

卫星遥感量化生态价值评估关键参数实践

马洪坤 闫博

哈尔滨航天恒星数据系统科技有限公司

DOI:10.32629/eep.v8i9.2841

[摘要] 生态价值量化评估是生态环境保护、自然资源管控及绿色发展决策的核心支撑,而关键参数的精准获取是提升评估科学性的前提。传统评估依赖地面实测获取参数,存在观测范围有限、时空连续性差、耗时耗力等瓶颈,难以适配大尺度、动态化的生态评估需求。卫星遥感技术凭借大范围覆盖、高频次观测、多维度感知的优势,为生态价值关键参数提取提供了全新技术路径。本文系统梳理卫星遥感在生态价值评估中的应用机理,聚焦净初级生产力(NPP)、植被覆盖度(FVC)、土地利用类型(LUT)、水资源量(WR)及生物量(BM)等核心参数,深入研究各参数的遥感反演模型优化及验证方法,结合黄土高原某典型生态修复区实例开展参数提取与评估实践。结果表明:优化后的遥感反演模型使NPP、FVC、生物量的反演精度分别达92.3%、94.1%、90.7%,基于遥感参数的生态价值评估结果与地面核查值偏差小于8%;相较于传统方法,参数获取效率提升80%以上,且实现了评估的时空动态可视化。研究成果为大尺度生态价值精准量化评估提供了可靠的技术与实践参考,助力生态环境治理的科学化与精细化。

[关键词] 卫星遥感; 生态价值评估; 关键参数; 遥感反演; 模型优化; 实证分析

中图分类号: P185.18 文献标识码: A

Practical Application of Key Parameters for Satellite Remote Sensing-Based Quantitative Ecological Value Assessment

Hongkun Ma Bo Yan

Harbin Aerospace Hengxing Data System Technology Co., Ltd.

[Abstract] Quantitative ecological value assessment serves as a core pillar for environmental conservation, natural resource management, and green development decision-making. The precise acquisition of key parameters is fundamental to enhancing the scientific rigour of such assessments. Traditional assessments rely on ground-based measurements for parameter acquisition, facing bottlenecks such as limited observation scope, poor spatio-temporal continuity, and significant time and labour expenditure, rendering them ill-suited for large-scale, dynamic ecological assessment requirements. Satellite remote sensing technology, with its advantages of extensive coverage, high-frequency observation, and multidimensional perception, offers a novel technical pathway for extracting key ecological value parameters. This paper systematically examines the application mechanisms of satellite remote sensing in ecological value assessment, focusing on core parameters including net primary productivity (NPP), vegetation cover (FVC), land use type (LUT), water resources (WR), and biomass (BM). It delves into optimisation and validation methods for remote sensing inversion models of these parameters, complemented by practical parameter extraction and assessment conducted in a typical ecological restoration area on the Loess Plateau. Results indicate that the optimised remote sensing inversion models achieve inversion accuracies of 92.3%, 94.1%, and 90.7% for NPP, FVC, and biomass respectively. Ecological value assessments based on these remote sensing parameters exhibit deviations of less than 8% from ground-truth values. Compared to traditional methods, parameter acquisition efficiency improves by over 80%, while enabling spatiotemporal dynamic visualisation of assessments. These findings provide reliable technical and practical references for large-scale, precise quantification of ecological value, advancing the scientific and refined management of ecological environments.

[Key words] satellite remote sensing; ecological value assessment; key parameters; remote sensing inversion; model optimisation; empirical analysis

引言

在“双碳”目标与生态文明建设战略引领下,生态价值量化评估已成为衡量区域可持续发展水平、制定生态补偿政策的核心依据。生态价值评估的核心在于构建“生态过程-服务功能-价值量化”的技术链条,而净初级生产力、植被覆盖度、土地利用类型等关键参数作为连接生态过程与服务功能的桥梁,其精度直接决定评估结果的可靠性^[1]。传统评估中,关键参数主要通过地面样地实测、实地调查等方式获取,该模式虽能获得单点高精度数据,但在区域尺度评估中面临观测成本高、空间代表性不足、数据更新滞后等突出问题。例如,在黄土高原生态修复成效评估中,传统地面实测需布设千余个样地,耗时6-8个月,且难以反映植被生长的季节动态变化。

卫星遥感技术的快速发展为突破传统瓶颈提供了有效手段。从Landsat系列的中分辨率观测到Sentinel系列的高时空分辨率监测,再到高分专项卫星的精准感知,遥感技术已实现从可见光到微波的多波段覆盖,能够快速获取地表生态系统的时空动态信息。当前,遥感技术在生态参数提取中的应用已取得一定进展,但仍存在三方面关键问题:一是复杂下垫面(如山地、水体-植被混合区)的参数反演精度偏低;二是不同遥感数据源的参数提取结果一致性不足;三是参数反演与生态价值评估模型的衔接机制不完善^[2]。为此,本文以关键参数的遥感精准提取为核心,优化反演模型并开展实证研究,旨在为大尺度生态价值评估提供技术支撑。

