



基于冠层高度分层识别高冠层热带森林空间结构破碎化特征

张美男¹, 刘世荣^{1*}, 丁易¹, 许涵², 孙戈³, 张美薇⁴

1. 中国林业科学研究院森林生态环境与自然保护研究所, 森林生态系统保护修复国家林业和草原局重点实验室, 北京 100091

2. 中国林业科学研究院热带林业研究所, 海南尖峰岭森林生态系统国家野外科学观测研究站, 广州 510520

3. 中国林业科学研究院森林生态环境与自然保护研究所, 湿地环境保护与生态修复全国重点实验室, 北京 100091

4. 中山大学地理科学与规划学院, 广州 510006

* 联系人, E-mail: liusr@caf.ac.cn

收稿日期: 2026-01-22; 接受日期: 2026-04-10; 网络版发表日期: 2026-09-30

国家自然科学基金(批准号: 32501652)和中国林业科学研究院基本科研业务专项资金(批准号: CAFYBB2025ZA014, CAFYBB2024ZA032)资助

摘要 在森林覆盖整体保持连续的前提下, 不同林冠高度的森林在空间结构上仍可能呈现显著差异, 现有基于二维森林覆盖的破碎化分析方法难以全面反映这种森林结构破碎化特征. 为此, 本研究在传统经典的二维森林破碎化评估方法的基础上引入林冠高度结构特征指标, 从冠层结构分层的视角构建基于林冠高度分层的结构-格局分析框架, 借以系统揭示不同冠层高度层级的森林在空间格局上的差异特征. 以海南热带雨林国家公园为研究区, 利用高空间分辨率(10 m)林冠高度数据, 设置5~30 m的多级林冠高度分层, 并在1 km×1 km网格尺度上计算斑块数量、平均斑块面积和边缘密度等景观指标. 结果表明, 森林面积随林冠高度分层逐级提高而显著收缩, 其中林冠高度≥30 m的森林面积占比不足10%. 景观格局在中高冠层高度区间(15~20 m)发生显著变化, 表现为斑块数量增加、平均斑块面积急剧减小及边缘密度显著升高. 进一步的冠层结构-空间格局综合分析显示, 约33.7%的冠层高度≥20 m的森林分布于破碎化程度较高的空间单元内, 表明在整体森林连续覆盖的背景下, 高冠层结构在空间上仍可能呈现出分布稀疏和空间隔离程度较高的格局特征. 研究结果表明, 将林冠高度分层信息与传统二维森林破碎化指标相结合, 有助于识别仅基于森林覆盖难以揭示的高冠层森林结构空间破碎化特征, 为热带森林生态系统完整性和原真性评估、高冠层森林保护优先区识别及森林多维空间结构导向的保护与管理提供了新的量化识别方法和科学依据.

关键词 高冠层森林, 林冠高度分层, 结构破碎化, 景观格局, 热带森林, 海南热带雨林国家公园

热带森林作为全球生物多样性保护的核心载体与关键陆地碳汇, 其生态系统结构与功能的完整性对维持区域及全球生态安全具有不可替代的作用^[1,2]. 然

而, 在气候变化加剧和人类长期积累影响下, 森林退化已逐渐从显性的面积丧失转向更加隐蔽却同样深远的结构性变化, 成为威胁热带森林生态系统稳定性的

引用格式: 张美男, 刘世荣, 丁易, 等. 基于冠层高度分层识别高冠层热带森林空间结构破碎化特征. 中国科学: 生命科学

Zhang M N, Liu S R, Ding Y, et al. Identifying spatial structural fragmentation of tall-canopy tropical forests using canopy-height stratification (in Chinese). *Sci Sin Vitae*, doi: 10.1360/SSV-2025-0381

主要过程之一^[3-5]。这种变化并不一定表现为森林面积的减少,而是体现为垂直结构简化、斑块尺度缩小以及空间连通性下降等特征,可被视为一种隐性破碎化。森林破碎化评估通常依赖二维森林覆盖数据,这尽管能够有效反映面积变化,却将具有复杂垂直结构的森林简化为均质平面单元,从而忽略了冠层高度梯度反映的结构异质性和功能差异^[6,7]。在这种视角下,表现连续的森林覆盖是否仍然维持了高质量的空间结构完整性,仍缺乏充分认识。这可能会对森林生态系统功能产生深远影响。一方面,高冠层森林往往承载着更高的生物量和碳储量,其结构连续性是维持碳汇稳定性和生态系统恢复力的重要基础^[8-10];另一方面,依赖完整冠层结构的物种,尤其是树栖性或冠层活动物种,可能在结构退化的景观中面临迁移受阻和栖息地隔离的风险,例如海南长臂猿等极度濒危物种^[11,12]。因此,仅依赖森林覆盖连续性来评估生态完整性,可能低估了热带森林中潜在的结构风险。

随着空间激光雷达技术的发展,尤其是美国航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)发射的全球生态系统动态调查(Global Ecosystem Dynamics Investigation, GEDI)等星载激光雷达与

多源遥感数据的融合,区域尺度森林垂直结构参数的精细化刻画成为可能^[13,14]。林冠高度作为森林演替阶段、生物量与碳储量的核心代理指标^[15,16],其空间连续性对物种迁移与种群维持具有重要影响^[3,17]。将林冠高度信息引入破碎化评估方法中,有助于突破传统二维分析的局限,从结构-格局耦合的视角识别隐藏于连续覆盖之下的森林退化风险^[10]。

海南热带雨林国家公园是我国分布最集中、类型最多样、保存最完好、连片面积最大的热带森林生态系统之一,是岛屿型热带雨林的代表、热带生物多样性和遗传资源的宝库和海南岛生态安全屏障,具有国家代表性和全球保护意义^[18-20]。尽管该区域整体森林覆盖率较高,但在历史人为干扰与自然演替过程的共同作用下^[21],其高冠层森林的空间结构是否已经发生系统性破碎化,并在景观尺度上形成潜在风险分区,仍缺乏定量评估。

基于此,本研究以海南热带雨林国家公园为研究区,在传统基于森林覆盖的二维景观破碎化分析基础上,引入连续林冠高度信息,构建基于林冠高度分层的结构-格局分析框架,以刻画高冠层森林在连续覆盖背景下的空间格局特征(图1)。具体包括:(i)通过设

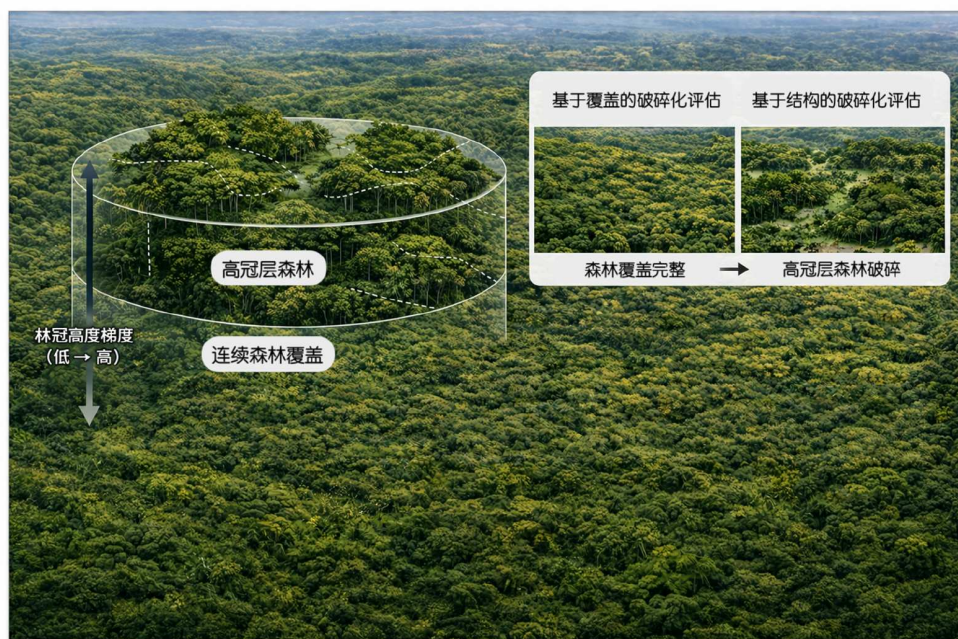


图1 连续森林覆盖背景下,基于结构分层视角识别高冠层森林空间破碎化的概念框架示意图

Figure 1 Conceptual framework for identifying spatial fragmentation of high-canopy forests under continuous forest cover from a structure-stratified perspective

