北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

结构化森林经营核心理论

惠刚盈 胡艳波 赵中华 张弓乔

Core theories of structure-based forest management

Hui Gangying, Hu Yanbo, Zhao Zhonghua, Zhang Gongqiao

引用本文:
惠刚盈, 胡艳波, 赵中华, 张弓乔. 结构化森林经营核心理论[J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(12):1–11. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250095
Hui Gangying, Hu Yanbo, Zhao Zhonghua, Zhang Gongqiao. Core theories of structure–based forest management[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(12):1–11. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250095

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250095

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于4株相邻木关系的林分空间结构多样性测度方法研究

Research on the measurement method of forest spatial structure diversity based on 4 neighborhood tree relationship

北京林业大学学报, 2023, 45(7): 18–26. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220282

兴安落叶松人工林空间结构优化

Spatial structure optimal of *Larix gmelinii* plantation

北京林业大学学报, 2021, 43(4): 68–76. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200228

基于邻近木的林分结构多样性研究

Study on forest structure diversity based on the neighbourhood trees

北京林业大学学报, 2020, 42(6): 52–58. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190120

结合大斑啄木鸟生境适宜性的林分空间结构优化

Stand spatial structure optimization combined with habitat suitability of great spotted woodpecker

北京林业大学学报, 2021, 43(5): 24–32. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200141

亚热带马尾松林阔叶化改造对林分结构的影响

Effects of broadleaved transformation on stand structure of *Pinus massoniana* forest in subtropical area

北京林业大学学报, 2025, 47(1): 11–21. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240292

水曲柳人工林空间结构特征对土壤养分含量的影响

Effects of spatial structure characteristics of *Fraxinus mandshurica* plantation on soil nutrient content

北京林业大学学报, 2023, 45(9): 73–82. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220476

DOI:10.12171/j.1000−1522.20250095

结构化森林经营核心理论

惠刚盈　胡艳波　赵中华　张弓乔
（林木资源高效生产全国重点实验室，国家林业和草原局林木培育重点实验室，中国林业科学研究院林业研究所，北京 100091）

摘要:结构化森林经营遵循结构决定功能的原则，推崇林木分布格局随机性、林分空间结构多样性和森林生态系统服务的多功能性，已成为一种独特的实现森林可持续经营的理论与方法。通过分析结构化森林经营研究进展，总结提炼结构化森林经营理论体系，充分揭示结构化森林经营在林分结构量化和多样性分析、林分稳定性维持机理和生产力形成的结构效应等方面的科学规律，以尽快实现结构化森林经营从“试点示范”到“全域覆盖”的跃迁。本文提出，结构化森林经营核心理论包括：(1)林分空间结构诠释；(2)林分空间结构参数的望远镜法；(3)林分空间结构多样性；(4)随机体−稳定性假说；(5)林木生长的结构−竞争效应；(6)最优林分质量的 π 值法则；(7)有效空间利用的林分初始密度。为大力推广结构化森林经营理论与技术，未来还需特别推进基于空间利用的森林发育阶段划分和结构多样性的作用机理研究。

关键词：结构化森林经营；林分空间结构；林分结构多样性；林分稳定性；林分质量
中图分类号：S750　**文献标志码**：A　**文章编号**：1000−1522(2025)12−0001−11
引文格式：惠刚盈，胡艳波，赵中华，等. 结构化森林经营核心理论［J］. 北京林业大学学报，2025，47(12)：1−11. Hui Gangying, Hu Yanbo, Zhao Zhonghua, et al. Core theories of structure-based forest management［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(12): 1−11.

Core theories of structure-based forest management

Hui Gangying　Hu Yanbo　Zhao Zhonghua　Zhang Gongqiao
(State Key Laboratory of Efficient Production of Forest Resources, Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation of National Forestry and Grassland Administration, Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: Structure-based forest management (SBFM) adheres to the principle of structure determining function, advocating for the randomness of tree distribution patterns, the diversity of stand spatial structures, and the multi-functionality of forest ecosystem services. It has emerged as a distinctive theory and methodology for achieving sustainable forest management. By analyzing the research progress of SBFM, this paper systematically summarizes the theoretical framework of SBFM. It highlights unique insights in interpreting and quantifying forest stand structures, analyzing stand structural diversity, elucidating mechanisms of stand stability maintenance, and revealing structure effects on productivity formation. These efforts aim to accelerate the transition development of SBFM from “pilot demonstration” to “full-scale implementation”. This paper proposes seven core theories of SBFM: (1) interpretation of stand spatial structure; (2) telescope method for stand spatial structure parameters; (3) stand spatial structure diversity; (4) random body-stability hypothesis; (5) structure-competition effects of tree growth; (6) π-value rule for optimal stand quality; (7) initial stand density for effective space utilization. To enhance the widespread application of structure-based forest management theories and techniques, it would be highly beneficial to

