

基于冠层结构指标的森林生态系统恢复评估综述

王宁*, 黄晓君#

内蒙古师范大学地理科学学院, 内蒙古 呼和浩特

收稿日期: 2026年4月23日; 录用日期: 2026年6月19日; 发布日期: 2026年6月30日

摘要

森林生态系统在气候变化与人类的干扰下亟需有效的恢复评估方法。传统依赖植被组成和生物量的指标虽能反映生态状况,但在大尺度、长期及定量化监测中存在局限。因此,如何有效监测森林生态恢复动态,特别是在冠层尺度上的恢复过程,成为了森林生态学和遥感学研究的热点之一。本文系统综述了基于森林冠层结构的生态恢复评估进展,重点探讨了叶面积指数(LAI)、冠层覆盖度(CC)和冠层高度(CHM)三类关键指标的应用。研究表明,这些冠层指标可通过多源遥感高效获取,能够揭示森林在光合作用、水分循环和碳储量积累等过程中的恢复轨迹,补充传统指标不足。结合文章分析,阐明冠层结构在监测森林生态系统恢复动态中的优势,并提出未来应加强多源数据融合、机器学习方法与地面验证,以提升跨尺度和跨区域的恢复评估能力。该综述为森林资源管理与生态保护提供了科学依据和实践参考。

关键词

冠层结构指标, 生态系统, 恢复评估, 森林恢复

Review of Forest Ecosystem Restoration Assessment Based on Canopy Structure Indicators

Ning Wang*, Xiaojun Huang#

College of Geography Science, Inner Mongolia Normal University, Hohhot Inner Mongolia

Received: April 23, 2026; accepted: June 19, 2026; published: June 30, 2026

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 王宁, 黄晓君. 基于冠层结构指标的森林生态系统恢复评估综述[J]. 地理科学研究, 2026, 15(3): 597-602.
DOI: 10.12677/gser.2026.153055

Abstract

Forest ecosystems urgently require effective restoration assessment methods under the pressures of climate change and human disturbances. While traditional indicators based on vegetation composition and biomass can reflect ecological conditions, they have limitations in large-scale, long-term, and quantitative monitoring. Therefore, effectively monitoring forest ecological restoration dynamics, particularly the restoration process at the canopy scale, has become a key focus in forest ecology and remote sensing research. This paper systematically reviews advancements in ecological restoration assessment based on forest canopy structure, with a focus on the application of three key indicators: Leaf Area Index (LAI), Canopy Cover (CC), and Canopy Height Model (CHM). The study demonstrates that these canopy indicators can be efficiently obtained through multi-source remote sensing, revealing restoration trajectories in processes such as photosynthesis, water cycling, and carbon storage accumulation, thereby supplementing the shortcomings of traditional indicators. Through analysis, the advantages of canopy structure in monitoring forest ecosystem restoration dynamics are clarified, and future research should strengthen multi-source data integration, machine learning methods, and ground validation to enhance restoration assessment capabilities across scales and regions. This review provides a scientific basis and practical reference for forest resource management and ecological conservation.

Keywords

Canopy Structure Index, Ecosystem, Recovery Assessment, Forest Restoration

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着全球气候变化和人类活动的加剧,森林生态系统面临着日益严重的干扰和退化,特别是森林虫害、火灾和人为活动所导致的生态系统损害[1]-[3],已经对生态环境造成了深远影响。传统的森林恢复评估方法多依赖于植被组成、物种多样性及地上生物量等指标,虽然能反映部分生态恢复状况,但在大尺度、长期监测以及定量化方面存在局限性。近年来,基于森林冠层结构的评估逐渐成为研究热点。

冠层结构作为森林生态系统的重要组成部分,近年来在多个领域得到广泛应用。例如,在气候变化研究中,冠层指标(如叶面积指数)被用于模拟碳通量与能量交换[4];在生态水文学中,冠层覆盖度可作为蒸散发和水分循环的关键输入指标[5];在遥感生态学中,冠层光谱特征与结构信息被广泛用于植被分类、健康状况监测及生物量估算[6];在森林火灾影响中,树冠指标还被用于评估森林火灾严重程度[7]。与传统生物多样性或群落结构指标相比,冠层指标具有直观、可测量、可量化的优势,并能够通过多源遥感数据高效获取。