置多级林冠高度分层, 系统分析森林面积及景观格局指标沿垂直结构梯度的变化特征, 揭示高冠层森林(林冠高度(canopy height, CH) ≥ 20 m)在空间连通性与结构完整性方面的格局差异; (ii) 综合森林结构层级与景观破碎化特征, 对高冠层森林进行结构-格局类型划分, 识别在森林覆盖整体连续条件下仍表现出显著空间异质性的关键区域. 研究旨在深化对高冠层森林空间结构特征的认识, 为完善森林结构的异质性与隐性破碎化特征, 以及完善森林结构完整性评估、优化保护优先区划定及推进结构导向的差异化保护管理提供科学依据.

1 材料和方法

1.1 研究区概况

海南热带雨林国家公园(18°23'~19°00'N, 108°44'~110°04'E)位于海南岛中南部(图2), 总面积约4269 km², 其中核心保护区面积2331 km², 占国家公园总面积的54.6%; 一般控制区面积1938 km², 占45.4%. 园区内森林覆盖率达95.86%. 该区域代表了亚洲热带雨林向常绿阔叶林过渡的代表性森林类型^[20]. 以五指山为中心向吊罗山、尖峰岭、霸王岭和黎母山辐射, 沿海拔梯度发育了较为完整的垂直地带性植被, 在植被类型、物种组成和旗舰物种上表现出较高完整

性, 热带自然生境维持了极高原真性^[22,23]. 作为全球最珍稀的灵长类动物之一, 海南长臂猿(*Nomascus hainanus*)的唯一栖息地, 该区域森林冠层的连续性与高冠层森林的结构完整性对该物种的生存繁衍与迁移扩散具有重要影响并起着非常关键的作用^[12,22].

在长期自然演替与历史人类活动(如传统刀耕火种、森林采伐与林下资源利用)共同影响下^[24], 公园内部森林景观形成了从低矮次生林到高冠层森林的连续高度梯度^[25,26]. 这种垂直结构差异使得区域内森林虽然在平面覆盖率较高的同时, 其冠层高度及垂直结构在空间上呈现显著异质性, 从而为在连续森林覆盖背景下分析基于林冠结构分层的森林破碎化特征提供了理想的研究对象.

1.2 数据来源与预处理

1.2.1 林冠高度数据

本研究采用空间分辨率为10 m的森林冠层高度产品^[27]. 该数据集以NASA GEDI星载激光雷达的相对冠层高度(relative height 98%, RH98)为核心参考, 结合Sentinel-2多光谱影像, 通过概率深度学习模型进行融合反演, 能够实现大范围森林冠层高度的连续化空间映射. 相较于传统的机载或地面样点测量数据, 该产品在空间覆盖与空间分辨率上具备显著优势, 能够有效刻画局地尺度森林结构变化的细微差异^[27].

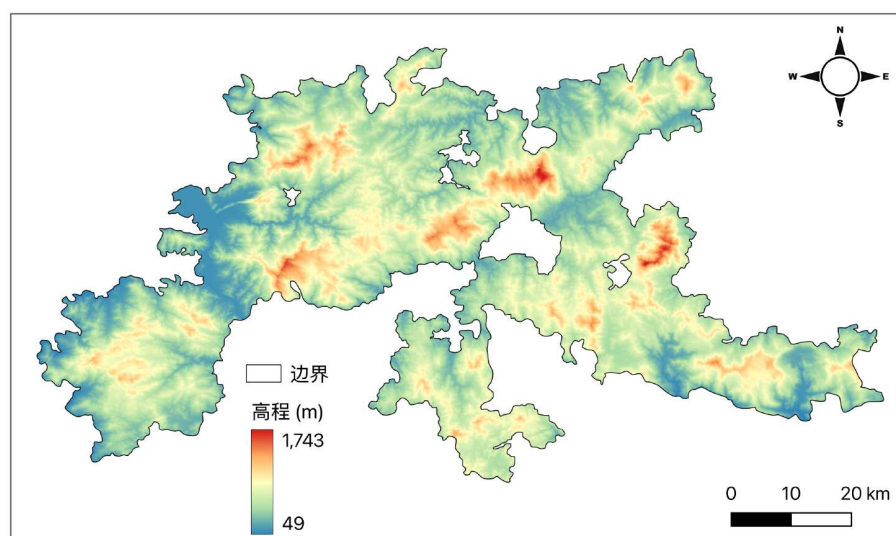


图2 海南热带雨林国家公园研究区边界及地形特征图

Figure 2 Boundary and topographic characteristics of the study area in Hainan Tropical Rainforest National Park

1.2.2 景观分析单元构建与数据集成

为保证景观格局计算中数据在空间尺度上的一致性,本研究在Google Earth Engine(GEE)平台上,以海南热带雨林国家公园边界为范围约束,生成1 km×1 km的规则网格,将其作为基本景观分析单元,共获得5007个格网单元。GEE作为云计算驱动的地理空间大数据分析平台,具备强大的多源影像存储、并行计算与时空数据集成能力,能够高效支持大尺度、多时相遥感分析^[28,29]。本研究在GEE平台上对冠层高度数据进行了裁剪、重采样与栅格化集成等预处理,并据此开展景观指标计算与空间制图。

1.3 林冠高度分层下的森林景观破碎化量化方法

1.3.1 林冠高度分层与多阈值森林掩膜构建

本研究采用基于林冠高度的嵌套式分层方法,对森林空间结构进行分层识别。该方法通过逐级提高林冠高度判定标准,连续保留满足条件的森林像元,以表征森林结构由低冠层向高冠层递进的空间结构梯度,而非林分内部相互独立或互斥的垂直分层结构。综合考虑海南地区森林林冠高度的分布特征,并结合森林动态监测样地的地面调查数据,在保证森林结构分层连续性与分析可比性的前提下,设置六个林冠高度水平(CH≥5, 10, 15, 20, 25, 30 m),逐级筛选森林像元,构建一组相互嵌套的森林结构分层掩膜(表1)。

在林冠高度栅格数据上,当像元 x 的冠层高度值CH(x)大于或等于设定阈值 T 时,将其判定为对应结构分层下的森林像元,反之则为非森林像元。相应的森林二值掩膜定义如下:

$$F_{10}^{CH}(x) = \begin{cases} 1, CH(x) \geq T, \\ 0, CH(x) < T, \end{cases} \quad (1)$$

其中, $F_{10}^{CH}(x)$ 表示在冠层高度阈值 T 下获得的森林二值掩膜(森林=1,非森林=0),下标10指像元空间分辨率为10 m,CH(x)为像元 x 的冠层高度值。