收稿日期: 2025−03−17　**修回日期:** 2025−05−12
基金项目: 国家重点研发计划课题(2023YFD220040301)。
第一作者: 惠刚盈，研究员，博士生导师。主要研究方向：森林经营理论与技术、森林结构。Email: hui@caf.ac.cn　地址：100091 北京市海淀区香山路东小府 1 号中国林业科学研究院林业研究所。
责任作者: 胡艳波，副研究员。主要研究方向：森林经营理论与技术、森林结构。Email: hyanbo@caf.ac.cn　地址：同上。
本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn; http://journal.bjfu.edu.cn

advance research on the classification of forest developmental stages based on spatial utilization and the underlying mechanisms of structural diversity.

Key words: structure-based forest management; stand spatial structure; stand structural diversity; stand stability; stand quality

传统的森林经营方式在满足人类需求的同时，也带来了过度砍伐、生态失衡等一系列问题，使森林的可持续发展面临严峻挑战。在重视和追求森林多功能优化利用与生态优先的今天，越来越多的人期望通过调整森林结构来增加生物多样性和培育健康稳定的森林，进而增强森林服务功能。目前，全球面临着如何增加森林面积、提高森林质量、保持生物多样性、维护生态系统功能等重大挑战。为了让森林重焕生机，结构化森林经营这一科学、可持续的森林经营方法应运而生[1−3]。

众所周知，森林质量提升的有效途径是林分结构调控[4−5]和针对单木的集约经营[6−7]。近自然森林经营和结构化森林经营都是针对单木的集约经营，而基于单木的森林经营逐渐成为国内外森林经营研究的热点[6,8]，且大量研究聚焦结构多样性和林分稳定性。结构多样性（即植物器官大小和形态的变化）是一种新兴的多样性指标[9−10]。Larue 等[4]提出了基于直径与树高等级数量（文中称为林分结构多样性）的指标，认为这样的结构多样性是森林生产力的一个强有力的预测指标，且始终优于传统的物种多样性。实际上，该方法并没有考虑森林空间结构，而是采用了与生产力极度相关的林木大小（直径和树高）指标。Dong 等[11]基于林分空间结构参数的四元分布，提出了用 Shannon-Wiener 指数表征的林分空间结构指数（H 或 H'），这是 N 元分布的综合量化表达，实际上，这个方法是林分水平结构多样性的部分表达，没有涉及到林分垂直结构。森林群落稳定性维持机制一直是森林生态学研究的热点与核心问题。Macarthur[12]提出了著名的多样性−稳定性假说，认为群落的多样性和食物网的复杂性会促进生态系统的稳定性，群落的多样性为其稳定性提供了一个强有力的保障。在一个群落中，物种越多，它抵抗外界干扰的能力就越强，恢复能力也越强。Janzen[13]和 Connell[14]认为，宿主专一性天敌在森林中具有随距宿主距离增加而降低的不均匀分布特点，即著名的 Janzen-Connell 假说。新近，Pommerening 等[15]以及 Wang 等[16]指出：大树个体周围常具有更高的混交度，并称之为混交度−大小假说[17]。上述假说的某些方面在试验中得到了证实，许多生态过程在很大程度上仍然是未知，但已暗示了在稳定性研究中值得关注的几个方面：同种负密度制约、异群保护、生态位互补性以及物种多样性与冗余效应。共同点为都关注了群落的物种组成，忽视了群落稳定性维持的结构机理等。

本文目的就在于聚焦结构化森林经营的生态学原理，重点阐述结构化森林经营中的林分空间结构及其量化、林分空间结构多样性测度、林分稳定性维持机制和林木生长的结构效应以及林分质量综合评价方法等核心理论内容，深度挖掘科学经营森林的生态学基础，旨在为大力推广先进的森林经营理论与技术提供科学依据。