本综述旨在系统梳理基于冠层结构的森林生态恢复评估研究进展,重点讨论叶面积指数(LAI)、冠层覆盖度(CC)和冠层高度(CHM)三大关键指标在生态恢复监测中的应用潜力与实践意义。文章将从森林生态系统恢复的基本内涵出发,阐释冠层结构的定义与特征,回顾多种指标在森林恢复评估中的应用现状,进而聚焦于冠层指标在恢复监测中的作用,最后总结其科学意义与未来发展方向。

2. 森林生态系统恢复及冠层结构概述

冠层结构(Canopy Structure)通常指森林植被上部空间中叶片、枝条和树冠的空间分布格局及其相关指标。其主要特征包括叶面积指数(Leaf Area Index, LAI)、冠层覆盖度(Canopy Cover, CC)、冠层高度(Canopy Height Model, CHM)等。选择这三类指标作为研究对象的原因在于:它们能够通过遥感手段较为稳定地获取,并且直接反映了森林生态系统在光合作用、水分循环和能量交换等过程中的状态。叶面积指数(LAI):定义为单位地面积上的叶面积总和,是描述植被结构特征的重要指标[8]。冠层覆盖度(CC):表示树冠在地面上的投影面积占比,定量描述了单位面积内叶、茎、枝在垂直方向上的投影面积比例,是衡量植被稠密度与空间异质性的关键指标[9]。冠层高度(CHM):冠层高度是指森林冠层枝、叶离地面的垂直距离,是反映森林冠层结构形态的主要指标[10]。

3. 森林生态系统恢复传统指标的局限性

在冠层结构指标兴起之前,诸多研究依赖植被指数(如 NDVI、NBR、EVI)和生物量指标进行恢复评估。

植被指数在森林恢复方面的重要性首先体现在其无可比拟的宏观监测与评估能力。例如,有研究利用 NDVI、NBR、EVI、NDMI、NDWI、SAVI 和 BSI 差异指数,并将其输入随机森林(RF)模型。构建 2005~2020 年遥感生态指数(RSEI)时间序列,从而有效评价了火后森林生态质量的恢复情况[11]。此外,在探讨日本云仙火山喷发后植被恢复的时空模式时,利用 Landsat 和 NDVI、NBR 等植被指数进行对比,结果发现 NBR 在植被恢复的早期阶段表现出了比 NDVI 更好的监测能力[12]。进一步地,通过遥感技术结合 NDVI、GNDVI、EVI 等植被指数,评估菲律宾林区在台风和洪水侵袭后的恢复能力,研究表明,基于高分辨率卫星图像,该区域植被在两年内恢复至原始状态,且海拔对恢复速度有显著影响[13]。综上所述,这种地面数据与遥感影像的结合,极大地提升了恢复监测的精准度,也为将来的生态恢复提供了更多可行的解决方案。

通过量化生物量的积累与分配,能够直接、综合地评估森林从干扰中恢复的速率以及生态系统的整体健康水平。例如,在对洪灾后不同林型的分析中,研究结果表明植物总生物量随恢复程度显著增加,且未受损样地生物量显著高于受损及恢复中样地,这印证了生物量积累是森林从干扰中恢复的关键表征[14]。同时,通过建立高精度的物种特异性与通用异速生长方程,有研究证实生物量与胸径、树高及木材密度呈正相关关系,从而为量化恢复提供了可靠工具[15]。进一步地,在退化喀斯特森林自然恢复过程中,有研究发现生物多样性呈现出先上升后稳定的趋势;其中幼苗的物种丰富度逐渐降低,而成树的物种丰富度逐渐增加。这一结果表明,喀斯特森林自然恢复过程中的物种组成变化一定程度上受确定性过程影响,因此为人工促进森林恢复提供一定理论参考[16]。

