.* A simple method for detection and counting of oil palm trees using high-resolution multispectral satellite imagery [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2016, 37(21): 5122-5134. DOI: 10.1080/01431161.2016.1226527.
- [52] Fawcett D, Azlan B, Hill T C, *et al.* Unmanned Aerial Vehicle (UAV) derived structure-from-motion photogrammetry point clouds for oil palm (*Elaeis Guineensis*) canopy segmentation and height estimation [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2019, 40(19): 7538-7560. DOI: 10.1080/01431161.2019.1591651.
- [53] Hamsa C S, Kanniah K D, Muharam F M, *et al.* Textural measures for estimating oil palm age [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2019, 40(19): 7516-7537. DOI: 10.1080/01431161.2018.1530813.
- [54] Avtar R, Ishii R, Kobayashi H, *et al.* Efficiency of multi-frequency, multi-polarized SAR data to monitor growth stages of oil palm plants in Sarawak, Malaysia [C]//2013 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IEEE, 2013.
- [55] Tan K P, Kanniah K D, Cracknell A P, *et al.* Use of UK-DMC 2 and ALOS PALSAR for studying the age of oil palm trees in Southern Peninsular Malaysia [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2013, 34(20): 7424-7446. DOI: 10.1080/01431161.2013.822601.
- [56] McMorrow J. Linear regression modelling for the estimation of oil palm age from Landsat TM [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2001, 22(12): 2243-2264. DOI: 10.1080/01431160117188.
- [57] Margono B A, Potapov P V, Turubanova S, *et al.* Primary forest cover loss in Indonesia over 2000-2012 [J]. *Nature Climate Change*, 2014, 4(8): 730-735. DOI: 10.1038/nclimate2277.
- [58] Cracknell A P, Kanniah K D, Tan K P, *et al.* Evaluation of MODIS gross primary productivity and land cover products for the humid tropics using oil palm trees in Peninsular Malaysia and Google Earth Imagery [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2013, 34(20): 7400-7423. DOI: 10.1080/01431161.2013.820367.
- [59] Nunes M H, Ewers R M, Turner E C, *et al.* Mapping aboveground carbon in oil palm plantations using LiDAR: A comparison of tree-centric versus area-based approaches [J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(8): 816. DOI: 10.3390/rs9080816.
- [60] Thenkabail P S, Stucky N, Griscom B W, *et al.* Biomass estimations and carbon stock calculations in the oil palm plantations of African derived Savannas using IKONOS data [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, 25(23): 5447-5472. DOI: 10.1080/01431160412331291279.
- [61] Foody G M, Cutler M E, McMorrow J, *et al.* Mapping the biomass of bornean tropical rain forest from remotely sensed data [J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2001, 10(4): 379-387. DOI: 10.1046/j.1466-822X.2001.00248.x.
- [62] Fan Y, Rounsard O, Bernoux M, *et al.* A sub-canopy structure for simulating oil palm in the community land model (Clim-Palm): Phenology, allocation and yield [J]. *Geoscientific Model Development*, 2015, 8(11): 3785-3800. DOI: 10.5194/gmd-8-3785-2015.
- [63] Khamis A, Ismail Z, Haron K, *et al.* Nonlinear growth models for modeling oil palm yield growth [J]. *Journal of Mathematics and Statistics*, 2005, 1(3): 225-232. DOI: 10.3844/jms-sp.2005.225.232.
- [64] Balasundram S K, Memarian H, Khosla R, *et al.* Estimating oil palm yields using vegetation indices derived from QuickBird [J]. *Life Science Journal*, 2013, 10(4): 851-860.
- [65] Azuan N H, Khairunniza-Bejo S, Abdullah A F, *et al.* Analysis of changes in oil palm canopy architecture from basal stem rot using terrestrial laser scanner [J]. *Plant Disease*, 2019, 103(12): 3218-3225. DOI: 10.1094/pdis-10-18-1721-re.
- [66] Shafri H Z M, Anuar M I, Seman I A, *et al.* Spectral discrimination of healthy and ganoderma-infected oil palms from hyperspectral data [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2011, 32(22): 7111-7129. DOI: 10.1080/01431161.2010.519003.
- [67] Liaghat S, Ehsani R, Mansor S, *et al.* Early detection of basal stem rot disease (Ganoderma) in oil palms based on hyperspectral reflectance data using pattern recognition algorithms [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2014, 35(10): 3427-3439. DOI: 10.1080/01431161.2014.903353.
- [68] Liaghat S, Mansor S, Ehsani R, *et al.* Mid-infrared spectroscopy for early detection of basal stem rot disease in oil palm [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2014, 101: 48-54. DOI: 10.1016/j.compag.2013.12.012.

