

## ◆特邀专稿◆

## 西南喀斯特地区植被定量遥感研究进展\*

姚月锋\*\*, 何文

(广西壮族自治区中国科学院广西植物研究所, 广西喀斯特植物保育与恢复生态学重点实验室, 广西桂林 541006)

**摘要:**喀斯特地区植被相比非喀斯特地区具有更高的时空差异性,在维持脆弱生态系统稳定与可持续发展中具有极其重要的作用。西南喀斯特地区作为全球生物多样性热点地区,植被类型多样且存在显著的同物异谱/同谱异物现象。为更精准、高效地进行喀斯特地区植被定量遥感研究,本文从个体尺度到生态系统尺度,从遥感数据源选择和方法应用上回顾了西南喀斯特地区植被定量遥感的研究进展,并探讨下一步需要重点关注的研究方向。西南喀斯特地区植被定量遥感研究主要集中在群落和生态系统尺度的植被覆盖度、植被分类、生态系统服务功能与价值研究;遥感影像数据应用相对单一,主要为被动成像中低分辨率的光学影像(如 Landsat 和 MODIS)。在个体和种群尺度上,虽采用了地物高光谱遥感技术和无人机遥感技术,但该技术主要应用于小尺度近地面植物个体和种群研究,难以扩展到区域范围。亟待开展融合多源影像,尤其是激光雷达影像(Light Detection and Ranging, LiDAR)与非影像数据的应用及其先进分析方法研究,以及个体和种群尺度的喀斯特地区植被生化参数定量估算与自然植被物种精准识别,群落和生态系统尺度的生物多样性与碳循环定量遥感研究工作,以期为喀斯特地区植被格局、过程及其生态系统服务功能定量研究、脆弱生态系统植被恢复和石漠化治理决策的制定提供参考。

**关键词:**植被状况 尺度 多源数据 定量遥感 喀斯特地貌 西南地区

中图分类号:Q948, TP79 文献标识码:A 文章编号:1005-9164(2022)05-0824-15

DOI:10.13656/j.cnki.gxkx.20221116.002

植被作为陆地生态系统不可或缺的部分,是全球变化最直接的指示器,成为全球碳循环和水热平衡研究的核心内容<sup>[1,2]</sup>。然而,植被及其生态系统存在高度时空差异性,尤其在生态系统脆弱的喀斯特地区,复杂的地质背景决定了植被高度时空差异及其影响

因子的多样性和复杂性<sup>[3]</sup>。因此,厘清植被分布的空间差异,提高植被有效信息的获取精度以完成植被动态过程监测,成为生态环境研究的重要课题之一<sup>[4]</sup>。传统的植被定量研究方法如野外调查、文献查阅、地图解译以及其他辅助信息方法费时费力,且不能及时

收稿日期:2022-04-18

修回日期:2022-06-05

\* 国家自然科学基金项目(32060369,31860174)和广西重点研发计划项目(桂科 AB22035060)资助。

## 【作者简介】

姚月锋(1981-),男,博士,副研究员,主要从事环境生态遥感研究,E-mail:yf.yao@gxib.cn。

## 【\*\*通信作者】

## 【引用本文】

姚月锋,何文.西南喀斯特地区植被定量遥感研究进展[J].广西科学,2022,29(5):824-838.

YAO Y F, HE W. Research Progress in Quantitative Remote Sensing of Vegetation in Southwest Karst Area [J]. Guangxi Sciences, 2022, 29(5): 824-838.

反映植被现状<sup>[5]</sup>。遥感技术具有宏观、快速、高效、多源信息等优势,是大范围、动态性获取地面植被有效信息,以及研究区域乃至全球尺度植被状况及其动态过程必不可少的手段<sup>[6]</sup>。20世纪70年代,第一颗陆地卫星 Landsat 发射,开启了基于遥感技术的植被监测与分类研究<sup>[7]</sup>,但遥感技术早期主要以影像为信息源,通过目视解译等人工方法确定植被类型,或通过影像密度建立有关地表参数经验模型,从而反演地表植被生态参数<sup>[8]</sup>。随着多光谱、高光谱、热红外、微波雷达、激光雷达以及无人机技术日趋成熟<sup>[9,10]</sup>,遥感技术在植被定量研究应用上已从小范围、二维尺度的传统地面测量发展到大范围、多维时空遥感模型估算<sup>[11-14]</sup>;从个体到生态系统的植被生态参数<sup>[15-17]</sup>、物种分布<sup>[18,19]</sup>、生物多样性<sup>[20-23]</sup>、碳循环<sup>[24-27]</sup>及其空间差异,再到不同尺度自然与人为因素引起的植被及其生态系统服务功能变化。遥感影像处理技术已从过去简单的植被指数、几何模型、混合模型等发展到先进的机器学习和深度学习等智能化多平台相结合<sup>[9,28-32]</sup>。随着遥感影像数据类型的多样化,如2018年的热红外影像(Ecosystem Spaceborne Thermal Radiometer Experiment on Space Station, ECOSTRESS),激光雷达影像(Global Ecosystem Dynamics Investigation, GEDI),第二代对地观测激光雷达冰、云和陆地高程2号卫星(Ice, Cloud, and Land Elevation Satellite-2, ICESat-2)以及2019年的高光谱影像(Hyperspectral Imager Suite, HISUI),如何从遥感影像数据中高效、智能化地提取地表植被有效信息,以实现多维时空、区域乃至全球尺度植被定量遥感研究,多源遥感数据融合和同化等方法的研究显得至关重要<sup>[33]</sup>。

受水平和垂直空间高度异质性地质背景影响,喀斯特生境上发育的植被类型复杂、特点鲜明,与同纬度非喀斯特生境的常绿阔叶林和季节性雨林相比,喀斯特地区植被类型主要为常绿与落叶阔叶混交林和落叶成分较多的季节性雨林<sup>[34]</sup>;且喀斯特地区植被对干旱胁迫与高钙立地条件具有较强的适应性<sup>[35]</sup>。因此,喀斯特地区植被定量遥感研究需要考虑高度景观异质性地质背景的影响和植被适应干旱胁迫与高钙等特殊立地条件后所具有的特殊光谱特征。以往对植被定量遥感的研究主要集中在非喀斯特地区,而喀斯特地区相对较少。截至2022年5月10日,在Web of Science(<https://www.webofscience.com/wos/woscc/basic-search>)上,基于主题(Topic)为

“remote sensing” + “vegetation”所检索到的研究综述期刊论文(Review articles)总数为760篇;但限制主题为“remote sensing” + “vegetation” + “karst”检索的研究综述期刊论文仅1篇,Zhang等<sup>[36]</sup>总结了基于地理空间技术对西南喀斯特地区植被恢复监测与评价的研究进展。同时,在中国知网(www.cnki.net)上,基于主题为“植被” + “遥感”所检索到的学术期刊论文共1.21万条,但限制主题为“植被” + “遥感” + “喀斯特”或“植被” + “遥感” + “岩溶”,检索到的学术期刊论文分别为133条和94条。喀斯特地区占世界陆地面积约15%,其生态环境保护对可持续发展具有全球性战略地位<sup>[37,38]</sup>。我国西南喀斯特地区作为世界上喀斯特发育最典型、最复杂,景观类型最丰富且连片分布面积最大的区域<sup>[39]</sup>,同时也是珠江源头、长江乃至东南亚一些国际河流的重要补给区,对喀斯特区域生态环境保护有着重要的战略性地位<sup>[40]</sup>。但该地区也属于革命老区、少数民族自治地区、陆地边境地区和欠发达地区,贫困区与石漠化地区高度重叠,形成了典型的生态脆弱区。因此,西南喀斯特地区植被定量研究对于石漠化治理以及维持脆弱生态系统稳定与可持续发展起着决定性作用<sup>[41]</sup>。受高度景观异质性和多云雾天气影响,该地区高时空分辨率和高质量的星载光学遥感数据难以获取,而中低分辨率的多光谱遥感难以精细提取地表植被有效信息<sup>[42,43]</sup>;加上地表植被类型多样且存在显著同物异谱/同谱异物现象<sup>[44]</sup>,导致快速、精准获取地表植被有效信息的不确定性增加,进而影响西南喀斯特地区植被定量遥感研究的发展<sup>[6]</sup>。

植被在维持喀斯特脆弱生态系统稳定与可持续发展中具有极其重要的作用<sup>[45,46]</sup>。为了更精准、高效地进行喀斯特地区植被定量遥感研究,本文从个体到生态系统尺度、从遥感数据源选择和影像处理技术上总结了西南喀斯特地区植被定量遥感研究进展,并探讨其存在的困难和科学问题,以为相关领域的研究提供科学参考。