增强植被指数(EVI)通过量化植被绿度动态与物候指标,能够有效揭示森林在干扰后的恢复速率、韧性及群落演替轨迹,为评估恢复成效和制定适应性管理策略提供关键依据。有研究通过分析 EVI 动态发现,重新造林区域的整体恢复力值为 0.64,表明植被仍处于恢复阶段,其恢复速率和韧性显著受历史土地利用类型、树种丰富度及地形条件的共同调控。研究为恢复评估提供了重要的参考依据[17]。同时,利用 EVI 作为核心指标,分析大兴安岭火烧迹地植被的受损与恢复动态。结果表明,轻度、中度和重度火烧迹地的 EVI 值分别下降了约 30.0%、48.3%和 68.8%。火后,植被进入恢复阶段,所有迹地的 EVI 值均呈现逐步上升趋势,恢复速率在林地中表现为重度 > 中度 > 轻度的特点[18]。

4. 冠层结构指标的森林生态系统恢复评估研究

本章在介绍三类指标的基础上,进一步区分不同干扰类型(火烧、风暴、虫害等)以及热带雨林森林生

态系统的森林恢复案例, 以增强综述的情境化与精细度。

4.1. 叶面积指数的恢复评估研究

叶面积指数(LAI)作为反映森林光合作用潜力的重要指标, 常被用于估算森林生产力与碳循环。在森林火灾恢复研究中, LAI 能够揭示植被覆盖度的增加与光能利用效率的改善。例如, 有研究利用地面样本数据与遥感获取的 LAI, 评估了不同火烧严重程度下的恢复轨迹。结果表明: LAI 与活立木密度及灌木覆盖度具显著相关性($R^2 \approx 0.70$), 其中低严重程度区域在火后约 4 年即可恢复, 而高严重程度区域则恢复缓慢[19]; 此外, 利用叶面积指数(LAI)作为植被恢复的代理指标, 通过广义线性混合模型(GLMMs)分析西班牙东北部阿拉贡地区 30 个火灾区域的恢复动态。研究发现, 模型预测($R^2 \approx 0.80$), 其中火灾严重程度和火灾后最初几年的水分供应是影响 LAI 再生的最关键驱动因素[20]; 进一步地, 利用中分辨率成像光谱仪(MODIS)叶面积指数(LAI)和反照率对美国西部火灾后的森林恢复进行分析发现, LAI 的恢复因森林类型差异显著: 部分森林在火灾后 25 年仅恢复到火前水平的 60%~70%, 而另一些则可恢复至 120%~150%。且初始 LAI 越高的区域, 火灾后的绝对变化越大。LAI 恢复主要受海拔、年降水量和夏季平均气温控制[21]。在虫害方面中, 通过叶面积指数(LAI)评估莫索竹虫害侵蚀后的植被生长状态, 为莫索竹林的参数反演提供了新颖视角和技术支持[22]。此外, 吉普赛蛾爆发后通过归一化差分植被指数(NDVI)、标准化 NDVI (Z NDVI)和叶面积指数(LAI)能够捕捉不同程度的落叶和部分恢复。这些发现强调了将卫星数据与实地观测相结合的价值, 以改善预警系统, 增强吉普赛蛾爆发的预测和管理[23]。

4.2. 冠层覆盖度的恢复评估研究

在不同森林生态恢复评估中, 冠层覆盖度(CC)作为衡量植被封闭性与群落空间结构的关键指标, 广泛用于判断生态系统康复状况。例如, 在热带雨林中有研究利用空间激光雷达结合地统计技术, 对自然森林冠层覆盖度的空间异质性及其生态意义进行了分析, 结果发现地形因子对冠层覆盖度影响显著, 其中高程最大, 坡度次之, 坡向最小, 强调了从结构角度评估栖息地质量的重要性[24]。同时, 系统综述指出冠层覆盖度是遥感生态恢复监测中最便捷、覆盖范围最广的指标之一, 为长期动态监测提供了现实可行路径[25]。进一步地, 有研究通过结合太空与地面遥感数据(GEDI + Landsat)与机器学习技术, 使用 GEDI2B 级数据训练的极端梯度提升(XGB)算法($R^2 = 0.5570$, $RMSE = 0.1603$, $MdAE = 0.0885$)和 RF ($R^2 = 0.5497$, $RMSE = 0.1617$, $MdAE = 0.0896$)算法在森林冠层覆盖估计方面提供了更高的精度, 突出了冠层覆盖度在衡量森林健康、生物多样性支撑及恢复监测中的关键作用[26]。