通过该方法,可在同一空间域内实现森林结构的多层级识别,在保持不同高度层级之间结构连续性的同时,为后续景观破碎化指标的计算与跨结构层级对比分析提供统一的数据基础。

1.3.2 景观格局指标计算

为量化不同林冠高度层级下森林景观的破碎化特征,本研究选取斑块数量(number of patches, NP)、平均斑块面积(mean patch area, MPA)和边缘密度(edge density, ED)三类经典景观格局指标进行计算。这三类指标广泛用于评估森林空间结构的完整性与破碎化程度,可从不同维度反映森林空间分割、面积结构及边缘复杂度等特征^[7,31]。

(1) 斑块划分与面积计算。基于森林二值掩膜,通过8邻域连接规则识别森林斑块。每个斑块的面积由其像元数目计算得到:

$$A_p = n_p \times s^2, \quad (2)$$

其中, A_p 为第 p 个斑块面积(m²), n_p 为该斑块内像元数量, $s=10$ m为像元边长。

(2) 景观指标计算。在1 km×1 km的景观单元 G_i 内,统计不同斑块编号的数量作为NP:

$$NP_i = \# \{p : \exists x \in G_i, P_{10}(x) = p\}, \quad (3)$$

表 1 基于林冠高度分层的嵌套森林冠层结构层级描述

Table 1 Structural levels of nested forest canopy based on canopy height stratification

林冠高度层级	结构特征与空间含义说明
CH≥5 m (基础结构)	表征区域内所有具备木本冠层的森林像元,反映整体森林覆盖与空间连续性,常作为森林覆盖的结构基线情景 ^[30]
CH≥10 m (低-中冠层结构)	冠层高度进一步提升,连续冠层开始形成,反映具备一定垂直结构发育程度的森林空间单元
CH≥15 m (中冠层结构)	冠层高度与空间连续性同步增强,表征结构发育程度较高、但仍广泛分布的冠层结构层级
CH≥20 m (高冠层结构)	代表区域内冠层高度较高、空间分布相对受限的森林结构单元,通常对应结构复杂度较高的冠层部分
CH≥25 m (高完整度冠层结构)	冠层高度与垂直结构完整性进一步提高,在空间上存在斑块化分布特征
CH≥30 m (极高冠层结构)	表征区域内冠层高度处于高值区间的森林结构单元,通常以小尺度斑块形式零散分布

其中, NP_i 为景观单元 G_i 中的斑块数量, $P_{10}(x)$ 为像元 x 所属的斑块编号.

MPA 定义为每个景观单元内森林总面积与斑块数量之比:

$$MPA_i = \begin{cases} \frac{A_{G_i}}{NP_i}, NP_i > 0, \\ NA, NP_i = 0, \end{cases} \quad (4)$$

其中, A_{G_i} 为网格 G_i 内森林像元的总面积.

ED 通过形态学梯度方法识别边界像元. 对每个像元检查其 3×3 邻域, 若邻域内像元值不一致, 则该像元被标记为边界像元. 每个景观单元的边界长度近似为边界像元数乘以像元边长:

$$L_i^{\text{edge}} \approx N_i^{\text{edge}} \times s, \quad (5)$$

其中, N_i^{edge} 为边界像元数量.

ED 定义为单位面积内的边界长度(单位: m/ha):

$$ED_i = \frac{L_i^{\text{edge}}}{A_{G_i}}. \quad (6)$$

1.3.3 基于结构-格局耦合的高冠层森林空间类型识别方法

为刻画高冠层森林在景观尺度下的空间结构特征及其差异, 本研究构建了一个基于森林垂直结构与景观空间格局的结构-格局耦合分析框架. 该框架以林冠高度 ≥ 20 m 的森林像元为分析对象, 在统一的空间尺度下, 将森林结构属性(以林冠高度分层表征)与景观破碎化特征(以综合破碎化指数表征)作为两个相互独立但可联合分析的维度, 用于揭示高冠层森林在空间配置上的潜在结构风险差异. 作为两个相互独立但可耦合的评价维度, 用于识别高冠层森林在空间连续性与景观组织特征上的差异.

(1) 综合破碎化指数计算. 为量化高冠层森林在景观尺度下的破碎化程度, 构建综合破碎化指数(fragmentation index, FI), 将斑块尺度特征与边缘形态特征纳入统一评价体系. 考虑到指标的代表性和可比性, 选取 MPA 和 ED 作为基础指标. 为消除不同指标之间的量纲差异, 首先对 MPA 和 ED 进行标准化处理:

$$MPA_{\text{std}} = \frac{MAP - \min(MAP)}{\max(MAP) - \min(MAP)}, \quad (7)$$

$$ED_{\text{std}} = \frac{ED - \min(ED)}{\max(ED) - \min(ED)}. \quad (8)$$

在此基础上, 综合破碎化指数定义为:

$$FI = \frac{(1 - MPA_{\text{std}}) + ED_{\text{std}}}{2}. \quad (9)$$

FI 取值范围为 $[0, 1]$, 值越大表示破碎化程度越高, 即斑块尺度较小且边缘形态相对复杂; 数值越小则表示空间结构相对完整、斑块分布更为连续.

(2) 破碎化等级划分. 为刻画研究区内高冠层森林破碎化程度的相对差异, 采用四分位法对 FI 进行等级划分. 具体而言, FI 位于上四分位 ($\geq 75\%$) 的景观单元定义为高破碎化水平, 位于下四分位 ($\leq 25\%$) 的景观单元定义为低破碎化水平. 该方法用于反映区域尺度上破碎化特征的相对空间分布格局.

(3) 结构-格局耦合类型识别. 在 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 景观单元尺度上, 将高冠层森林的结构层级信息与破碎化等级进行交叉组合, 构建结构-格局耦合类型体系. 进一步结合高冠层森林在网格内的分布规模(以森林面积 $\geq 5 \text{ ha}$ 作为结构性斑块的参考值), 识别不同结构-格局特征的空间类型(表2). 该分类结果用于揭示高冠层森林在空间连续性与景观组织特征方面的异质性格局.

2 结果

2.1 不同林冠高度层级下森林面积的空间分布特征

海南热带雨林国家公园森林面积沿林冠高度梯度呈现出显著的结构分层特征(图3, 表3). 整体来看, 森林面积随林冠高度层级升高而持续且快速下降: 从林冠高度 $CH \geq 5 \text{ m}$ 的 4583 km^2 逐步减少至 $CH \geq 30 \text{ m}$ 的 443 km^2 , 仅约 9.7% 的森林像元达到 30 m 以上的高度, 表明高冠层森林在区域尺度上所占比例较低且空间分布受限.