## 1 西南喀斯特地区植被个体与种群尺度定量遥感研究

在叶片器官、植被个体以及种群尺度上,西南喀斯特地区植被定量遥感研究还相对较少。在叶片生理生化方面,现有的研究主要是基于地物高光谱遥感技术探讨叶片光谱信息与叶片生理生化参数之间的关系,以期将尺度扩展到整个区域的植被生化参数定

量遥感估算。例如,通过地物高光谱遥感技术获取叶片的光谱信息,并同步测定叶片生化组分含量信息,再利用光谱指数和先进深度学习方法(反向传播神经网络和广义回归神经网络),构建喀斯特植被叶片生化参数与光谱信息关系模型<sup>[47,48]</sup>,即可借助该模型快速获取喀斯特地区植被叶片生化组分含量信息。刘波等<sup>[49]</sup>采用自主设计的地面成像光谱系统(Field Imaging Spectrometer System,FISS),结合可视化手段获取了毫米级高空间分辨率的植被叶片在脱水胁迫状态下的“红边蓝移”现象。地物高光谱遥感技术可有效估测植被叶片在喀斯特环境下特有的耐寒特征<sup>[50,51]</sup>,对干旱胁迫下植被健康监测有着重要的指导意义。然而,地物高光谱遥感技术目前主要应用于小尺度近地面植被叶片生化组分研究,且需要大量的实测数据支撑,还难以扩展到区域性范围。

喀斯特地区自然植被物种识别是当前研究的难点。Chen等<sup>[52]</sup>通过地物高光谱遥感技术结合玻尔兹曼机方法,对8种不同杜鹃花叶片的光谱特征进行识别与区分。地物高光谱遥感技术的缺点是费时、费力,且需在晴天条件下采集数据。无人机遥感可以克服多云雾天气影响,快速、准确地获取地面高分辨、高质量影像,有利于高度景观异质性喀斯特地区植被有效信息的提取与识别<sup>[53,54]</sup>。例如,基于无人机可见光影像,结合最大类间方差法可完成喀斯特高原峡谷

区火龙果单株信息的识别与提取,但受植株倒伏等因素影响,分离完好的单株植被信息提取精度仅占总植株数的50.20%<sup>[55]</sup>。在该研究基础上,Huang等<sup>[56]</sup>通过对无人机影像进行高斯高通滤波处理和阈值分割,提高了基于无人机遥感技术的火龙果单株信息识别与提取精度。该方法也适用于喀斯特地区山药和花椒单株信息的识别与提取<sup>[43,57]</sup>。但基于无人机遥感技术的喀斯特地区物种识别,目前多局限于种植规范的农作物物种信息提取,对于自然植被物种的定量遥感精准识别还有待加强。

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar,SAR)卫星影像作为不受气候影响的主动遥感数据,可以克服喀斯特地区多云雾天气的影响,更适合喀斯特地区地表植被有效信息的提取。例如周忠发教授研究团队采用合成孔径雷达完成了喀斯特山区烟草生长状况的监测<sup>[58-61]</sup>。此外,星载遥感影像也可以用来研究植被个体水分状态及其受水分胁迫的生长状况<sup>[62]</sup>。但在个体和种群尺度上,融合多源数据的喀斯特地区植被定量遥感研究还相对较少(表1),采用遥感影像类型也较为单一。未来研究需充分发挥地物高光谱遥感和无人机遥感影像的高时空分辨率,以及星载遥感影像的长时间序列优势,拓展个体和种群尺度的喀斯特地区植被定量遥感研究,尤其是植被叶片生化参数定量估算和自然植被物种精准识别研究。

表1 喀斯特地区植被个体和种群尺度生态参数的定量遥感研究

Table 1 Quantitative remote sensing study on vegetation individual and population scale ecological parameters in karst area

参数 Parameters	遥感数据源 Remote sensing data sources	方法 Methods	优点 Advantages	缺点 Disadvantages	代表参考文献 Representative references
Leaf chlorophyll Leaf C : N : P	Field hyperspectrum	Spectral index Backpropagation neural network General regression neural network	Leaf biochemical parameters can be rapidly and accurately estimated	Need a large amount of investigation data for validation	[47,48]
Image of leaf spectrum	Field hyperspectrum	Photochemical Reflectance Index (PRI) Self-developed field imaging spectrometer system	Can obtain high spatial resolution hyperspectral image of leaf	Easy impacted by optical source	[49]
Leaf spectrum	Field hyperspectrum	Boltzmann machine	High accuracy in classification	Hard to understand	[52]
Leaf spectrum	Field hyperspectrum	Canonical Correspondence Analysis (CCA)	Rapidly estimated	Subjectively	[50]
Leaf traits	Field hyperspectrum	PRI Principal Component Analysis (PCA)	Can explore the ecological strategies and habitat affiliation of species	Need a large amount of investigation data for validation	[51]
Species of crops	Unmanned Aerial Vehicle (UAV) remote sensing imagery	Spectral index OTSU threshold segmentation method	Easy for estimation	Easily influenced by field backgrounds information	[55]

续表

Continued table

参数 Parameters	遥感数据源 Remote sensing data sources	方法 Methods	优点 Advantages	缺点 Disadvantages	代表参考文献 Representative references
Species of crops	Unmanned Aerial Vehicle (UAV) remote sensing imagery	Spectral index Gaussian High-Pass Filter (GHPF) OTSU threshold segmentation method	High accuracy	Easily influenced by field backgrounds information	[56]
Leaf traits	Synthetic aperture Radar (SAR) image	Linear regression	Overcome the cloudy weather impacts	Lack clear physical mechanism	[58, 59]
Leaf water content	Sentinel-2 imagery	Spectral index Generalized Linear Mixed Models (GLMMs) Gaussian model	Easy for estimation	Hard to obtain high quality imagery	[62]

## 2 西南喀斯特地区植被群落与生态系统尺度定量遥感研究

植被群落与生态系统尺度上喀斯特地区植被定量遥感研究相比其他尺度研究更广泛,主要集中在植被覆盖度与其他植被指数、植被分类和植被生态系统定量遥感研究。

### 2.1 植被覆盖度与其他植被指数定量遥感估算

植被覆盖度为单位面积内植被地上部分垂直投影面积占总面积的百分比,是陆地生态系统的重要表征指标之一,也是全球碳循环估算以及生物地球化学循环、水循环、生物多样性和全球变化模型的重要参数<sup>[63]</sup>。遥感技术的快速发展为复杂地质背景的西南喀斯特地区植被覆盖度定量估算提供了可能,并发展了多种估算地表植被覆盖度和其他植被指数的方法(表2)。地物高光谱遥感技术可用于估算喀斯特地区近地面绿色植被和干枯植被等不同地类的植被覆盖度<sup>[64,65]</sup>,为喀斯特地区石漠化评价提供技术支撑。无人机遥感技术在克服喀斯特地区多云雾天气并提高植被覆盖度定量估算精度的同时,也成为有效衔接地面观测与常规植被遥感监测的桥梁<sup>[40,53]</sup>。Landsat影像和MODIS影像具有较好的空间分辨率和较长的时间序列优势,被广泛应用于喀斯特地区植被覆盖度和植被指数定量估算<sup>[65-76]</sup>及其与地表温度<sup>[77,78]</sup>、地形<sup>[79-87]</sup>、气候等因子间关系<sup>[88-96]</sup>的研究,为喀斯特地区干旱遥感监测<sup>[97,98]</sup>与石漠化评价提供技术支撑<sup>[99-103]</sup>。但受复杂的喀斯特地区多云雾天气的影响,往往难以获取高质量的光学影像,从而制约了喀

斯特地区植被覆盖度与其他植被指数定量研究发展。因此,有学者尝试通过统计学方法插值来弥补因光学影像质量问题而引起的数据缺失,进而估算地表植被指数<sup>[104-106]</sup>。此外,随着遥感计算云平台的发展,其融合了海量多源数据尤其是长时间序列的Landsat卫星数据,只需进行少量代码编程即可快速完成长期的大批量数据处理,为加速完成喀斯特地区植被覆盖度长期遥感动态监测提供有利的技术支撑<sup>[107,108]</sup>。地物高光谱遥感技术和无人机遥感技术虽可获取高分辨率影像,但需要大量的地面实测数据加以验证,目前难以扩展到大范围植被定量研究。Landsat影像和MODIS影像可获取大范围地物光谱信息,但其空间分辨率依然粗糙,加上受多云雾天气影响,其数据质量不确定性增加,难以满足特定斑块植被和重点植被有效信息的精准识别,需融合更高的时空分辨率和高光谱影像。研究表明,基于高分辨率与地物高光谱遥感技术可以明显提高喀斯特地区植被覆盖度信息的提取精度<sup>[109-114]</sup>。例如,相比ASTER多光谱遥感影像,Hyperion高光谱遥感影像在估算干枯植被和基岩裸露率时具有更高的精度<sup>[111]</sup>。然而,受复杂地质背景和多云雾天气的影响,现有遥感卫星影像的覆盖范围及质量难以满足喀斯特地区地表植被覆盖度与其他植被指数的精准估算;遥感影像处理技术主要还是以像元二分模型等简单方法为主,有待融合多源遥感影像并融入具有自动学习能力的机器学习或深度学习方法,以扩展喀斯特地区植被覆盖度与其他植被指数的定量研究。