4.3. 冠层高度的恢复评估研究

冠层高度是衡量森林群落结构演替的重要指标, 随着植被逐步恢复, 它反映了树木生长、层级结构重建和碳储量积累情况。例如, 在火灾方面: 有研究采用卷积神经网络(CNN)模型结合遥感数据, 精确绘制了火灾前后森林冠层高度图, 从而展示了火灾后森林结构恢复的可量化动态[27]。此外, 在风暴研究中对瑞士阿尔卑斯地区风暴扰动后的森林进行长期监测, 结果发现 31 年后冠层高度恢复已达约 67%, 冠层覆盖率恢复至 90%, 这进一步地凸显了冠层高度在生态恢复与保护功能恢复中的重要性[28]。同时, 在虫害中根据林木冠层高度的不同颜色, 识别落叶松受针叶害虫的危害程度, 为之后监测恢复程度提供依据[29]。

5. 结语

综上所述, 基于冠层结构的森林生态恢复评估具有科学性、客观性与应用价值。叶面积指数、冠层覆盖度与冠层高度三类指标为大尺度、长期、量化监测提供了有效路径, 能够补充传统指标的不足。

作为代理指标, 冠层结构指标能够揭示森林应对干扰的抵抗、恢复与弹性能力, 从而服务于森林资源管理与生态保护实践。

未来的研究应进一步结合多源遥感数据与机器学习算法, 推动冠层指标在跨尺度、跨区域的森林恢复评估中的应用, 同时加强实地监测与模型验证, 以确保冠层结构指标能够更精准地反映生态恢复的过程与质量。随着高分辨率卫星、机载与地基激光雷达(LiDAR)、无人机多光谱与超光谱成像等新型观测技术的普及, 森林冠层结构的精细化、动态化监测将成为可能。与此同时, 深度学习、图神经网络及数据同化方法的引入, 将显著提升冠层指标反演与生态恢复预测的精度, 为大数据驱动的生态恢复监测提供新途径。未来还应探索冠层结构指标与生态系统功能(如碳汇能力、水文调节、生物多样性维持)之间的定量关系, 以实现从“结构恢复”向“功能恢复”的科学跨越。此外, 基于冠层指标的恢复评估有望与全球碳中和战略、生态修复工程及森林资源可持续管理政策深度融合, 支撑区域与全球尺度的森林健康监测与生态决策, 为实现生态文明建设与可持续发展目标提供坚实的科技支撑。

基金项目

国家自然科学基金地区基金项目: 蒙古高原针叶虫害时空动态遥感监测与爆发扩散过程模拟(42361057); 内蒙古自治区科学基金项目: 气候变化下蒙古高原落叶松毛虫虫害时空动态模拟及其对森林碳汇的影响(2025JQ002)。