森林面积沿高度梯度呈现出明显的阶段性特征(图4). 在低冠层高度 ($\geq 5 \sim 15 \text{ m}$) 范围内, 森林面积变化相对缓慢, 由 4583 km^2 减至 4454 km^2 (降幅 2.8%), 反映出低-中冠层森林在区域内分布广泛且连续性较高. 在进入中等冠层高度 ($\geq 15 \sim 20 \text{ m}$) 区间, 森林面积下降幅度明显增大, 由 4454 km^2 减至 3645 km^2 (降幅 18.1%), 表明该高度区间对应着森林空间分布由中冠层向高冠层过渡的关键结构区段. 在更高冠层高度范围 ($\geq 25 \sim 30 \text{ m}$), 森林面积衰减最为显著, 由 1639 km^2 急减

表 2 基于结构-格局耦合的高冠层森林空间结构类型划分

Table 2 Structure-pattern-based classification of spatial structural types for high-canopy forests

结构-格局类型	判定条件	描述
核心结构区	森林面积 ≥ 5 ha且FI $\leq 25\%$	高冠层森林空间连续性较高, 斑块尺度较大, 边缘复杂度较低, 整体结构-格局特征相对完整
高破碎化区	森林面积 ≥ 5 ha且FI $\geq 75\%$	高冠层森林仍具有一定面积规模, 但空间配置离散, 边缘密度较高, 结构连续性显著受限
小斑块连续区	森林面积 < 5 ha且FI $\leq 25\%$	由尺度较小但空间配置相对紧凑的高冠层斑块构成, 表现出局部结构连续性特征
小斑块破碎区	森林面积 < 5 ha且FI $\geq 75\%$	高冠层森林斑块面积较小且空间分布离散, 边缘形态复杂, 结构-格局完整性较低

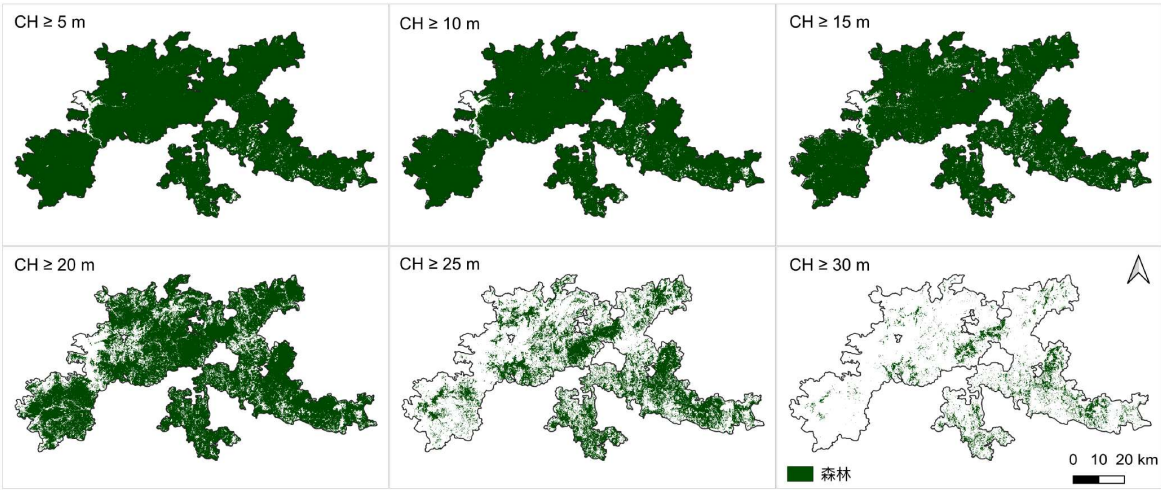


图 3 海南热带雨林国家公园中不同林冠高度分层下的森林空间分布格局

Figure 3 Spatial distribution of forests under canopy height stratification in Hainan Tropical Rainforest National Park

表 3 不同林冠高度分层下的森林面积统计

Table 3 Forest area statistics by canopy height stratification

林冠高度层级(m)	森林面积(km ²)	占CH ≥ 5 m森林比例(%)
CH ≥ 5	4583	100.0
CH ≥ 10	4556	99.4
CH ≥ 15	4454	97.2
CH ≥ 20	3645	79.5
CH ≥ 25	1639	35.8
CH ≥ 30	443	9.7

至443 km²(降幅73.0%), 表明顶级冠层森林在空间上呈高度零散和局部分布的格局特征。

总体来看, 不同林冠高度层级的森林面积在研究区内呈现出显著差异: 中等冠层高度范围内森林占比较高, 而高冠层森林所占比例明显偏低。在CH $\geq 15\sim 20$ m高度区间, 森林面积随高度等级变化出现明显转折, 其后高冠层森林面积迅速收缩。这一结果表明, 在整体森林覆盖连续的背景下, 高冠层森林在空

间分布上具有更为受限的格局特征。

2.2 森林景观格局沿林冠高度分层的变化特征

景观格局分析结果表明, 不同林冠高度层级下森林空间结构存在显著的差异(图5)。随着林冠高度分层由低向高逐级提高(5~30 m), 景观格局指标在数值水平和变化幅度上呈现出明显的分层特征。

在斑块尺度上, NP随林冠高度层级升高整体呈增加趋势, 网格尺度中位数由CH ≥ 5 m时的1个增至 ≥ 30 m时的约2个(图5A)。与之对应, MPA随高度层级升高而显著减小, 由89.1 ha下降至1.2 ha, 表明出高冠层结构在空间上分布范围明显收缩(图5B)。ED在不同高度层级间表现出明显差异, 其数值在15~20 m高度区间出现明显上升, 并在更高高度层级下维持较高水平(图5C), 反映出高冠层森林斑块在空间配置上具有较高的边缘比例特征。

空间分布结果进一步揭示了不同林冠高度层级森

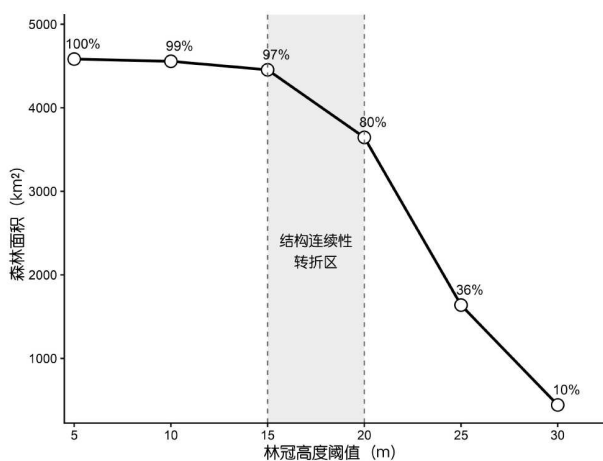


图 4 不同林冠高度结构层级下森林面积的空间分布变化
Figure 4 Spatial variation in forest area across canopy height structural levels

林的空间格局差异(图6)。低冠层结构(≥ 5 m)在研究区内分布广泛, 整体呈现出较为连续的空间格局; 随着林冠高度层级升高, 中等冠层结构(≥ 15 m)在部分区域开始表现出不连续特征; 而高冠层结构(≥ 30 m)在空间上高度离散, 主要以小尺度斑块形式分布, 并嵌套于低-中冠层结构背景之中, 形成明显的林冠高度分层嵌套格局。

2.3 基于结构-格局耦合的高冠层森林景观格局类型识别

基于林冠高度分层与景观格局指标相结合的结果

构-格局耦合分析框架, 对研究区内高冠层森林($CH \geq 20$ m)的空间格局特征进行了综合识别(图7)。在 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 景观单元尺度上, 综合考虑高冠层森林的结构层级(由林冠高度分层表征)与景观分布特征(以综合破碎化指数FI表征), 将高冠层森林划分为四类具有不同结构-格局特征的空间类型(表2)。

结果显示, 高冠层森林在研究区内呈现出显著的空间异质性。其中, 结构完整性和空间连贯性相对较高的类型约占高冠层森林总面积的66.3%, 主要分布于地形起伏较大的中部区域, 其景观格局特征表现为斑块尺度较大、空间分布相对连续。相对而言, 其余约33.7%的高冠层森林分布于景观破碎化程度较高的空间单元中, 表现为斑块尺度较小、空间分布离散及边缘形态相对复杂的空间格局特征。