表 2 喀斯特地区植被盖度与其他植被指数反演

Table 2 Estimation of vegetation cover and other vegetation indices with remote sensing data

参数 Parameters	遥感数据源 Remote sensing data sources	方法 Methods	优点 Advantages	缺点 Disadvantages	代表参考文献 Representative references
Fraction cover of vegetation	Field hyperspectrum	Linear Spectral Unmixing (LSU) Karst Rocky Desertification Synthesis Index (KRDSI)	Quickly estimate the fractional covers	Less accuracy in estimation of exposed bedrock cover	[65]
Fraction cover of vegetation	Landsat image MODIS image	Dimidiate pixel model	Easy for estimation	Hard to obtain high quality imagery	[70,73, 74,87]
Fraction cover of vegetation	Landsat image MODIS image	Dimidiate pixel model Google Earth Engine (GEE)	Quickly and easily handle multi-sources images in one platform	Need coding	[107]
Fraction cover of vegetation	EO-1 Hyperion imagery EOS Terra ASTER imagery	Spectral index Threshold segmentation method	Improve estimated accuracy	Hard to obtain imagery	[111,112]
Fraction cover of vegetation	EO-1 Hyperion imagery EOS Terra ASTER imagery	Pixel unmixing Pixel purity index Mixture tuned matched filtering	Improve estimated accuracy	Hard to obtain imagery	[109,110]
Lear Area Index (LAI)	Landsat image	Regression	Easy for estimation	Cannot be applied universally	[99]
Karst Rocky Desertification Index (KRDI)	Landsat image	Time-spectrum feature space model GEE	Improve estimated accuracy	Hard to obtain high quality imagery	[108]

## 2.2 植被分类

在喀斯特地区植被分类定量遥感研究中, Landsat 影像依然是应用最广泛的数据源。基于 Landsat 影像, 采用单一的线性光谱分离技术, 虽然可以直接对地表植被和土壤裸露等类型进行分类<sup>[115,116]</sup>, 但受地质背景影响, 其分类精度相对较低。为提高喀斯特地区植被分类精度, 可通过影像处理以降低地形的影响, 并采用最大似然<sup>[117-119]</sup>、面向对象<sup>[46,120]</sup>以及神经网络<sup>[121]</sup>等方法有效完成喀斯特地区植被分类。相比植被覆盖度与其他植被指数定量遥感研究, 喀斯特地区植被分类融合了多种影像数据并结合多种分类方法(表 3)。例如融合 SAR、Google Earth 和无人机高分辨率光学影像完成喀斯特地区农作物的分类, 分类总精度为 75.98%<sup>[122]</sup>; 相比单一的 ALOS 多光谱

数据, 融合 ALOS 多光谱数据和 TerraSAR-X 数据能更好地提高喀斯特地区地表植被分类精度(提高 8% - 13%)<sup>[123]</sup>; 利用高分辨率的商业卫星影像如 QuickBird<sup>[124]</sup>、Worldview<sup>[125]</sup> 以及高光谱影像如 Hyperion 和 ASTER<sup>[126]</sup>, 能够精准识别和提高喀斯特地区植被分类精度。此外, 国产高分辨率影像数据(如高分影像)也被广泛应用于喀斯特地区植被分类<sup>[44,127]</sup>, 且分类精度也不亚于国外高分辨率影像<sup>[128]</sup>。除了传统的植被指数光谱混合分析模型外<sup>[126]</sup>, 面向对象<sup>[125]</sup>、支持向量机以及神经网络<sup>[124,129,130]</sup>等机器学习与深度学习方法也被广泛应用, 这些遥感影像处理方法能够更有效地完成喀斯特地区植被分类。

表 3 喀斯特地区植被分类定量遥感研究

Table 3 Vegetation classification with remote sensing technologies

遥感数据源 Remote sensing data	方法 Methods	优点 Advantages	缺点 Disadvantages	代表参考文献 Representative references
Landsat image	Linear spectral unmixing method	Improve unmixing accuracy for mixture pixel	Need pure pixel for the endmembers	[115,116]
Landsat image	Maximum likelihood classifier	Easy for estimation	Hard to obtain high quality imagery	[117-119]

续表

Continued table

遥感数据源 Remote sensing data	方法 Methods	优点 Advantages	缺点 Disadvantages	代表参考文献 Representative references
Landsat image	Object oriented method	Improve accuracy in classification	Hard to obtain high quality imagery	[120]
Landsat image	Back-propagation neural network model	Improve accuracy in classification	Need a large amount of testified data for validation	[121]
Sentinel-1 SAR image	Convolutional Neural Network (CNN) Recursive Neural Network (RNN)	Improve accuracy in classification	Complicated in estimation	[122]
ALOS AVNIR multispectral image Terrasar-X SAR image	Decision tree	Improve accuracy in classification	Need a large amount of training data for calibration	[131]
ALOS AVNIR multispectral image Terrasar-X SAR image	Support Vector Machine (SVM)	Improve accuracy in classification	Need synchronization	[123]
Worldview image	Object oriented method	Improve accuracy in classification	High cost in obtaining images	[125]
QuickBird image	CNN SVM	Improve accuracy in classification	Hard to understand	[124]
EO-1 Hyperion image ASTER multispectral image	Spectral index Spectral mixture analysis	Improve accuracy in classification	Need pre-processing	[126]
China-Brazil Earth Resources Satellite (CBERS)-02B image	Spectral index Decision tree	Improve accuracy in classification	Need a large amount of training data for calibration	[128]
UAV image	Object oriented method	Improve accuracy in classification	Need pre-processing	[129]
UAV image	Object-based Random Forest (RF)-Decision Tree (DT) SegNet algorithm	Improve accuracy in classification	Need pre-processing Complicated in estimation	[130]
UAV image Sentinel-1 and Sentinel-2 images	RF	Improve accuracy in classification	Need a large amount of training data for calibration	[132]

### 2.3 植被生态系统定量遥感研究

西南喀斯特地区植被生态系统定量遥感研究主要集中在植被生产力、生态系统服务功能与价值评价,在生物多样性和碳循环方面的研究相对较少(表4)。Yan等<sup>[133]</sup>通过Landsat影像与植被指数方法尝试对喀斯特地区生物多样性进行专题图制作,并指出优化的土壤调节植被指数(Soil-Adjusted Vegetation Index, SAVI)能够较好地表征喀斯特地区植被香浓-威纳指数。但受复杂喀斯特地区地质背景的影响,实地调查往往难以深入,给区域植被生物多样性定量遥感研究带来了巨大挑战。碳循环一直是全球变化研究的热点问题<sup>[134,135]</sup>,而占全球陆地面积约15%的喀斯特地区,其碳循环研究也成为全球变化研究不可或缺的一部分,并因此备受关注<sup>[36,39]</sup>。在融合多源数据的西南喀斯特地区碳循环定量遥感估算研究方面,张明阳等<sup>[136-139]</sup>基于Landsat影像和MODIS影像,

利用Carnegie-Ames-Stanford Approach (CASA)模型和光合作用公式,完成了喀斯特地区植被碳储量和碳密度时空特征,以及植被固定二氧化碳和释放氧气的比例定量研究。但该研究未考虑土壤碳库对喀斯特地区植被生态系统碳循环贡献的影响。

在植被生产力定量遥感研究方面,以往的研究大多采用中低分辨率的Landsat影像和MODIS影像,并结合简单分析或生态过程模型,估算喀斯特地区地表植被生产力<sup>[140]</sup>。例如,通过简单的MODIS植被总第一性生产力(Gross Primary Productivity, GPP)和净第一性生产力(Net Primary Productivity, NPP)数据,发现喀斯特地区植被生产力小于非喀斯特地区<sup>[141,142]</sup>,但喀斯特地区关键带或亚喀斯特地区对植被生长与恢复有重要意义<sup>[37,143]</sup>。因喀斯特地区易受干旱等胁迫因子影响<sup>[144]</sup>,未来需要加强开展极端气候对脆弱喀斯特生态系统影响的研究。在方法上,结

合生态过程模型可以较好地定量估算喀斯特地区地表植被生产力<sup>[145]</sup>。例如,采用常用的 CASA 模型,并结合 Landsat 数据和 SPOT NDVI 数据,可以较好