1 卫星遥感量化生态价值评估的核心机理

1.1 生态价值评估的参数体系框架

基于千年生态系统评估(MA)框架及我国《生态系统服务价值评估技术导则》,结合遥感可识别性原则,构建“核心参数-服务功能-价值类型”的三级参数体系^[3]。核心参数层包含5类关键指标:净初级生产力(NPP)反映生态系统物质生产能力,是供给服务价值评估的核心;植被覆盖度(FVC)直接关联水土保持、气候调节等调节服务功能;土地利用类型(LUT)决定生态系统的服务功能类型,是价值分类核算的基础;水资源量(WR)支撑水文调节服务评估;生物量(BM)是固碳服务与生物多样性服务评估的关键。该参数体系既覆盖生态系统核心结构与功能指标,又兼顾遥感反演的可行性^[4]。

1.2 遥感参数提取的技术逻辑

卫星遥感提取生态参数的核心逻辑是利用“地物光谱特征-生态参数关联”的映射关系,通过反演模型实现从遥感影像数据到生态参数的转化。具体而言,不同地物及生态过程呈现独特光谱响应特征:植被叶绿素在红光波段强吸收、近红外波段强反射,为植被覆盖度、NPP等参数反演提供依据;水体在近红外波段强吸收特性使其可与植被、裸土有效区分,支撑水资源量提取;不同土地利用类型的光谱曲线差异为类型识别奠定基础^[5]。例如,植被覆盖度提取基于植被与裸土的光谱混合模型,通过归一化植被指数(NDVI)混合像元分解实现;NPP则基于光能利用率模型,结合遥感反演的植被指数、地表温度等数据计算获得^[6]。

遥感参数提取的技术流程包括四步:一是数据源选择与预处理,根据评估尺度选择合适分辨率遥感数据,通过辐射定标、大气校正、几何校正消除误差;二是特征提取,计算NDVI、增强型植被指数(EVI)、地表温度(LST)等光谱特征参数;三是模型反演,基于光谱特征与生态参数的关联建立反演模型;四是精度验证,结合地面实测数据验证反演结果并修正模型^[7]。

2 关键参数的遥感反演模型优化

2.1 植被类参数反演优化(NPP、FVC)

植被覆盖度(FVC)传统反演采用线性混合模型(如像元二分模型),在植被-裸土-岩石混合复杂区域,反演精度仅75%-85%^[8]。本文提出“光谱分解+地形校正”优化模型:采用EVI指数替代NDVI指数减少大气与土壤背景影响,引入DEM数据进行地形校正消除光照差异干扰,通过非线性混合像元分解模型提升分解精度,优化模型表达式为: $FVC = (EVI - EVI_{oi}) / (EVI_{ve} - EVI_{oi}) \times \cos\theta$ (式中, EVI_{oi} 为裸土EVI值, EVI_{ve} 为植被全覆盖EVI值, θ 为地形坡度角)^[9]。

净初级生产力(NPP)采用改进的CASA模型,传统模型在降水稀少区水分胁迫因子计算偏差较大。本文引入遥感反演的植被供水指数(VSWI)替代传统降水插值数据,结合MODIS地表温度数据优化温度胁迫因子,提升模型在极端气候下的适应性^[10]。

2.2 土地利用与水资源参数提取优化

土地利用类型(LUT)提取采用“多特征融合+深度学习”模型。传统光谱特征分类法易混淆耕地与园地、建设用地与裸地,本文构建“光谱+纹理+时序”融合特征集:光谱特征包含NDVI、EVI等6类指数;纹理特征通过灰度共生矩阵提取对比度、熵等4类指标;时序特征利用Sentinel-2数据提取植被生长季曲线。将融合特征输入U-Net模型,引入注意力机制强化关键特征权重,提升分类精度^[11]。

水资源量(WR)提取针对不同水体类型优化方法:静态水体采用“NDWI阈值法+形态学滤波”区分水体与阴影;动态水体结合Sentinel-1微波数据消除云雨天气影响,实现全天候提取。水资源量通过水体面积、实测水深计算,公式为: $WR = S \times H \times \rho$ (其中,S为水体遥感提取面积,H为实测平均水深, ρ 为水体密度)^[12]。

2.3 生物量反演模型优化

生物量(BM)反演采用“遥感参数+机器学习”模型。传统回归模型难以刻画生物量与遥感参数的非线性关系,本文选用随机森林算法,构建以NDVI、EVI、植被高度(由ICESat-2数据获取)、冠层结构参数为输入变量的反演模型^[13]。为提升模型泛化能力,采用“分层建模”策略:根据土地利用类型将研究区划分为林地、草地、耕地三类子区域,分别构建反演模型,避免不同植被类型的生物量-光谱关系差异导致的误差^[14]。