总体来看, 基于结构-格局耦合的分类结果揭示了海南热带雨林国家公园内高冠层森林在空间分布与格局特征方面呈现显著差异。结果表明, 即使在整体森林覆盖较高的背景下, 高冠层森林在景观尺度上的空间连续性仍可能呈现明显分化。

3 讨论

本研究基于林冠高度分层的结构-格局分析框架, 表明在整体森林覆盖连续的背景下, 海南热带雨林国家公园内不同冠层高度层级的森林空间格局仍存在显著差异, 尤其是在高冠层结构层级中表现出

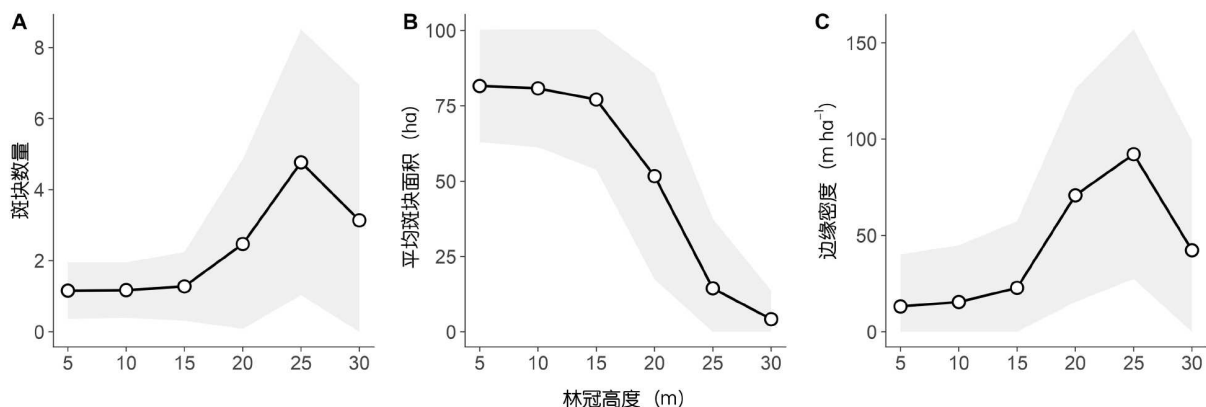


图 5 不同林冠高度分层下景观格局指标的变化特征。A: 斑块数量(NP); B: 平均斑块面积(MPA), C: 边缘密度(ED)。实线和圆点表示各林冠高度层级下指标的平均值, 阴影区域表示对应指标的标准差范围

Figure 5 Changes in landscape metrics across canopy height stratification. A: Number of patches (NP); B: mean patch area (MPA); C: edge density (ED). Solid lines and circles indicate the mean values of each metric across different canopy height levels, while shaded areas represent the corresponding standard deviations

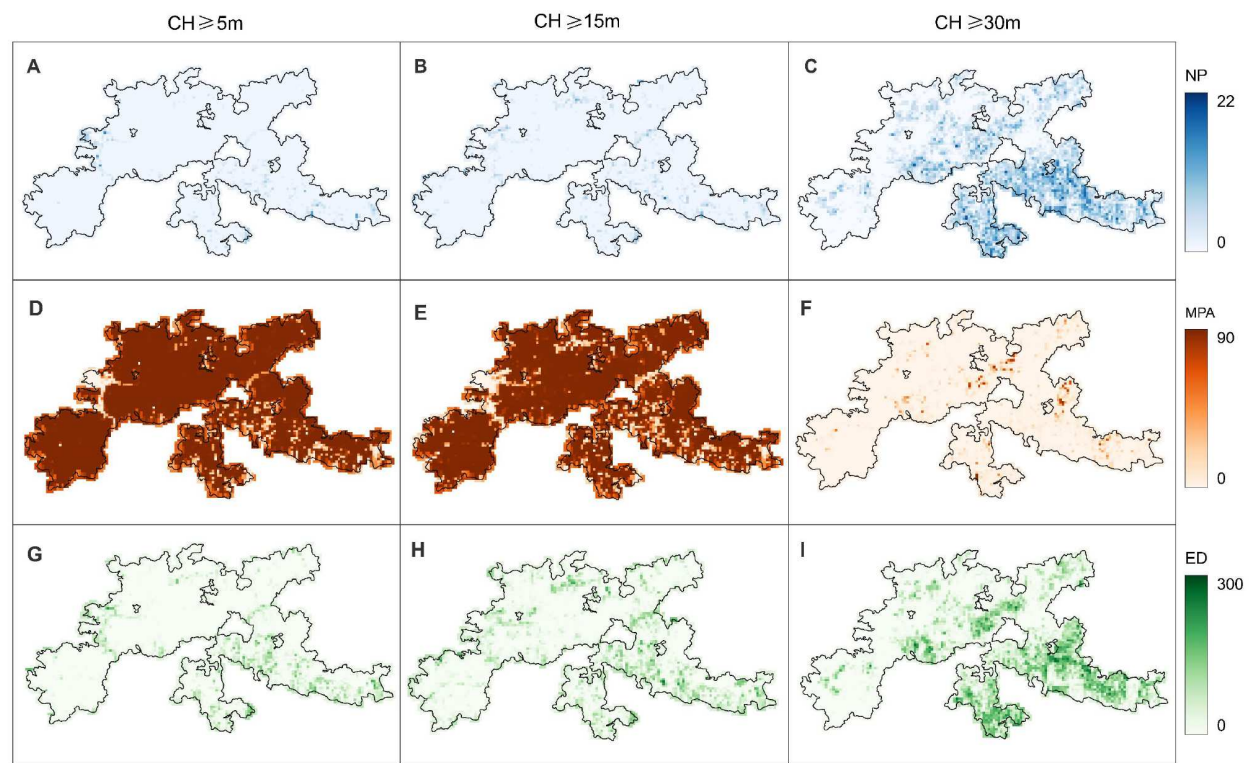


图 6 不同林冠高度分层下景观格局指标的空间分布特征. 斑块数量(NP)(A~C)、平均斑块面积(MPA)(D~F)、边缘密度(ED)(G~I), 分别对应林冠高度分层为CH≥5 m, CH≥15 m和CH≥30 m的空间格局
Figure 6 Spatial distributions of landscape metrics across canopy height stratification. Number of patches (NP) (A~C), mean patch area (MPA) (D~F), and edge density (ED) (G~I), corresponding to canopy height levels of CH≥5 m, CH≥15 m, and CH≥30 m, respectively