参考文献

- [1] 罗先轶, 张永光. 基于多源遥感数据的森林虫害监测及驱动力分析[J]. 航天返回与遥感, 2022, 43(6): 129-140.
- [2] 于渤, 孙渐桐, 刘向宇, 等. 长白山风灾区不同恢复区地下火发生的临界地表加热温度[J]. 东北林业大学学报, 2025, 53(8): 69-75.
- [3] 路健, 史蓓涵, 杨倩, 等. 秦岭典型群落木本植物生物量影响因素研究[J]. 西北林学院学报, 2024, 39(5): 151-158.
- [4] Fox, A.M., Huo, X., Hoar, T.J., Dashti, H., Smith, W.K., MacBean, N., *et al.* (2022) Assimilation of Global Satellite Leaf Area Estimates Reduces Modeled Global Carbon Uptake and Energy Loss by Terrestrial Ecosystems. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, **127**, e2022JG006830. <https://doi.org/10.1029/2022jg006830>
- [5] Li, M., Chen, S., Hao, F., *et al.* (2024) Integration of the Vegetation Phenology Module Improves Ecohydrological Simulation by the SWAT-Carbon Model. Copernicus GmbH.
- [6] Skendžić, S., Novak, H., Zovko, M., Pajač Živković, I., Lešić, V., Maričević, M., *et al.* (2025) Hyperspectral Canopy Reflectance and Machine Learning for Threshold-Based Classification of Aphid-Infested Winter Wheat. *Remote Sensing*, **17**, Article 929. <https://doi.org/10.3390/rs17050929>
- [7] Karna, Y.K., Penman, T.D., Aponte, C., Hinko-Najera, N. and Bennett, L.T. (2020) Persistent Changes in the Horizontal and Vertical Canopy Structure of Fire-Tolerant Forests after Severe Fire as Quantified Using Multi-Temporal Airborne Lidar Data. *Forest Ecology and Management*, **472**, Article 118255. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118255>
- [8] Fang, H., Zhang, Y., Wei, S., Li, W., Ye, Y., Sun, T., *et al.* (2019) Validation of Global Moderate Resolution Leaf Area Index (LAI) Products over Croplands in Northeastern China. *Remote Sensing of Environment*, **233**, Article 111377. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111377>
- [9] 詹磊, 丁一民, 朱磊, 等. 基于伪标签迭代自训练的无人机玉米冠层覆盖度识别研究[J]. 节水灌溉, 2025(8): 114-120+130.
- [10] Gao, J., Chen, Y., Xu, B., Li, W., Ye, J., Kou, W., *et al.* (2025) Post-Fire Forest Ecological Quality Recovery Driven by Topographic Variation in Complex Plateau Regions: A 2006-2020 Landsat RSEI Time-Series Analysis. *Forests*, **16**, Article 502. <https://doi.org/10.3390/fl6030502>
- [11] Lai, R., Oguchi, T. and Zhong, C. (2022) Evaluating Spatiotemporal Patterns of Post-Eruption Vegetation Recovery at Unzen Volcano, Japan, from Landsat Time Series. *Remote Sensing*, **14**, Article 5419. <https://doi.org/10.3390/rs14215419>
- [12] Rezaei, R. and Ghaffarian, S. (2021) Monitoring Forest Resilience Dynamics from Very High-Resolution Satellite Images in Case of Multi-Hazard Disaster. *Remote Sensing*, **13**, Article 4176. <https://doi.org/10.3390/rs13204176>
- [13] 刘忆南, 郑钧源, 张知菲, 等. 灾害干扰受损森林恢复各阶段的生物量分配格局与碳储量变化[J]. 应用与环境生物学报, 2025, 31(3): 334-346.