3 实证研究:以黄土高原某生态修复区为例

3.1 研究区概况与数据准备

研究区位于黄土高原中部生态修复重点县(2860km²),属黄土丘陵沟壑区,作为“三北”防护林核心区,以人工林和天然草

地为主。数据来源包括:①遥感数据(2023年Sentinel-2、MODIS、ICESat-2);②120个样地的地面实测数据;③DEM、土壤图、气象数据等辅助资料;④2013-2023年生态修复监测数据^[15]。

3.2 参数提取与精度验证

采用“预处理-特征提取-模型反演-验证”流程,以 R^2 、RMSE、RE为评价指标。优化后的模型显著提升精度:FVC反演 R^2 达0.941(RMSE0.032),NPP反演 R^2 0.923(RE<7.5%),BM反演 R^2 0.907(RMSE8.6t/hm²),土地利用分类精度91.5%,水资源量偏差<6%。

3.3 生态价值评估应用

基于“单位面积价值当量法”,对比2013与2023年数据显示:2023年生态总价值52.3亿元(+38.6%),调节服务价值占比62.3%(水土保持+45.2%),修复区价值密度是非修复区1.8倍^[16]。遥感评估与地面实测偏差7.8%,评估周期从150天缩短至15天,效率提升90%。

4 结论与展望

4.1 研究结论

本研究构建三级参数体系,优化反演模型在复杂地形区实现FVC、NPP、BM反演 $R^2 > 0.9$,土地利用分类精度91.5%。黄土高原实证表明,遥感评估偏差<8%,效率提升超80%,实现时空动态精准评估。

4.2 展望

未来可从三方面深化研究:一是融合高分七号、WorldView-4等高分辨率遥感数据,提升微小尺度区域的参数反演精度;二是引入Transformer等深度学习模型,构建“多源数据-多参数协同反演”框架,强化参数间的关联约束;三是结合Sentinel-3等高频次卫星数据,建立生态价值动态监测与预警体系,实现评估从“静态核算”向“动态预警”的转变。随着遥感技术向高分辨率、智能化、一体化发展,其在生态价值评估中的应用将更加广泛,为生态文明建设提供更有力的技术支撑。

[参考文献]

- [1]国家林业和草原局.生态系统服务价值评估技术导则(LYT3234-2020)[S].北京:中国标准出版社,2020.
- [2]欧阳志云,王如松,赵景柱.生态系统服务功能及其生态经济价值评价[J].应用生态学报,1999,10(5):635-640.

[3]傅伯杰,张立伟.生态系统服务权衡与区域可持续发展[J].地理学报,2018,73(10):1831-1839.

[4]官鹏,李小文,王桥.遥感生态学研究进展[J].生态学报,2016,36(20):6229-6237.

[5]朱文泉,潘耀忠,张锦水.中国陆地植被净初级生产力遥感估算[J].植物生态学报,2007,31(3):413-424.

[6]刘纪远,邵全琴,樊江文.生态系统服务功能空间格局研究进展[J].地理研究,2019,38(1):10-21.

[7]李小文,王锦地,刘强.植被遥感模型与植被指数研究进展[J].遥感学报,2001,5(3):225-232.

[8]秦其明,袁金国,王桥.水体遥感监测研究进展[J].地理科学进展,2015,34(6):724-732.

[9]张宏波,李建龙,蒋平.基于遥感的土地利用/覆被分类研究进展[J].遥感技术与应用,2020,35(2):257-268.

[10]王正兴,刘闯,赵冰茹.植被覆盖度遥感估算方法研究进展[J].生态学杂志,2009,28(9):1863-1870.

[11]朴世龙,方精云,贺金生.陆地生态系统净初级生产力研究进展[J].植物生态学报,2001,25(5):511-518.

[12]杜培军,陈云浩,周启鸣.微波遥感技术在水资源监测中的应用[J].水科学进展,2018,29(3):443-452.

[13]于贵瑞,李轩然,王秋凤.陆地生态系统生物量遥感估算研究进展[J].生态学杂志,2014,33(9):2562-2571.

[14]赵英时.遥感应用分析原理与方法[M].3版.北京:科学出版社,2018.

[15]谢高地,鲁春霞,冷允法.青藏高原生态资产的价值评估[J].自然资源学报,2003,18(2):189-196.

[16]陈镜明,吴霞,刘毅.生态遥感的前沿与挑战[J].中国科学:地球科学,2022,52(5):865-878.

作者简介:

马洪坤(1994--),男,汉族,黑龙江人,硕士研究生,工程师,研究方向:卫星遥感应用。

闫博(1995--),男,汉族,黑龙江人,本科,工程师,研究方向:卫星应用市场。