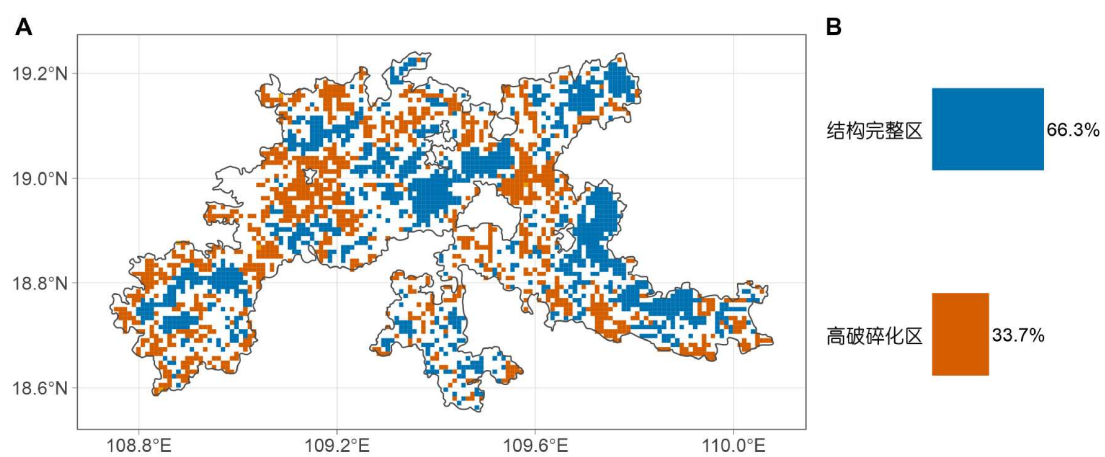


图 7 基于林冠高度分层与景观格局的高冠层森林结构-格局类型分类结果. A: 在CH≥20 m的高冠层森林范围内, 不同结构-格局类型的空间分布; B: 各结构-格局类型的面积比例
Figure 7 Classification of high-canopy forest structure-pattern types based on canopy height stratification and landscape metrics. A: Spatial distribution of different structure-pattern types within high-canopy forests (CH≥20 m); B: area proportions of each structure-pattern type

更为突出的空间离散特征. 结果显示, 若仅依据二维森林覆盖信息进行破碎化评估, 可能难以识别高大成熟林在空间连通性方面的变化特征, 从而低估其结构完整性在景观尺度上的潜在脆弱性^[7,8,32~36]. 这

提示, 森林面积或覆盖维持稳定, 并不必然意味着森林结构状态的同步稳定, 高冠层等关键结构要素的空间组织特征有必要作为森林保护评估的重要补充维度。

3.1 从二维覆盖向结构分层的破碎化认知拓展

现有森林破碎化研究主要关注土地利用变化驱动下的森林面积减少及其水平空间格局变化^[3,34]。然而, 本研究的分析结果表明, 即使在总体高覆盖连续的区域, 不同冠层高度层级的森林在空间格局上仍可能表现出显著差异。随着冠层高度分层由5 m提高至30 m, NP增加, MPA显著下降(约98.6%), ED在15~20 m高度区间出现明显变化, 这反映出高冠层森林在空间分布特征上相较于低冠层结构更为零散。

这些结果表明, 森林结构的完整性并不必然与其二维平面上的连续性保持一致。在生物多样性维持的角度看, 热带森林中大量依赖高冠层活动的物种(如海南长臂猿、部分树栖鸟类和附生植物群落)通常需要相对连续的冠层结构以支持其觅食、繁殖和扩散等基本生命活动^[36-38]。当高冠层森林在景观尺度上呈现出高度离散的斑块化分布时, 潜在的个体迁移通路可能受到限制, 基因交流频率下降, 种群规模和遗传多样性随之减少, 同时伴随夜宿和猿食植物的减少, 最终可能导致小种群陷入长期衰退风险^[3]。

在生态系统功能方面, 高冠层森林通常承载这热带森林中较高比例的生物量与碳储量, 其空间结构完整性被认为是与碳汇稳定性密切相关。已有研究表明, 森林破碎化程度的提高往往伴随着林缘比例的增加, 使更多树木暴露于高温、低湿、风扰增强等环境压力条件下, 从而可能提高死亡率风险并影响碳储量的长期维持^[8,39]。此外, 冠层结构的断裂还可能改变林下光照与水分环境, 进而影响幼树进入上层冠层的更新过程, 对大径级林木的持续补充产生约束^[40]。在长期尺度上, 这些结构变化可能削弱成熟林作为稳定碳库的功能潜力^[41]。结合本研究结果, 海南热带雨林国家公园中部分高冠层森林已呈现明显的结构破碎化格局特征。这一现象提示, 即使在区域森林覆盖率总体保持较高的条件下, 关键结构要素的空间断裂仍可能对生物多样性维持和生态系统功能稳定性构成潜在风险。这类结构变化具有一定的隐蔽性, 难以通过传统基

于森林覆盖的指标直接识别, 有必要在森林保护评估中予以关注。

3.2 管理启示: 从单一面积保护向结构完整性与生态连通性维护的转变

随着《国家公园法》的实施, 我国国家公园建设进入以生态系统原真性与完整性为核心目标的制度化阶段^[42]。本研究结果表明, 在国家公园尺度内, 即便森林覆盖整体保持连续, 高冠层森林的空间结构仍可能呈现出显著差异。仅以森林面积或覆盖范围作为核心指标的传统保护评估框架, 难以全面反映关键结构要素在空间组织层面的状态。因此, 在现有国家公园管理与评估体系中, 有必要引入以森林结构完整性与空间连通性为补充的管理视角, 以更全面地识别连续森林覆盖背景下潜在的结构性约束。基于上述认识, 提出以下管理启示:

(1) 引入结构完整性视角的长期监测。在现有生态系统完整性评估与监测框架中, 逐步引入反映森林垂直结构与空间连通性的指标, 如林冠高度连续性、高冠层森林比例及其空间连通性特征等^[43]。这有助于将保护管理重点从“森林面积是否减少”拓展至“关键结构是否发生空间分散”, 从而更及时地识别隐性的森林空间结构变化及其潜在风险。

(2) 对高破碎化区域探索结构导向的恢复策略。对高冠层结构呈现高度离散特征的区域, 可在充分评估生态敏感性和实施可行性的基础上, 探索以增强结构连通性为目标的恢复途径, 如优化生态廊道布局、促进冠层结构连续性的自然更新过程, 必要时辅以必要的人工干预^[44]。这类措施强调结构功能的恢复, 而非单纯追求森林面积扩张。

(3) 加强高结构完整区域的预防性保护。对高冠层结构完整性较高、空间连通性良好的区域, 应优先维持其现有结构状态, 通过合理管控道路建设、林下资源利用和旅游活动等人为干扰, 降低边缘扩展效应诱发结构退化的风险, 保障其作为区域生态功能核心的长期稳定性。

3.3 研究局限与展望

本研究仍存在一定局限性。首先, 本研究基于单时相林冠高度数据开展森林结构分层与空间格局分析, 重点在于通过引入冠层高度信息, 检验传统景观破碎

化指标在不同结构层级上的响应差异, 因此难以刻画森林空间结构随时间变化的动态过程。未来可结合多时相林冠高度或激光雷达观测数据, 构建森林垂直结构的时序变化过程, 以系统分析结构分散特征的演变过程及其潜在驱动机制。其次, 本文采用的NP, MPA和ED等指标, 主要用于保持与传统基于森林覆盖的破碎化评估方法在指标体系和空间尺度上的可比性, 从而突出冠层高度分层所带来的信息增量。然而, 这类指标仍以二维空间格局为基础, 对森林三维结构复杂性的刻画存在一定局限。未来研究可进一步结合激光雷达点云数据, 引入基于点云聚类的结构分析方法, 利用聚类有效性指数和聚类特征描述指标, 从三维角度深化对森林结构破碎化特征的定量表征。同时需要指出的是, 景观格局指标对分析单元尺度具有一定的敏感性, 不同空间尺度下森林结构格局的表征结果可能存在差异。本文采用1 km×1 km网格用于区域尺度的结构诊断, 其结果不宜直接外推至更细或更粗的空间尺度, 相关尺度效应有待在未来多尺度分析中进一步检验。此外, 本文对森林结构破碎化潜在生态影响的讨论主要基于结构特征推断和已有研究证据, 仍需通过长期物种监测、生境利用数据与群落结构调查加以验证。建议后续研究可将空间结构破碎化指标与物种分布模型、生物量变化估算和碳通量观测数据整合, 定量评估空间结构变化对生物多样性维持和生态系统功能稳定性的影响。