地定量估算喀斯特地区 NPP、Net Ecosystem Productivity(NEP)<sup>[139,146]</sup>;通过引用新的参数改进 CASA 模型能够较好地估算喀斯特地区植被 NPP,增强

表 4 喀斯特地区植被生态系统定量遥感研究

Table 4 Estimation of ecosystem services and its functions with remote sensing technologies

指标 Index	遥感数据源 Remote sensing data	方法 Methods	优点 Advantages	缺点 Disadvantages	代表参考文献 Representative references
Plant diversity	Landsat image	Spectral index Regression analysis	Easy for estimation	Need a large amount of investigation data	[133]
Carbon sequestration	Landsat image MODIS image	Carnegie-Ames-Stanford Approach (CASA)	Rapidly estimate carbon sequestration and carbon density	Rely on the spatial resolution of remote sensing images	[136-139]
Gross Primary Production (GPP) Net Ecosystem Exchange (NEE)	Landsat image Proba-V platform products	Spectral index Regression	Easy for estimation	Cannot be applied universally	[140]
Gross Primary Production (GPP) Net Ecosystem Exchange (NEE)	MODIS image	Light Use Efficiency (LUE) model	Easy for estimation	Cannot be applied universally	[141,145]
Gross Primary Production (GPP) Net Ecosystem Exchange (NEE)	Landsat image SPOT NDVI	Modified CASA	Improve accuracy in estimation	Rely on the quality of images	[147,148]
Gross Primary Production (GPP) Net Ecosystem Exchange (NEE)	MODIS image Landsat image	Global Production Efficiency Model-Carbon Exchange between Vegetation, Soil and Atmosphere (GLOPEM-CEVSA)	Improve accuracy in estimation	Too many input parameters Relied on the quality of images	[149]
Gross Primary Production (GPP) Net Ecosystem Exchange (NEE)	MODIS image Landsat image	Vegetation Photosynthesis Model (VPM)	Improve accuracy in estimation	Cannot be applied universally	[150,151]
Gross Primary Production (GPP) Net Ecosystem Exchange (NEE)	Landsat image Sentinel-1A	K-Deep Belief Network (K-DBN) GEE	Improve accuracy in estimation	Need to consider canopy density	[152]
Ecosystem Health (ESH) index	MODIS image	Pressure-State-Response (PSR) framework	Consider human pressure	Rely on the availability and quality of the input data	[153]
Ecological environment quality	Landsat image	Spectral index Comprehensive Ecological Evaluation Index (CEEI) model GEE	Improve accuracy in estimation	Rely on the quality of images	[154]
Ecological environment quality	Landsat image	Remote Sensing Ecological Index (RSEI) model	Consider greenness, wetness, dryness, and heat for estimation	Rely on the quality of images	[155]
Ecosystem stability	Landsat image	Spectral index GEE	Rapidly and effectively estimate large-scale ecosystem stability	Rely on the quality of images	[156]
Forest's resilience	MODIS image	Bayesian Dynamic Linear Model (BDLM)	Can monitor large-scale forest resilience effectively	Subjective in indicator selection	[157]
Ecosystem services	Landsat image	Remote sensing-based evaluation system	Ecosystem services can be evaluated with remote sensing images	Cannot be applied universally	[158]
Ecosystem service values	Landsat image	CCA	Consider environmental factors	Rely on the quality of images	[159]
Ecosystem service values	Landsat-based land use and land cover product	Equivalent factor method	Consider land use data	Rely on the quality of land use data	[160]

模型实用性<sup>[147,148]</sup>。此外,还有 Carbon and Exchange between Vegetation, Soil, and Atmosphere (CEVSA) 模型<sup>[149,150]</sup>、Vegetation Photosynthesis Model(VPM)<sup>[150,151]</sup>,以及引入林冠密度构建的深度置信网络(Deep Belief Network)模型(K-DBN)<sup>[152]</sup>等喀斯特地区地表植被生产力/生物量定量遥感估算模型。但受模型参数、影像数据分辨率及其质量影响,喀斯特地区地表植被生产力定量遥感估算的不确定性依然存在<sup>[151]</sup>。

此外,在石漠化治理等生态恢复工程实施过程中,喀斯特地区植被生态系统服务功能与价值定量遥感研究也备受关注。基于 Landsat 影像和 MODIS 影像,并结合植被指数和模型方法等,可有效完成喀斯特地区生态环境质量动态监测研究<sup>[153-155]</sup>。相比自然林分,喀斯特地区脆弱生态系统的稳定性较低<sup>[156]</sup>,尤其在人工植被恢复方面弹性较低,因此更容易受干旱等胁迫因子影响<sup>[157]</sup>。相比其他地区,西南喀斯特地区生态系统服务价值相对较低<sup>[159]</sup>。受影像数据和模型参数等因素影响,西南喀斯特地区生态系统服务功能与价值评价指标体系还不够完善,缺乏统一的评价指标体系<sup>[158]</sup>。因此,需要融合影像与非影像数据并综合考虑不同地区特点,以完善西南喀斯特地区生态系统服务功能与价值估算及其对区域可持续发展影响的研究<sup>[38,147,160]</sup>。

### 3 展望

西南喀斯特地区植被定量遥感研究具有很强的区域特色,但因其高景观异质性的地质背景以及多云雾天气的影响,地表植被有效信息的精准提取与分类依然存在很大的不确定性。相比非喀斯特地区,西南喀斯特地区植被定量遥感研究在研究内容、多源影像与非影像数据应用及其数据挖掘等方面还显得相对薄弱,亟待加强。

(1)生物多样性使地球充满生机,也是人类生存和发展的基础。在碳达峰和碳中和的双重目标驱动下,约占国土总面积 5%且作为全球范围内 25 个生物多样性热点地区之一的西南喀斯特地区,其植被定量遥感研究以往主要集中在群落和生态系统尺度上的植被覆盖度、植被分类以及植被生态系统服务功能与价值,而在群落和生态系统尺度的生物多样性和碳循环定量遥感研究、个体和种群尺度的植被叶片生化组分含量和自然植被物种精准识别定量方面的研究

相对较少,这是西南喀斯特地区植被定量遥感研究急需解决的主要科学问题。

(2)目前西南喀斯特地区植被定量遥感监测常用的数据源是被动成像的光学遥感数据,此外还有少量主动成像的 SAR 数据以及波段较多的高光谱影像数据。虽然涉及地物光谱仪、无人机以及航空航天等传感器平台,但获取的影像数据相对单一,多以 Landsat 和 MODIS 的光学影像数据为主。受复杂地质背景和多云雾天气影响,高质量的光学影像数据难以获取。激光雷达是一种新生的主动成像遥感技术,能够提高地表生物物理参数的测量精度,并提供高分辨率的三维成像数据,被证明可以在复杂生态系统中精确估算叶面积和地表生物量<sup>[161]</sup>。但基于激光雷达主动成像数据及其技术未见应用在以往的西南喀斯特地区植被定量遥感研究工作中。基于激光雷达影像数据可以提取地表植被树高、冠幅、林冠结构等三维信息,其点云数据可以直接用来完成树种识别和提高地表生物量遥感估算精度,对复杂地质背景的喀斯特地区植被定量遥感研究有重要意义。

(3)喀斯特地区植被定量遥感研究已从传统的地面调查发展到无人机、航天航空遥感技术,从简单的植被指数、像元二分模型到深度学习乃至遥感计算云平台应用。但自动、高效、完全定量获取地表植被有效信息的方法仍处于探索阶段。融合多源影像尤其是激光雷达影像与非影像数据,充分利用并挖掘各种数据优点,采用先进的深度学习方法与遥感计算云平台,特别是我国自主遥感计算云平台 Pixel Information Expert Engine (PIE-Engine),定量揭示喀斯特地区植被格局、过程与功能变化机制,并加强合作,通过全球喀斯特地区植被定量遥感监测网络,实现快速、精准、高效的喀斯特地区地表植被有效信息的提取与分类,推动喀斯特地区植被定量遥感研究的深度和广度,对高景观异质性西南喀斯特地区脆弱生态系统植被恢复、石漠化治理及其乡村振兴具有重要的生态和社会意义。

#### 参考文献

- [1] 刘良云. 植被定量遥感原理与应用[M]. 北京:科学出版社,2014.
- [2] PEI J, WANG L, WANG X Y, et al. Time series of landsat imagery shows vegetation recovery in two fragile karst watersheds in southwest China from 1988 to 2016 [J]. Remote Sensing, 2019, 11 (17): 2044. DOI. 10.