1 结构化森林经营概述

结构化森林经营是 21 世纪起源于我国的一种现代森林可持续经营理论与技术，强调依据森林发生发展的自然规律进行天然次生林经营和人工林培育，是一种道法自然的森林经营，而非“近自然森林经营”[18]。它推崇林木分布格局随机性、林分空间结构多样性和森林生态系统服务多功能性，认为唯有健康的森林才能更好地发挥多功能性，而健康森林必有其合理的森林结构。形成和维持良好的空间结构是森林经营的关键，调整林分空间结构才是经营之道，但这以科学认识林分合理结构为前提。结构化森林经营的基本原则是“结构决定功能”，核心目标是培育健康稳定的森林生态系统，提升生态系统的稳定性和多功能性，关键技术是围绕最佳森林空间结构来构造更多的目的树种随机体，通过调整林木分布、树种组成和竞争关系，增强森林的多功能效益（如碳汇增强、生物多样性保护）。

这样的结构化森林经营契合现代森林经营理念，将传统的基于经验的“误打误撞黑箱法”变为“结构透明的机理控制”；以健康、稳定、高效的森林结构的普遍规律为范式，使经营有章可循。基于最近 4 株相邻木空间关系，依托可解释性强的 5 株树结构单元，既可构造用于描述林分结构的参数，又能评价林分经营迫切性，还能量身定制森林经营方案，指导调整林分结构。以经营前后林分状态的变化实时评价经营效果，变传统滞后的“功能评价”为事前林分状态评价，避免了经营风险。结构化森林经营能够指导经营者制定有针对性的经营措施，提高森林质量和生产力。例如，有经营林分每公顷年生长量比对照高出 1.0 ~ 1.4 m^3，年生长率高出 20% ~ 60%，决定当下林分生产力的中大径木的株数增幅是对照的

6.0 倍，决定未来林分生产潜力的进界木株数是对照的 3.8 倍，树种空间多样性增幅高达 20%，生态经济效益非常显著[7,19]。从长远角度看，大面积推广应用结构化森林经营技术可解决森林资源保护与利用之间的矛盾，对建设生态文明具有重要战略意义。结构化森林经营已成为国家自然科学基金项目申请指南中森林可持续经营的关键词，并入选《中国大百科》和《中国林业百科全书》，极大地推动了森林经理学、森林培育学和森林生态学等学科的发展，丰富和发展了森林可持续经营理论，对提升我国林学的世界地位产生了重要影响。

2　结构化森林经营理论体系

结构化森林经营理论始于对森林结构的全新定义，涉及林木分布格局、混交程度和大小分化及林分拥挤度等概念，特别是结构量化方法既有归纳与演绎的理论，也有科学推理之论断，分为基础理论与应用基础理论(图 1)。基础理论是结构化森林经营的基石，主要包括森林结构的诠释和量化：森林结构可分为空间结构和非空间结构，依托参照树与其最近 4 株相邻木组成的空间结构单元，构筑角尺度、混交度和大小比数以及密集度等 4 个林分空间结构参数，从不同角度同步解译林分空间结构。应用基础理论是结构化森林经营的主体架构，由两个部分组成：其一，结构化森林经营的生态认知体系，即聚焦结构与竞争、结构与稳定性、结构与生产力、结构多样性与林分质量，用数式表达了结构决定竞争，揭示随机木构成了天然林的主体，演绎出更为普适的随机体−稳定性假说；其二，森林质量提升的理论基础，即基于结构单元与结构参数多元分布的林分空间结构多样性，基于空间与非空间结构变量的最优林分状态的 π 值法则，以及基于林木生长空间需求的空间利用最优造林密度。

2.1　林分空间结构诠释

森林生态系统涉及系统组成(组分集合)和系统结构(空间组织形式)两部分。以往研究中常用的密度、物种多样性以及林木的各种统计分布(如年龄分布、直径分布、树高分布、树冠分布)等因子，本质上是对系统组分数量特征或属性特征的统计学描述。这些参数属于传统意义上的非空间结构变量，与林木空间位置无关，被视为森林的非空间结构，无法揭示组分间的空间关联性，且无法解释系统功能形成的空间机制。