4 结论

本研究构建了一个基于林冠高度分层的森林结构-格局耦合分析框架, 并以海南热带雨林国家公园为案例。对连续森林覆盖背景下的高冠层森林空间结构特征进行了深入分析。结果表明, 尽管研究区整体森林覆盖保持较高水平, 高冠层森林仍普遍呈现出显著的斑块化和连通性削弱特征, 约三分之一的高冠层森林分布于空间破碎化程度较高的景观单元内。这一发现揭示了传统基于二维森林覆盖的破碎化评估方法在识别高冠层结构空间异质性方面的局限性。进一步分析表明, 森林空间结构完整性不仅与森林覆盖面积的水平维度相关, 还与森林垂直结构层级的空间连续性密切相关。高冠层森林在空间上的稀疏分布和连通性降低, 可能预示对森林生物多样性维持和碳汇稳定性等方面产生潜在的影响, 尤其对依赖高冠层栖息环境的物种生境连通性更具有重要的指示意义。上述研究结果强调, 在热带森林保护及国家公园保护管理实践中, 有必要在关注森林覆盖格局的基础上, 引入冠层结构维度, 对森林空间结构组织特征开展更加系统综合的分析评估。本研究提出的森林冠层结构-空间格局分层分析框架, 为在整体森林覆盖连续条件下精准识别高冠层森林结构空间差异、开展多维森林结构监测与生物多样性保护优先区筛选提供了一种可操作的分析方法和科学参考。

参考文献

- 1 Mitchard E T A. The tropical forest carbon cycle and climate change. *Nature*, 2018, 559: 527–534
- 2 de Conto T, Armston J, Dubayah R. Characterizing the structural complexity of the Earth's forests with spaceborne lidar. *Nat Commun*, 2024, 15: 8116
- 3 Haddad N M, Brudvig L A, Clobert J, et al. Habitat fragmentation and its lasting impact on Earth's ecosystems. *Sci Adv*, 2015, 1: e1500052
- 4 Taubert F, Fischer R, Groeneveld J, et al. Global patterns of tropical forest fragmentation. *Nature*, 2018, 554: 519–522
- 5 Zou Y, Crowther T W, Smith G R, et al. Fragmentation increased in over half of global forests from 2000 to 2020. *Science*, 2025, 389: 1151–1156
- 6 Holcomb A, Burns P, Keshav S, et al. Repeat GEDI footprints measure the effects of tropical forest disturbances. *Remote Sens Environ*, 2024, 308: 114174
- 7 Fischer R, Taubert F, Müller M S, et al. Accelerated forest fragmentation leads to critical increase in tropical forest edge area. *Sci Adv*, 2021, 7: eabg7012
- 8 Laurance W F, Delamônica P, Laurance S G, et al. Rainforest fragmentation kills big trees. *Nature*, 2000, 404: 836
- 9 Brinck K, Fischer R, Groeneveld J, et al. High resolution analysis of tropical forest fragmentation and its impact on the global carbon cycle. *Nat Commun*, 2017, 8: 14855
- 10 Su Y, Zhang C, Cescatti A, et al. Pervasive but biome-dependent relationship between fragmentation and resilience in forests. *Nat Ecol Evol*,

- 2025, 9: 1670–1684
- 11 Gregory T, Carrasco-Rueda F, Alonso A, et al. Natural canopy bridges effectively mitigate tropical forest fragmentation for arboreal mammals. *Sci Rep*, 2017, 7: 3892
 - 12 Chan B P L, Lo Y F P, Hong X J, et al. First use of artificial canopy bridge by the world's most critically endangered primate the Hainan gibbon *Nomascus hainanus*. *Sci Rep*, 2020, 10: 15176
 - 13 Lefsky M A, Cohen W B, Parker G G, et al. Lidar remote sensing for ecosystem studies: lidar, an emerging remote sensing technology that directly measures the three-dimensional distribution of plant canopies, can accurately estimate vegetation structural attributes and should be of particular interest to forest, landscape, and global ecologists. *BioScience*, 2002, 52: 19–30
 - 14 Dubayah R, Blair J B, Goetz S, et al. The Global Ecosystem Dynamics Investigation: high-resolution laser ranging of the Earth's forests and topography. *Sci Remote Sens*, 2020, 1: 100002
 - 15 Simard M, Pinto N, Fisher J B, et al. Mapping forest canopy height globally with spaceborne lidar. *J Geophys Res*, 2011, 116: G04021
 - 16 Duncanson L, Kellner J R, Armston J, et al. Aboveground biomass density models for NASA's Global Ecosystem Dynamics Investigation (GEDI) lidar mission. *Remote Sens Environ*, 2022, 270: 112845
 - 17 Laurance W F, Camargo J L C, Luizão R C C, et al. The fate of Amazonian forest fragments: a 32-year investigation. *Biol Conserv*, 2011, 144: 56–67
 - 18 Yao X, Zhou L, Wu T, et al. Ecosystem services in National Park of Hainan Tropical Rainforest of China: spatiotemporal dynamics and conservation implications. *J Nat Conserv*, 2024, 80: 126649
 - 19 Yao J, Ding Y, Huang J H, et al. Species composition and community characteristics of a 6-hm² forest dynamics plot in tropical mountain rainforest, Bawangling, Hainan Island, South China (in Chinese). *Terr Ecosyst Conserv*, 2023, 3: 1–12 [姚杰, 丁易, 黄继红, 等. 海南霸王岭热带山地雨林6 hm²森林动态监测样地物种组成与群落特征. *陆地生态系统与保护学报*, 2023, 3: 1–12]
 - 20 Li Y D. Biodiversity of tropical forest and its protection strategies in Hainan Island, China (in Chinese). *For Res*, 1995, 8: 455–461 [李意德. 海南岛热带森林的变迁及生物多样性的保护对策. *林业科学研究*, 1995, 8: 455–461]
 - 21 Liu Q, Zhou Z, Chen D X, et al. Carbon storage and its change characteristics of forest ecosystems in National Park of Hainan Tropical Rainforest, China (in Chinese). *Nat Prot Areas*, 2023, 3: 1–10 [刘强, 周璋, 陈德祥, 等. 海南热带雨林国家公园森林生态系统碳储量及变化特征. *热带地理*, 2023, 3: 1–10]
 - 22 Zhu C Y, Zhong X K, Wang Y X, et al. Conservation on the Hainan Tropical Rainforest National Park flagship species Hainan black-crested gibbon (*Nomascus hainanus*) in the history and the future (in Chinese). *Natl Park*, 2023, 1: 213–222 [祝常悦, 钟旭凯, 王昱心, 等. 海南热带雨林国家公园旗舰种海南长臂猿保护的历史与未来. *国家公园*, 2023, 1: 213–222]
 - 23 Fellowes J R, Chan B, Zhou J, et al. Current status of the Hainan gibbon (*Nomascus hainanus*): progress of population monitoring and other priority actions. *Asian Primates J*, 2008, 1: 2–11
 - 24 Wang S D, Ouyang Z Y, Zhang C P, et al. The dynamics of spatial and temporal changes to forested land and key factors driving change on Hainan Island (in Chinese). *Acta Ecol Sin*, 2012, 32: 7364–7374 [王树东, 欧阳志云, 张翠萍, 等. 海南岛主要森林类型时空动态及关键驱动因子. *生态学报*, 2012, 32: 7364–7374]
 - 25 Meng J, Lu Y, Lei X, et al. Structure and floristics of tropical forests and their implications for restoration of degraded forests of China's Hainan Island. *Trop Ecol*, 2011, 52: 177–191
 - 26 Yang X B, Chen Z Z, Li D H. Classification and distribution of vegetation in Hainan, China (in Chinese). *Sci Sin Vitae*, 2021, 51: 321–333 [杨小波, 陈宗铸, 李东海. 海南植被分类体系与植被分布图. *中国科学: 生命科学*, 2021, 51: 385–394]
 - 27 Lang N, Jetz W, Schindler K, et al. A high-resolution canopy height model of the Earth. *Nat Ecol Evol*, 2023, 7: 1778–1789
 - 28 Zhang M, Liu S, Luo X, et al. Incorporating site suitability and carbon sequestration of tree species into China's climate-adaptive forestation. *Sci Bull*, 2025, 70: 1834–1845
 - 29 Zhang M, Huang H, Li Z, et al. Automatic high-resolution land cover production in madagascar using Sentinel-2 time series, tile-based image classification and Google Earth Engine. *Remote Sens*, 2020, 12: 3663
 - 30 Hansen M C, Wang L, Song X P, et al. The fate of tropical forest fragments. *Sci Adv*, 2020, 6: eaax8574
 - 31 McGarigal K. Landscape pattern metrics. In: El-Shaarawi A H, Piegorsch W W, eds. *Encyclopedia of Environmetrics*. Chichester: John Wiley & Sons, 2006. 1135–1142
 - 32 Fahrig L. Effects of habitat fragmentation on biodiversity. *Annu Rev Ecol Evol Syst*, 2003, 34: 487–515