- 3390/rs11172044.
- [3] 张雪梅, 王克林, 岳跃民, 等. 生态工程背景下西南喀斯特植被变化主导因素及其空间非平稳性[J]. 生态学报, 2017, 37(12): 4008-4018.
- [4] 裴杰, 牛铮, 王力, 等. 基于 Google Earth Engine 云平台的植被覆盖度变化长时间序列遥感监测[J]. 中国岩溶, 2018, 37(4): 608-616.
- [5] XIE Y C, SHA Z Y, YU M. Remote sensing imagery in vegetation mapping: A review [J]. *Journal of Plant Ecology*, 2008, 1(1): 9-23.
- [6] 岳跃民, 王克林, 张兵, 等. 喀斯特石漠化信息遥感提取的不确定性[J]. 地球科学进展, 2011, 26(3): 266-274.
- [7] HOUBORG R, FISHER J B, SKIDMORE A K. Advances in remote sensing of vegetation function and traits [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2015, 43: 1-6. DOI: 10. 1016/j. jag. 2015. 06. 001.
- [8] 牛建明, 呼和, 吕桂芬. 遥感和地理信息系统在植被生态学中的应用研究动态[J]. 内蒙古大学学报(自然科学版), 1998, 29(4): 569-573.
- [9] PETTORELLI N, LAURANCE W F, O'BRIEN T G, et al. Satellite remote sensing for applied ecologists: Opportunities and challenges [J]. *Journal of Applied Ecology*, 2014, 51(4): 839-848.
- [10] SUN Z Y, WANG X N, WANG Z H, et al. UAVs as remote sensing platforms in plant ecology: Review of applications and challenges [J]. *Journal of Plant Ecology*, 2021, 14(6): 1003-1023.
- [11] 梁顺林, 白瑞, 陈晓娜, 等. 2019年中国陆表定量遥感发展综述[J]. 遥感学报, 2020, 24(6): 618-671.
- [12] 吴门新, 王锦地, 谢东辉, 等. 植被定量遥感真实结构模型中面向对象的三维可视化数据模型[J]. 遥感学报, 2005, 9(4): 413-420.
- [13] 黄华国. 林业定量遥感研究进展和展望[J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(12): 1-14.
- [14] KERR J T, OSTROVSKY M. From space to species: Ecological applications for remote sensing [J]. *Trends in Ecology and Evolution*, 2003, 18(6): 299-305.
- [15] ZENG L L, WARDLOW B D, XIANG D X, et al. A review of vegetation phenological metrics extraction using time-series, multispectral satellite data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 237: 111511. DOI: 10. 1016/j. rese. 2019. 111511.
- [16] 王敏钰, 罗毅, 张正阳, 等. 植被物候参数遥感提取与验证方法研究进展[J]. 遥感学报, 2022, 26(3): 431-455.
- [17] 赵燕红, 侯鹏, 蒋金豹, 等. 植被生态遥感参数定量反演研究方法进展[J]. 遥感学报, 2021, 25(11): 2173-2197.
- [18] USTIN S L, GAMON J A. Remote sensing of plant functional types [J]. *New Phytologist*, 2010, 186(4): 795-816.
- [19] ZHAO X, ZHOU D J, FANG J Y. Satellite-based studies on large-scale vegetation changes in China [J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2012, 54(10): 713-728.
- [20] REDDY C S. Remote sensing of biodiversity: What to measure and monitor from space to species [J]. *Biodiversity and Conservation*, 2021, 30(10): 2617-2631.
- [21] 杨泽至, 舒清志. 遥感技术在森林树种多样性监测中的应用研究进展[J]. 世界林业研究, 2022, 35(4): 33-39.
- [22] 张艺伟, 郭焱培, 唐荣, 等. 高光谱遥感技术在植物多样性研究的应用[J/OL]. 遥感学报, (2021-07-11)[2022-02-20]. [http://www.jors.cn/jrs/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=202103050000002](http://www.jors.cn/jrs/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=202103050000002). DOI: 10. 11834/jrs. 20211120.
- [23] 郭庆华, 胡天宇, 姜媛茜, 等. 遥感在生物多样性研究中的应用进展[J]. 生物多样性, 2018, 26(8): 789-806.
- [24] 王书贤, 张加龙, 廖易. 基于 Landsat 时间序列数据的森林地上生物量估测研究进展[J]. 世界林业研究, 2021, 34(6): 20-26.
- [25] 邹文涛, 陈绍志, 赵荣. 森林生态系统碳储量及碳通量遥感监测研究进展[J]. 世界林业研究, 2017, 30(5): 1-7.
- [26] 刘良云, 宋博文. 陆地生态系统固碳速率立体监测方法: 进展与挑战[J]. 大气科学学报, 2022, 45(3): 321-331.
- [27] 章钊颖, 王松寒, 邱博, 等. 日光诱导叶绿素荧光遥感反演及碳循环应用进展[J]. 遥感学报, 2019, 23(1): 37-52.
- [28] 戴小华, 余世孝. 遥感技术支持下的植被生产力与生物量研究进展[J]. 生态学杂志, 2004, 23(4): 92-98.
- [29] 何兴元, 任春颖, 陈琳, 等. 森林生态系统遥感监测技术研究进展[J]. 地理科学, 2018, 38(7): 997-1011.
- [30] 黄佩, 普军伟, 赵巧巧, 等. 植被遥感信息提取方法研究进展及发展趋势[J]. 自然资源遥感, 2022, 34(2): 10-19.
- [31] GUO Q H, JIN S C, LI M, et al. Application of deep learning in ecological resource research: Theories, methods, and challenges [J]. *Science China: Earth Sciences*, 2020, 63(10): 1457-1474.
- [32] KATTENBORN T, LEITLOFF J, SCHIEFER F, et al. Review on convolutional neural networks (CNN) in vegetation remote sensing [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2021, 173: 24-49.
- [33] 梁顺林, 程洁, 贾坤, 等. 陆表定量遥感反演方法的发展

- 新动态[J]. 遥感学报, 2016, 20(5): 875-898.
- [34] 刘长成, 王斌, 郭柯, 等. 中国喀斯特植被分类系统[J]. 广西植物, 2021, 41(10): 1618-1631.
- [35] 郭柯, 刘长成, 董鸣. 我国西南喀斯特植物生态适应性及石漠化治理[J]. 植物生态学报, 2011, 35(10): 991-999.
- [36] ZHANG C H, QI X K, WANG K L, et al. The application of geospatial techniques in monitoring karst vegetation recovery in southwest China: A review [J]. Progress in Physical Geography, 2017, 41(4): 450-477.
- [37] 许璟, 安裕伦, 胡锋, 等. 基于植被覆盖与生产力视角的亚喀斯特区域生态环境特征研究——以黔中部分地区为例[J]. 地理研究, 2015, 34(4): 644-654.
- [38] ZHAO S, WU X Q, ZHOU J X, et al. Spatiotemporal tradeoffs and synergies in vegetation vitality and poverty transition in rocky desertification area [J]. Science of the Total Environment, 2021, 752: 141770. DOI: 10.1016/j.scitotenv. 2020. 141770.
- [39] 马明国, 汤旭光, 韩旭军, 等. 西南岩溶地区碳循环观测与模拟研究进展和展望[J]. 地理科学进展, 2019, 38(8): 1196-1205.
- [40] 尹林江, 周忠发, 李韶慧, 等. 基于无人机可见光影像对喀斯特地区植被信息提取与覆盖度研究[J]. 草地学报, 2020, 28(6): 1664-1672.
- [41] ZHAO S, PEREIRA P, WU X Q, et al. Global karst vegetation regime and its response to climate change and human activities [J]. Ecological Indicators, 2020, 113: 106208. DOI: 10.1016/j.ecolind. 2020. 106208.
- [42] 杨苏新, 张霞, 帅通, 等. 基于混合像元分解的喀斯特石漠化地物丰度估测[J]. 遥感技术与应用, 2014, 29(5): 823-832.
- [43] 黄登红, 周忠发, 吴跃, 等. 基于无人机可见光影像的高原丘陵盆地地区山药植株识别[J]. 热带地理, 2019, 39(4): 571-582.
- [44] 郎芹, 马明国, 闻建光, 等. 基于天宫二号数据的西南石漠化地区植被分类[J]. 载人航天, 2019, 25(6): 799-808.
- [45] 夏林, 安裕伦, 赵海兵, 等. 一种提高喀斯特地区植被分类精度的方法[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2018, 36(3): 8-13, 51.
- [46] 王俊丽, 张忠华, 胡刚, 等. 基于文献计量分析的喀斯特植被生态学研究态势[J]. 生态学报, 2020, 40(3): 1113-1124.
- [47] HE W, LI Y, WANG J, et al. Using field spectroradiometer to estimate the leaf N/P ratio of mixed forest in a karst area of southern China: A combined model to overcome overfitting [J]. Remote Sensing, 2021, 13: 3368. DOI: 10.3390/rs13173368.
- [48] 何文, 余玲, 姚月锋. 基于光谱指数的喀斯特植物叶片叶绿素含量定量估算[J]. 广西植物, 2022, 42(6): 914-926.
- [49] 刘波, 童庆禧, 张立福, 等. 水分散失过程中植物叶片光谱响应高分辨率时空变化研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(6): 1460-1465.
- [50] YUE Y M, WANG K L, ZHANG B, et al. Exploring the relationship between vegetation spectra and eco-geo-environmental conditions in karst region, Southwest China [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2010, 160(1/4): 157-168.
- [51] GEEKIYANAGE N, GOODALE U M, CAO K F, et al. Leaf trait variations associated with habitat affinity of tropical karst tree species [J]. Ecology and Evolution, 2018, 8(1): 286-295.
- [52] CHEN X J, WU X, YUAN Z Q, et al. Spectral characteristics and species identification of rhododendrons using a discriminative restricted Boltzmann machine [J]. Spectroscopy Letters, 2017, 50(2): 65-72.
- [53] 周玉科, 岳跃民, 何洪林, 等. 2016年环江喀斯特生态无人机遥感植被指数数据集[J]. 中国科学数据, 2017, 2(1): 59-66.
- [54] 张志慧, 刘雯, 李笑含, 等. 基于无人机航摄影像的喀斯特地区裸岩信息提取及景观格局分析[J]. 地球信息科学, 2020, 22(12): 2436-2444.
- [55] 朱孟, 周忠发, 赵馨, 等. 基于无人机遥感的喀斯特高原峡谷区火龙果单株识别提取方法[J]. 热带地理, 2019, 39(4): 502-511.
- [56] HUANG D H, ZHOU Z F, ZHANG Z Z, et al. Recognition and counting of pitaya trees in karst mountain environment based on unmanned aerial vehicle RGB images [J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2021, 15(4): 042402. DOI: 10.1117/1.JRS.15.042402.
- [57] ZHU M, ZHOU Z F, HUANG D H, et al. Extraction method for single *Zanthoxylum bungeanum* in karst mountain area based on unmanned aerial vehicle visible-light images [J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2021, 15(2): 026501. DOI: 10.1117/1.JRS.15.026501.
- [58] 周忠发, 李波, 贾龙浩. 合成孔径雷达技术在喀斯特山区烟草种植定量监测应用探讨[J]. 测绘通报, 2012(S1): 246-248.
- [59] 贾龙浩, 周忠发, 李波. 高分辨率 SAR 在喀斯特山地烟草生长建模中的应用探讨[J]. 中国烟草科学, 2013, 34(5): 104-107, 112.
- [60] 王昆, 周忠发, 廖娟, 等. 基于合成孔径雷达(SAR)数据