- [14] Giraldo-Salazar, J.M., Giraldo, J.A., Mendoza-Páez, J.S., Sierra, J.C., Rueda, J.A. and Osorio-Vélez, L.F. (2025) Allometric Equations to Quantify Aboveground Biomass in Mixed-Species Plantations with Restoration Purposes in the Tropical Andes. *Journal of Forestry Research*, **36**, Article No. 44. <https://doi.org/10.1007/s11676-025-01827-w>
- [15] 赵勇强, 阎玺羽, 谢加琪, 等. 退化喀斯特森林自然恢复中不同生活史阶段木本植物物种多样性与群落构建[J]. 生物多样性, 2024, 32(5): 72-83.
- [16] Chowdhury, F.I., Bhuiyan, R.H., Espelta, J.M., Resco de Dios, V., Dilshad, T., Haque, M.R., *et al.* (2025) Land-Use Legacies and Tree Species Richness Affect Short-Term Resilience in Reforested Areas of the World's Largest Refugee Camp. *Ecological Engineering*, **215**, Article 107612. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2025.107612>
- [17] 林菲, 池泽龙, 杜玥瑶, 等. 基于 EVI 指数的森林火灾植被恢复研究[J]. 黑龙江科学, 2023, 14(20): 38-40+46.
- [18] Remke, M., Schneider, K. and Korb, J. (2025) Leafing Out: Leaf Area Index as an Indicator for Mountain Forest Recovery Following Mixed-Severity Wildfire in Southwest Colorado. *Forests*, **16**, Article 872. <https://doi.org/10.3390/fl6060872>
- [19] Leal-Medina, C., Lopatin, J., Contreras, A., González, M.E. and Galleguillos, M. (2024) Post-Fire Pinus Radiata Invasion in a Threatened Biodiversity Hotspot Forest: A Multi-Scale Remote Sensing Assessment. *Forest Ecology and Management*, **561**, Article 121861. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2024.121861>
- [20] Pérez-Cabello, F., Serrano-Notivoli, R., Montorio, R. and Iranzo, C. (2026) The Climate-Fire Nexus: Understanding Post-Fire Vegetation Recovery. *Forest Ecology and Management*, **606**, Article 123568. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2026.123568>
- [21] Shrestha, S., Williams, C.A., Rogers, B.M., *et al.* (2024) Divergent Biophysical Responses of Western United States Forests to Wildfire Driven by Eco-Climatic Gradients. *Biogeosciences*, **21**, 20.
- [22] Li, H., Xu, Z., Li, Y., Sun, L., Zhang, H., Zhang, C., *et al.* (2025) Hyperspectral Remote Sensing Estimation and Spatial Scale Effect of Leaf Area Index in Moso Bamboo (*Phyllostachys pubescens*) Forests under the Stress of Pantana Phyllostachysae Chao. *Forests*, **16**, Article 575. <https://doi.org/10.3390/fl6040575>
- [23] Yu, J., Xu, L., Shu, Q., Luo, S. and Xi, L. (2024) Spatial Effects Analysis of Natural Forest Canopy Cover Based on Spaceborne Lidar and Geostatistics. *Frontiers in Plant Science*, **15**, Article ID: 1361297. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1361297>
- [24] Wang, R., Sun, Y., Zong, J., Wang, Y., Cao, X., Wang, Y., *et al.* (2024) Remote Sensing Application in Ecological Restoration Monitoring: A Systematic Review. *Remote Sensing*, **16**, Article 2204. <https://doi.org/10.3390/rs16122204>
- [25] Molnár, T., Mócz, N., Hirka, A., Csóka, G. and Kern, A. (2025) Retrospective Analysis of a Large-Scale Gypsy Moth Outbreak in Hungary Combining Multi-Source Satellite and *in Situ* Data. *Forests*, **16**, Article 1472. <https://doi.org/10.3390/fl6091472>
- [26] Seyrek, E.C., Narin, O.G. and Uysal, M. (2025) Forest Canopy Cover Estimation with Machine Learning Using GEDI and Landsat Data in the Western Marmara Region, Türkiye. *Earth Science Informatics*, **18**, Article No. 230. <https://doi.org/10.1007/s12145-025-01747-7>
- [27] Chou, T., Zhu, X. and Reef, R. (2024) Pre- and Post-Fire Forest Canopy Height Mapping in Southeast Australia through the Integration of Multi-Temporal GEDI Data, Satellite Images, and Convolution Neural Network. *International Journal of Remote Sensing*, **45**, 3310-3331. <https://doi.org/10.1080/01431161.2024.2343429>
- [28] Moos, C., Dietrich, K., Erbach, A., Ginzler, C., Noyer, E., Schaller, C., *et al.* (2025) Recovery of the Forest's Protective Effect after Stand-Replacing Wind Disturbances. *Scientific Reports*, **15**, Article No. 19727. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-03090-9>
- [29] 西桂林, 黄晓君, 包玉海, 等. 雅氏落叶松尺蠖不同危害程度下林木冠层颜色高光谱判别[J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40(9): 2925-2931.