- 33 Nunes M H, Vaz M C, Camargo J L C, et al. Edge effects on tree architecture exacerbate biomass loss of fragmented Amazonian forests. *Nat Commun*, 2023, 14: 8129
- 34 Fahrig L. Ecological responses to habitat fragmentation per se. *Annu Rev Ecol Evol Syst*, 2017, 48: 1–23
- 35 Betts M G, Fahrig L, Hadley A S, et al. A species-centered approach for uncovering generalities in organism responses to habitat loss and fragmentation. *Ecography*, 2014, 37: 517–527
- 36 Betts M G, Wolf C, Pfeifer M, et al. Extinction filters mediate the global effects of habitat fragmentation on animals. *Science*, 2019, 366: 1236–1239
- 37 Arroyo-Rodríguez V, Fahrig L, Tabarelli M, et al. Designing optimal human-modified landscapes for forest biodiversity conservation. *Ecol Lett*, 2020, 23: 1404–1420
- 38 Li X Y, Wu J P, Zhang C Q, et al. Review of the impact of forest ecosystem structure on avian species diversity (in Chinese). *Acta Ecol Sin*, 2025, 45: 1519–1538 [李雪艳, 吴建平, 张超群, 等. 森林结构对鸟类物种多样性的影响研究进展. *生态学报*, 2025, 45: 1519–1538]
- 39 Huang M, Asner G P. Long-term carbon loss and recovery following selective logging in Amazon forests. *Glob Biogeochem Cycle*, 2010, 24: GB3027
- 40 Slik J W F, Aiba S I, Brearley F Q, et al. Environmental correlates of tree biomass, basal area, wood specific gravity and stem density gradients in Borneo's tropical forests. *Glob Ecol Biogeogr*, 2010, 19: 50–60
- 41 Magnago L F S, Edwards D P, Edwards F A, et al. Functional attributes change but functional richness is unchanged after fragmentation of Brazilian Atlantic forests. *J Ecol*, 2014, 102: 475–485
- 42 Song M. Building a beautiful homeland for all life: academician Liu Shirong on the role and challenges of national parks in biodiversity conservation (in Chinese). *China Natural Resources News*, 2024-01-01. Available at: <https://www.iziran.net/news.html?aid=5450615> (accessed: 2025-01-10) [宋梅. 打造呵护万物的美丽家园——中国工程院院士刘世荣谈国家公园在生物多样性保护中的作用与挑战. *中国自然资源报*, 2024-01-01. <https://www.iziran.net/news.html?aid=5450615> (访问日期: 2025-01-10)]
- 43 Chen J, Li Y P, Xu H, et al. Exploration of the ecological monitoring and management evaluation indicator system for Hainan Tropical Rainforest National Park (in Chinese). *Terr Ecosyst Conserv*, 2022, 2: 106–111 [陈洁, 李艳朋, 许涵, 等. 海南热带雨林国家公园生态监测与管理评估指标体系初探. *陆地生态系统与保护学报*, 2022, 2: 106–111]
- 44 Li X, Xu Y, Zhang Z, et al. Integrating range shifts under climate change into the synchronous conservation of a critically endangered gibbon and its habitat trees. *Biol Conserv*, 2026, 313: 111534

Identifying spatial structural fragmentation of tall-canopy tropical forests using canopy-height stratification

ZHANG MeiNan¹, LIU ShiRong^{1*}, DING Yi¹, XU Han², SUN Ge³ & ZHANG MeiWei⁴

¹ Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration on Forest Ecosystem Conservation and Restoration, Ecology and Nature Conservation Institute, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

² Jianfengling National Key Field Research Station for Tropical Forest Ecosystem, Hainan Island, Research Institute of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Guangzhou 510520, China

³ State Key Laboratory of Wetland Conservation and Restoration, Ecology and Nature Conservation Institute, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

⁴ School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006, China

* Corresponding author; E-mail: liusr@caf.ac.cn

Forests can spread spatially in a context of continuous cover, while there are substantial differences in spatial structure across canopy-height levels. Conventional fragmentation analyses based on two-dimensional forest cover are therefore insufficient to capture this spatial structural fragmentation. To address this limitation, we incorporated canopy-height characteristics into a traditional fragmentation framework, and then developed a structure-pattern analytical approach based on canopy-height stratification to characterize spatial pattern differences across canopy-height levels. Using high-resolution (10 m) canopy height data from Hainan Tropical Rainforest National Park, we constructed a nested stratification of forest structure across six canopy height gradient thresholds (5–30 m) and quantified landscape metrics-including patch number, mean patch area, and edge density-within 1 km×1 km grid units. Forest area declined sharply with increasing canopy height gradient, and forests with canopy height ≥30 m accounted for less than 10% of the total forested area. Landscape patterns exhibited a distinct transition within the 15–20 m canopy height gradient interval, characterized by increased patch subdivision, a rapid reduction in patch size, and significantly elevated edge density. Structure-pattern coupling analysis further indicated that approximately 33.7% of forests with canopy height ≥20 m were concentrated in highly fragmented spatial units, suggesting that in the context of continuous forest cover, higher canopy-height spatial structures can exhibit sparse and isolated patterns. These results suggest that integrating canopy-height stratification into conventional two-dimensional fragmentation metrics helps gain a deep insight into the identification of spatial structural fragmentation that is normally overlooked when only using forest cover. The proposed framework provides a quantitative basis for assessing ecosystem integrity and originality in tropical forests. It is particularly useful for identifying conservation priority areas for tall-canopy forests and for developing conservation management strategies through multidimensional forest structural optimization.

tall-canopy forest, canopy-height stratification, structural fragmentation, landscape pattern, tropical forest, Hainan Tropical Rainforest National Park

doi: [10.1360/SSV-2025-0381](https://doi.org/10.1360/SSV-2025-0381)