- 的贵州喀斯特山区烟草叶面积指数估算模型[J]. 中国烟草学报, 2014, 21(6): 34-39.
- [61] WANG K, ZHOU Z F, LIAO J, et al. The application of high resolution SAR in mountain area of karst tobacco leaf area index estimation model [J]. Journal of Coastal Research, 2015, 73(sp1): 415-419.
- [62] MARUSIG D, PETRUZZELLIS F, TOMASELLA M, et al. Correlation of field-measured and remotely sensed plant water status as a tool to monitor the risk of drought-induced forest decline [J]. Forests, 2020, 11(1): 77. DOI: 10.3390/f11010077.
- [63] HANSEN M C, STEHMAN S V, POTAPOV P V. Quantification of global gross forest cover loss [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS), 2010, 107(19): 8650-8655.
- [64] 刘波, 岳跃民, 李儒, 等. 喀斯特典型地物混合光谱与复合覆盖度关系研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(9): 2470-2474.
- [65] YUE Y M, ZHANG B, WANG K L, et al. Spectral indices for estimating ecological indicators of karst rocky desertification [J]. International Journal of Remote Sensing, 2010, 31(8): 2115-2122.
- [66] 黄秋燕, 于刚, 丁琳. 都安县植被覆盖度动态变化的遥感反演及驱动力分析[J]. 南方国土资源, 2008(9): 34-37.
- [67] 周欣, 吴虹, 党宇宁. 基于 EOS-MODIS 的广西全境石漠化信息提取方法研究[J]. 化工矿产地质, 2008, 30(4): 219-222, 233.
- [68] 张盼盼, 胡远满, 肖笃宁, 等. 一种基于多光谱遥感影像的喀斯特地区裸岩率的计算方法初探[J]. 遥感技术与应用, 2010, 25(4): 510-514.
- [69] 靖娟利, 王永峰. 漓江流域近 15 年遥感植被覆盖度  $f_{veg}$  变化特征[J]. 桂林理工大学学报, 2014, 34(2): 260-265.
- [70] 杨世凡, 安裕伦. 生态恢复背景下喀斯特地区植被覆盖的时空变化——以黔中地区为例[J]. 地球与环境, 2014, 42(3): 404-412.
- [71] 谢颖颖, 李荣. 基于像元二分模型的喀斯特山区植被覆盖度监测及变化分析——以毕节试验区为例[J]. 河南科技, 2015, 573(10): 151-152.
- [72] 陈三明, 林刚, 罗文敏, 等. 桂林海洋岩溶区植被覆盖度的多时相遥感预估模型[J]. 桂林理工大学学报, 2015, 35(2): 324-329.
- [73] 朱林富, 谢世友, 杨华, 等. 基于 MODIS-EVI 的重庆植被覆盖时空分异特征研究[J]. 生态学报, 2018, 38(19): 6992-7002.
- [74] 程东亚, 李旭东. 喀斯特地区植被覆盖度变化及地形与人口效应研究[J]. 地球信息科学学报, 2019, 21(8): 1227-1239.
- [75] 王明明, 王世杰, 白晓永, 等. 典型小流域喀斯特石漠化演变特征及其关键表征因子与驱动因素[J]. 生态学报, 2019, 39(16): 6083-6097.
- [76] 谢相建, 薛朝辉, 王冬辰, 等. 顾及物候特征的喀斯特断陷盆地土地覆盖遥感分类[J]. 遥感学报, 2015, 19(4): 627-638.
- [77] 王修信, 朱启疆, 梁宗经, 等. 喀斯特城市植被覆盖度时空变化对地表温度的影响[J]. 地理与地理信息科学, 2011, 27(4): 107-110.
- [78] 王恺宁, 王修信. 喀斯特城市桂林地表温度时空变化及地物覆盖影响分析[J]. 重庆师范大学学报, 2018, 35(4): 117-124.
- [79] 蔡宏, 何郑伟, 安艳玲, 等. 基于 RS 和 GIS 的赤水河流域植被覆盖度与各地形因子的相关强度研究[J]. 地球与环境, 2014, 42(4): 518-524.
- [80] 朱林富, 杨华. 基于 MODIS 数据的重庆 NDVI 时空分异研究[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2015, 32(2): 38-43.
- [81] 黎良财, 陆灯盛, 张晓丽, 等. 基于时序遥感的喀斯特山区植被覆盖度研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2017, 37(7): 11-17.
- [82] 刘梁美子, 占车生, 胡实, 等. 黔桂喀斯特山区植被变化及其地形效应[J]. 地理研究, 2018, 37(12): 2433-2446.
- [83] 王毅, 郭跃. 喀斯特地貌区植被覆盖与地形因子的空间关系分析——以贵州普定县为例[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(1): 157-167.
- [84] 朱殊慧, 梅再美, 张琦. 喀斯特山地植被变化的地形分异特征——以贵州安龙县为例[J]. 黔南民族师范学院学报, 2018, 38(4): 70-74.
- [85] 于竹筱, 张红旗, 许尔琪. 黔桂喀斯特山地 NDVI 的垂直分布特征[J]. 中国岩溶, 2018, 37(3): 361-370.
- [86] TONG X W, WANG K L, BRANDT M, et al. Assessing future vegetation trends and restoration prospects in the karst regions of southwest China [J]. Remote Sensing, 2016, 8(5): 357. DOI: 10.3390/rs8050357.
- [87] ZHOU Q W, WEI X C, ZHOU X, et al. Vegetation coverage change and its response to topography in a typical karst regions: The Lianjiang River Basin in Southwest China [J]. Environmental Earth Sciences, 2019, 78(6): 191. DOI: 10.1007/s12665-019-8218-z.
- [88] 倪雪波, 刘荣高, 王世杰. 石漠化地区植被对干旱敏感性的遥感观测[J]. 地球与环境, 2009, 37(3): 221-226.
- [89] 李昊, 蔡运龙, 陈睿山, 等. 基于植被遥感的西南喀斯特退耕还林工程效果评价[J]. 生态学报, 2011, 31(12):