- [69] Santoso H, Tani H, Wang X, *et al.* Random forest classification model of basal stem rot disease caused by *Ganoderma boninense* in oil palm plantations[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2017, 38(16):4683-4699. DOI:10.1080/01431161.2017.1331474.
- [70] Santoso H, Tani H, Wang X F, *et al.* Classifying the severity of basal stem rot disease in oil palm plantations using Worldview-3 imagery and machine learning algorithms[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2019, 40(19):7624-7646. DOI: 10.1080/01431161.2018.1541368.
- [71] Izzuddin M A, Hamzah A, Nisfariza M N, *et al.* Analysis of multispectral imagery from Unmanned Aerial Vehicle (UAV) using object-based image analysis for detection of *ganoderma* disease in oil palm[J]. *Journal of Oil Palm Research*, 2020, 32(3):497-508. DOI:10.21894/jopr.2020.0035.
- [72] Santoso H, Gunawan T, Jatmiko R H, *et al.* Mapping and identifying basal stem rot disease in oil palms in North Sumatra with QuickBird imagery[J]. *Precision Agriculture*, 2010, 12(2):233-248. DOI: 10.1007/s11119-010-9172-7.
- [73] Samseemoung G, Jayasuriya H P W, Soni P, *et al.* Oil palm pest infestation monitoring and evaluation by helicopter-mounted, low altitude remote sensing platform[J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2011, 5(1):053540. DOI: 10.1117/1.3609843.
- [74] Husin N A, Khairunniza-Bejo S, Abdullah A F, *et al.* Application of ground-based LiDAR for analysing oil palm canopy properties on the occurrence of Basal Stem Rot (BSR) Disease[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1):1-16. DOI: 10.1038/s41598-020-62275-6.
- [75] Rakib M R M, Bong C F J, Khairulmazmi A, *et al.* Association of copper and zinc levels in oil palm (*Elaeis Guineensis*) to the spatial distribution of *ganoderma* species in the plantations on peat[J]. *Journal of Phytopathology*, 2017, 165(4):276-282. DOI: 10.1111/jph.12559.
- [76] Pirker J, Mosnier A, Kraxner F, *et al.* What are the limits to oil palm expansion?[J]. *Global Environmental Change*, 2016, 40:73-81. DOI:10.1016/j.gloenvcha.2016.06.007.
- [77] Ogunkunle A O. Soil in land suitability evaluation-An example with oil palm in Nigeria[J]. *Soil Use and Management*, 1993, 9(1):35-40. DOI: 10.1111/j.1475-2743.1993.tb00925.x.
- [78] Xin Y, Sun L, Hansen M, *et al.* Biophysical and socioeconomic drivers of oil palm expansion in Indonesia[J]. *Environmental Research Letters*, 2020, 16(3):034048. DOI: 10.1088/1748-9326/abce83.
- [79] Olaniyi A O, Ajiboye A J, Abdullah A M, *et al.* Agricultural land use suitability assessment in Malaysia[J]. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 2015, 21(3):560-572.
- [80] Pohl C, Kanniah K D, Loong C K, *et al.* Monitoring oil palm plantations in Malaysia[C]//2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Piscataway, NJ: IEEE, 2016.
- [81] Shafri H Z M, Ismail M H, Razi M K M, *et al.* Application of LiDAR and optical data for oil palm plantation management in Malaysia[C]//LiDAR Remote Sensing for Environmental Monitoring XIII. BELLINGHAM, WA: SPIE-INT SOC OPTICAL ENGINEERING, 2012.
- [82] Yu L, Liang L, Wang J, *et al.* Meta-discoveries from a synthesis of satellite-based land-cover mapping research[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2014, 35(13):4573-4588. DOI: 10.1080/01431161.2014.930206.
- [83] Ming Dongping, Wang Qun, Yang Jianyu, *et al.* Spatial scale of remote sensing image and selection of optimal spatial resolution[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2008, 12(4):529-537[明冬萍, 王群, 杨建宇. 遥感影像空间尺度特性与最佳空间分辨率选择. *遥感学报*, 2008, 12(4):529-537].
- [84] Rakwatin P, Longépé N, Isoguchi O, *et al.* Using multiscale texture information from ALOS PALSAR to map tropical forest[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2012, 33(24):7727-7746. DOI:10.1080/01431161.2012.701349.
- [85] Yusoff N M, Muharam F M, Khairunniza-Bejo S, *et al.* Towards the use of remote-sensing data for monitoring of abandoned oil palm lands in Malaysia: A semi-automatic approach[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2017, 38(2):432-449. DOI:10.1080/01431161.2016.1266111.
- [86] Koh L P, Miettinen J, Liew S C, *et al.* Remotely sensed evidence of tropical peatland conversion to oil palm[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, 108(12):5127-5132. DOI:10.1073/pnas.1018776108.
- [87] Li L, Dong J, Tenku S N, *et al.* Mapping oil palm plantations in cameroon using PALSAR 50 m orthorectified mosaic images[J]. *Remote Sensing*, 2015, 7(2):1206-1224. DOI: 10.3390/rs70201206.
- [88] Carlson K M, Curran L M, Asner G P, *et al.* Carbon emissions from forest conversion by Kalimantan oil palm plantations[J]. *Nature Climate Change*, 2012, 3(3):283-287. DOI: 10.1038/nclimate1702.
- [89] Yuan Ming. Research and implementation of FPGA-based object detection accelerator for remote sensing[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2020[袁鸣. 基于FPGA的遥感目标检测加速器的研究与实现[D]. 无锡: 江南大学, 2020.].
- [90] Noon I K, Duker A A, Van Duren I, *et al.* Support vector machine to map oil palm in a heterogeneous environment[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2014, 35(13):4778-4794. DOI: 10.1080/01431161.2014.930201.