- 3255-3264.
- [90] 陈燕丽,罗永明,莫伟华,等. MODIS NDVI 与 MODIS EVI 对气候因子响应差异[J]. 自然资源学报, 2014, 29(10):1802-1812.
- [91] 李坤龙,郭跃. 2000 - 2014 年贵州省安顺市 NDVI 变化及其与气温、降水的关系[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2018, 35(5):120-126.
- [92] 张凯选,范鹏鹏,王军邦,等. 西南喀斯特地区植被变化及其与气候因子关系研究[J]. 生态环境学报, 2019, 28(6):1080-1091.
- [93] 叶骏菲,陈燕丽,莫伟华,等. 典型喀斯特区植被变化及其与气象因子的关系——以广西百色市为例[J]. 沙漠与绿洲气象, 2019, 13(5):106-113.
- [94] WEI X C, ZHOU Q W, CAI M Y, et al. Effects of vegetation restoration on regional soil moisture content in the humid karst areas - A case study of Southwest China [J]. *Water*, 2021, 13 (3): 321. DOI: 10. 3390/w13030321.
- [95] 童晓伟,王克林,岳跃民,等. 桂西北喀斯特区域植被变化趋势及其对气候和地形的响应[J]. 生态学报, 2014, 34(12):3425-3434.
- [96] ZHOU Q W, LUO Y, ZHOU X, et al. Response of vegetation to water balance conditions at different time scales across the karst area of southwestern China - A remote sensing approach [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 645:460-470.
- [97] 匡昭敏,朱伟军,黄永璘,等. 广西喀斯特干旱农业区干旱遥感监测模型研究[J]. 自然灾害学报, 2009, 18(1): 112-117.
- [98] 康为民,罗宇翔,向红琼,等. 贵州喀斯特山区的 NDVI-Ts 特征及其干旱监测应用研究[J]. 气象, 2010, 36(10):78-83.
- [99] 李素敏,袁利伟,甘淑,等. 基于 ETM+ 的滇东南石漠化区域植被指数与叶面积指数反演关系研究[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 2015, 40(6):31-36.
- [100] 刘维,赖格英,彭小娟,等. 基于植被岩溶比重指数的岩溶流域岩溶信息提取——以江西省长河流域为例[J]. 江西科学, 2016, 34(2):194-199, 222.
- [101] 陈燕丽,莫建飞,莫伟华,等. 近 30 年广西喀斯特地区石漠化时空演变[J]. 广西科学, 2018, 25(5):625-631.
- [102] 叶杰,张斌,许军强,等. 遥感植被指数增强石漠化信息研究[J]. 地理空间信息, 2021, 19(9):14-18.
- [103] 杨昌红,马士彬,高南,等. 基于 NDVI 喀斯特石漠化治理效果评价[J]. 安徽农学通报, 2022, 28(3):144-150.
- [104] 杨奇勇,蒋忠诚,马祖陆,等. 岩溶区峰丛洼地植被指数的克里格分析[J]. 环境科学, 2012, 33(4):1404-1408.
- [105] 杨奇勇,蒋忠诚,罗为群,等. 岩溶区峰丛洼地山体阴影区域植被指数随机模拟[J]. 农业机械学报, 2013, 44(5):232-236, 225.
- [106] 段小芳. GIS 技术支持下岩溶植被指数的 Kriging 估计[J]. 农业工程, 2013, 3(6):68-71.
- [107] 吴跃,周忠发,赵馨,等. 基于遥感计算云平台高原山区植被覆盖时空演变研究——以贵州省为例[J]. 中国岩溶, 2020, 39(2):196-205.
- [108] ZHANG J, LIU M, LIU X, et al. Spectral analysis of seasonal rock and vegetation changes for detecting karst rocky desertification in southwest China [J]. *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation*, 2021, 100: 102337. DOI: 10. 1016/j. jag. 2021. 102337.
- [109] 熊鹰,岳跃民. 基于光谱相似性的高度异质性喀斯特区域植被盖度提取[J]. 测绘通报, 2013(11):5-9, 48.
- [110] QU L Q, HAN W G, LIN H, et al. Estimating vegetation fraction using hyperspectral pixel unmixing method; A case study of a karst area in China [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2014, 7(11):4559-4565.
- [111] YUE Y M, WANG K L, ZHANG B, et al. Remote sensing of fractional cover of vegetation and exposed bedrock for karst rocky desertification assessment [J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2012, 13: 847-853.
- [112] 熊鹰,岳跃民,王克林. 基于 Hyperion 和 ASTER 影像的喀斯特石漠化评价指标提取对比研究[J]. 水土保持通报, 2013, 33(3):186-190.
- [113] ZHANG X L, GAN S, LI Y, et al. Remote sensing integration survey of typical land types and analysis of its spectral properties in southeast of Yunnan Province [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014(444/445):1239-1243.
- [114] 龙晓闽,周忠发,张会,等. 基于 NDVI 像元二分模型植被覆盖度反演喀斯特石漠化研究——以贵州毕节鸭池示范区为例[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(8): 4184-4186.
- [115] 万军,蔡运龙. 应用线性光谱分离技术研究喀斯特地区土地覆被变化——以贵州省关岭县为例[J]. 地理研究, 2003, 22(4):439-446.
- [116] 李岩,安裕伦,李晓宇,等. 基于实测光谱对喀斯特地区土地覆盖类型丰度提取[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2015, 33(4):9-13.
- [117] 杨胜天,朱启疆. 贵州典型喀斯特环境退化与自然恢

- 复速率[J]. 地理学报, 2000, 55(4): 459-466.
- [118] QI X K, WANG K L, ZHANG C H. Effectiveness of ecological restoration projects in a karst region of southwest China assessed using vegetation succession mapping [J]. *Ecological Engineering*, 2013, 54: 245-253.
- [119] 徐艳芳, 王克林, 祁向坤, 等. 基于 TM 影像的白云岩和石灰岩上喀斯特植被时空变化差异研究[J]. 生态学报, 2016, 36(1): 180-189.
- [120] 郑惠茹, 罗红霞, 向海燕, 等. 基于面向对象的石漠化山区植被信息提取及分布特征研究[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(3): 648-657.
- [121] 郑惠茹, 罗红霞, 邹扬庆, 等. 基于地学信息图谱的重庆岩溶石漠化植被恢复演替研究[J]. 生态学报, 2016, 36(19): 6295-6307.
- [122] WANG L Y, CHEN Q, ZHOU Z F, et al. Crops planting structure and karst rocky desertification analysis by Sentinel-1 data [J]. *Open Geosciences*, 2021, 13: 867-879.
- [123] 廖娟, 周忠发, 王昆, 等. 基于 SAR 提高喀斯特地区 LUCC 光谱分类精度研究[J]. 中国农业资源与区划, 2016, 37(1): 50-56, 79.
- [124] 王修信, 杨路路, 汤谷云, 等. 利用卷积神经网络提取高分辨率遥感图像喀斯特森林信息[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(17): 6773-6777.
- [125] 史莎娜, 汤传勇, 谢炳庚, 等. 喀斯特山地草地资源遥感调查及常态化监测研究——以灌阳县为例[J]. 草业学报, 2018, 27(1): 14-21.
- [126] YUE Y M, WANG K L, LIU B, et al. Development of new remote sensing methods for mapping green vegetation and exposed bedrock fractions within heterogeneous landscapes [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2013, 34(14): 5136-5153.
- [127] 孙明, 钟仕全, 莫建飞, 等. 基于高分卫星遥感数据的广西中小流域地表植被特征分析[J]. 气象研究与应用, 2017, 38(1): 79-81, 86.
- [128] 凌成星, 林辉, 薛晓坡, 等. 基于植被指数特征和空间分析的石漠化信息提取[J]. 水土保持研究, 2009, 16(1): 167-171.
- [129] 耿仁方, 付波霖, 金双根, 等. 面向对象的无人机遥感影像岩溶湿地植被遥感识别[J]. 测绘通报, 2020(11): 13-18.
- [130] FU B L, LIU M, HE H C, et al. Comparison of optimized object-based RF-DT algorithm and SegNet algorithm for classifying karst wetland vegetation communities using ultra-high spatial resolution UAV data [J]. *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation*, 2021, 104: 102553. DOI: 10.1016/j.jag/2021.102553.
- [131] 杨尽利, 周忠发, 赵正隆, 等. 基于 ALOS 影像的喀斯特山区草地类型提取研究[J]. 中国农业资源与区划, 2013, 34(6): 81-85, 92.
- [132] 张文, 王志伟, 吴红芝, 等. 利用无人机提取样本点的多源遥感影像分类方法研究[J]. 草地与草坪, 2021, 41(5): 22-30.
- [133] YAN Y, QIN J H, LI C X, et al. Plant diversity of typical karst region based on remote sensing and ground data [J]. *Journal of Environmental Protection and Ecology*, 2021, 22(6): 2345-2352.
- [134] COX P M, BETTS R A, JONES C D, et al. Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model [J]. *Nature*, 2000, 408(6809): 184-187.
- [135] XIAO J F, CHEVALLIER F, GOMEZ C, et al. Remote sensing of the terrestrial carbon cycle: A review of advances over 50 years [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 233: 111383. DOI: 10.1016/j.rse.2019.111383.
- [136] 张明阳, 王克林, 刘会玉, 等. 基于遥感影像的桂西北喀斯特区植被碳储量及密度时空分异[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(12): 1545-1553.
- [137] 张明阳, 王克林, 刘会玉, 等. 生态恢复对桂西北典型喀斯特区植被碳储量的影响[J]. 生态学杂志, 2014, 33(9): 2288-2295.
- [138] ZHANG M Y, WANG K L, LIU H Y, et al. How ecological restoration alters ecosystem services: An analysis of vegetation carbon sequestration in the karst area of northwest Guangxi, China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 74(6): 5307-5317.
- [139] ZHANG M Y, WANG K L, LIU H Y, et al. Spatiotemporal variation and impact factors for vegetation carbon sequestration and oxygen production based on rocky desertification control in the karst region of southwest China [J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(2): 102. DOI: 10.3390/rs8020102.
- [140] NOUMONVI K D, FERLAN M, ELER K, et al. Estimation of carbon fluxes from eddy covariance data and satellite-derived vegetation indices in a karst grassland (Podgorski Kras, Slovenia) [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(6): 649. DOI: 10.3390/rs11060649.
- [141] 王冰, 杨胜天, 王玉娟. 贵州省喀斯特地区植被净第一性生产力的估算[J]. 中国岩溶, 2007, 26(2): 98-104.
- [142] 周爱萍, 向悟生, 姚月锋, 等. 广西植被净初级生产力 (NPP) 时空演变及主要影响因素分析[J]. 广西植物,

- 2014,34(5):622-628.
- [143] 刘鸿雁,蒋子涵,戴景钰,等.岩石裂隙决定喀斯特关键带地表木本与草本植物覆盖[J].中国科学:地球科学,2019,49(12):1974-1981.
- [144] ZHOU Y,ZHANG R,WANG S X,et al. Comparative analysis on responses of vegetation productivity relative to different drought monitor patterns in karst regions of southwestern China [J]. *Applied Ecology and Environmental Research*,2019,17(1):85-105.
- [145] WANG B,YANG S T,LV C W,et al. Comparison of net primary productivity in karst and non-karst areas: A case study in Guizhou Province,China [J]. *Environmental Earth Sciences*,2010,59(6):1337-1347.
- [146] QI X K,LI Q,YUE Y M,et al. Rural-urban migration and conservation drive the ecosystem services improvement in China karst: A case study of Huanjiang County,Guangxi [J]. *Remote Sensing*,2021,13(4):566. DOI:10.3390/rs13040566.
- [147] 王玉娟,杨胜天,吕涛,等.喀斯特地区植被净第一性生产力遥感动态监测及评价——以贵州省中部地区为例[J].资源科学,2008,30(9):1421-1430.
- [148] 董丹,倪健.利用 CASA 模型模拟西南喀斯特植被净第一性生产力[J].生态学报,2011,31(7):1855-1866.
- [149] ZHANG R,ZHOU Y,LUO H X,et al. Estimation and analysis of spatiotemporal dynamics of the net primary productivity integrating efficiency model with process model in karst area [J]. *Remote Sensing*,2017,9(5):477. DOI:10.3390/rs9050477.
- [150] 吕妍,张黎,闫慧敏,等.中国西南喀斯特地区植被变化时空特征及其成因[J].生态学报,2018,38(24):8774-8786.
- [151] 唐荣彬,付梅臣,王力,等.喀斯特岩溶、非岩溶区植被总初级生产力与土壤呼吸的空间差异及其环境因子分析[J].地球与环境,2020,48(3):307-317.
- [152] QIAN C H,QIANG H Q,WANG F,et al. Estimation of forest aboveground biomass in karst areas using multi-source remote sensing data and the K-DBN algorithm [J]. *Remote Sensing*,2021,13(24):5030. DOI:10.3390/rs13245030.
- [153] LIAO C J,YUE Y M,WANG K L,et al. Ecological restoration enhances ecosystem health in the karst regions of southwest China [J]. *Ecological Indicators*,2018,90:416-425.
- [154] 孙桂凯,王国帅,魏义熊,等.基于改进遥感生态指数的岩溶山区生态质量评价——以澄碧河流域为例[J].水土保持通报,2021,41(2):230-239.
- [155] 王志杰,代磊.黔中喀斯特山地城市土地利用/覆被变化及其生态效应评价——以贵阳市花溪区为例[J].生态学报,2021,41(9):3429-3440.
- [156] HUANG Z,LIU X N,YANG Q,et al. Quantifying the spatiotemporal characteristics of multi-dimensional karst ecosystem stability with Landsat time series in southwest China [J]. *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation*,2021,104:102575. DOI:10.1016/j.jag.2021.102575.
- [157] JIANG H,SONG L S,LI Y,et al. Monitoring the reduced resilience of forests in Southwest China using long-term remote sensing data [J]. *Remote Sensing*,2022,14(1):32. DOI:10.3390/rs14010032.
- [158] 张明阳,王克林,陈洪松,等.喀斯特生态系统服务功能遥感定量评估与分析[J].生态学报,2009,29(11):5891-5901.
- [159] ZHANG M Y,ZHANG C H,WANG K L,et al. Spatiotemporal variation of karst ecosystem service values and its correlation with environmental factors in northwest Guangxi, China [J]. *Environmental Management*,2011,48(5):933-944.
- [160] CHEN W,ZHANG X P,HUANG Y S. Spatial and temporal changes in ecosystem service values in karst areas in southwestern China based on land use change [J]. *Environmental Science and Pollution Research*,2021,28(33):45724-45738.
- [161] LEFSKY M A,COHEN W B,PARKER G G,et al. Lidar remote sensing for ecosystem studies [J]. *BioScience*,2002,51(1):19-30.

## Research Progress in Quantitative Remote Sensing of Vegetation in Southwest Karst Area

YAO Yuefeng<sup>\*\*</sup>, HE Wen

(Guangxi Key Laboratory of Plant Conservation and Restoration Ecology in Karst Terrain, Guangxi Institute of Botany, Guangxi Zhuang Autonomous Region and Chinese Academy of Sciences, Guilin, Guangxi, 541006, China)

**Abstract:** Vegetation in karst areas has higher spatial and temporal differences than non-karst areas, and plays an extremely important role in maintaining the stability and sustainable development of fragile ecosystems. The karst area of Southwest China is a global biodiversity hotspot, which has various vegetation types and significant phenomenon of the same object with different spectrum/different object with the same spectrum. In order to carry out quantitative remote sensing research on vegetation in karst areas more accurately and efficiently, from individual scale to ecosystem scale, the research progress of quantitative remote sensing of vegetation in karst area of Southwest China was reviewed from the aspects of data source selection and method application, and the research directions that needed to be focused on in the next step were discussed. Quantitative remote sensing research on vegetation in karst area of Southwest China mainly focuses on vegetation coverage, vegetation classification, ecosystem service function and value at community and ecosystem scale. The application of remote sensing image data is relatively single, mainly low-resolution optical images in passive imaging (such as Landsat and MODIS). At the individual and population scales, although hyperspectral remote sensing technology and UAV remote sensing, this technology is mainly applied to the study of individual and population of small-scale near-ground plants, and it was difficult to expand to the regional scale. It is urgent to carry out research on the application and advanced analysis methods of multi-source image fusion, especially Light Detection and Ranging (LiDAR) and non-image data, as well as quantitative estimation of vegetation biochemical parameters and accurate identification of natural vegetation species at individual and population scales in karst areas, and quantitative remote sensing research on biodiversity and carbon cycle at community and ecosystem scales. It is expected to provide reference for quantitative study on vegetation pattern, process and ecosystem service function, vegetation restoration of fragile ecosystem and decision-making of rocky desertification control in karst area.

**Key words:** vegetation condition; scale; multi-source data; quantitative remote sensing; karst landform; Southwest China

责任编辑: 陆 雁



微信公众号投稿更便捷

联系电话: 0771-2503923

邮箱: gxxk@gxas.cn

投稿系统网址: <http://gxxk.ijournal.cn/gxxk/ch>