Application of Space Observation Technology in Oil Palm Research

Zhao Qiang¹, Yu Le², Xu Yidi², Li Weijia³, Zheng Juepeng², Fu Haohuan²,
Lu Hui², Zhang Yongguang¹, Gong Peng⁴

(1.School of Geography and Ocean Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China;

2.Department of Earth System Science, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

3.CUHK-SenseTime Joint Lab, The Chinese University of Hong Kong, Hong Kong, China;

4.Department of Geography and Earth Sciences, The University of Hong Kong, Hong Kong, China)

Abstract: Oil palm is a major economic crop and the area of land converted to oil palm cultivation in the tropics has expanded rapidly. Oil palm has become the world's largest source of vegetable oil and it provides tremendous regional economic benefits. However, the expansion of oil palm cultivation has led to the loss of forests, arable land, and peatland, which has caused severe ecological and environmental problems. Application of 3S (RS, GIS, GNSS) technology is useful for the collection, analysis, and management of spatial information, and is essential for both optimizations of the spatial distribution of land use and sustainable development. This paper analyzes the progress of 3S technology application in oil palm research on the basis of a literature review and scientometric analysis. The factors affecting the precision of oil palm mapping are also discussed. We established that papers describing 3S technology application in oil palm research are based primarily on the study of land cover change, and that scientific institutions and researchers in Malaysia, the United States, China, Indonesia, and the United Kingdom are the major contributors. Currently, the application of 3S technology in oil palm research includes oil palm mapping, oil palm land change monitoring, oil palm tree counting, tree age estimation, aboveground biomass and carbon storage estimation, suitability analysis, yield estimation, pest and disease monitoring, and plantation management. The accuracy of mapping is not correlated significantly with the year of publication of specific literature but is correlated with RS data sources and classification methods. The use of 3S technology in oil palm research is currently dominated by RS, which has been used in diverse fields of oil palm research. GIS technology is used mainly for oil palm land change mapping, suitability analysis, plantation management, and pest and disease monitoring, while GNSS is used largely as an additional tool in pest and disease monitoring and plantation management.

Key words: Oil palm; 3S technology; Scientometric analysis; Sustainable development