决定系统功能的是结构，结构是驱动生态过程的核心，与林木空间位置有关，反映的是林木个体在森林生态系统三维空间的拓扑关系。其中，林木分布格局(随机、聚集、均匀)影响资源利用，树种混交程度(纯林、轻度、中度、强度混交)影响林分的病虫害抗性与种内竞争，林木大小分化(受压、均衡、占优)和林冠拥挤程度(稀疏、中等、拥挤)影响林木竞争，这些空间关联性正是系统自组织能力的基础。所以，森林结构被定义为林木个体分布格局及属性(种类、大小和密集程度)在空间上的排列方式。

对于任何系统而言，其组成和结构都非常重要，缺一不可，同时两者又有本质区别：前者如同建筑材料，后者则似建筑设计。换言之，系统组成并非系统结构，只有系统结构才能把系统组成有效组织起来。对系统组成规律的描述只是“锦上添花”，而真正能

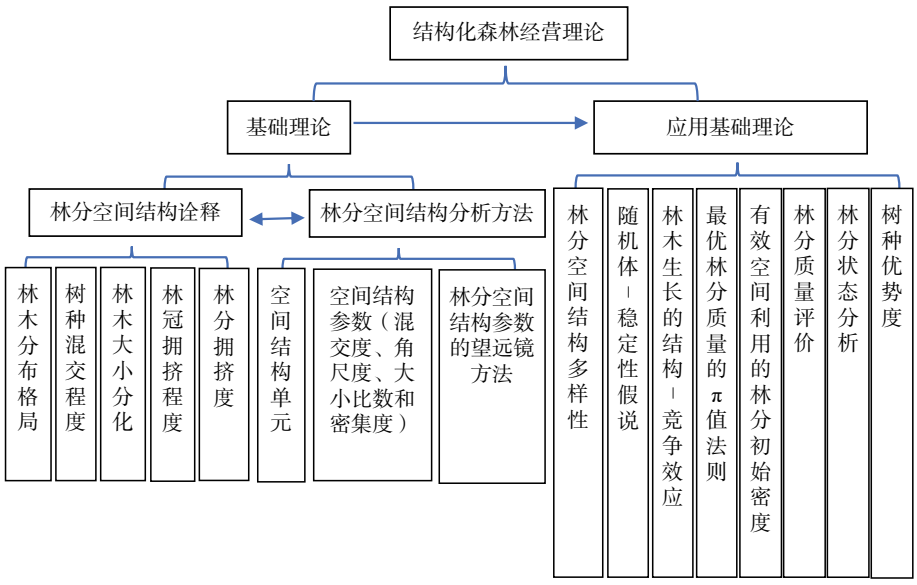


图 1　结构化森林经营理论框架

Fig. 1　Theoretical framework of structure-based forest management

“雪中送炭”、能使系统功能充分发挥的关键还是系统结构，即空间结构[7]。在森林经营中，建立“空间结构−系统功能”双指标体系，将角尺度、混交度、大小比数和密集度等空间参数作为调控空间结构的关键靶点，这既是现代生态学理论的要求，又是实现森林可持续经营的必由之路。

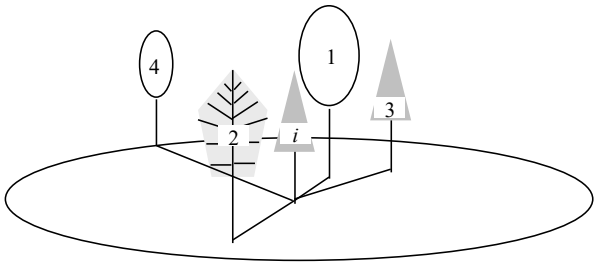
2.2 林分空间结构参数的望远镜方法

针对传统方法在空间结构表征方面的不足（如无法精准量化林木空间结构−系统功能“混交程度”“拥挤程度”“大小分化程度”和“分布格局”等核心特征），提出基于最近相邻木关系的林分空间结构分析方法[20]，实现了三大突破。（1）调查统计单元革新：以参照树及其 4 株最近邻木构成的空间结构单元为统计基础（图 2），关注林木所处微环境及相邻木的空间关系，突破了传统单木统计的局限。该设计源于几何学原理——4 株相邻木可稳定形成空间拓扑关系，既能满足夹角分析需求（≥2 株），又可覆盖相邻木生态影响。（2）参数体系革新：基于林分空间结构单元，系统构筑 4 维参数体系，每个参数设 0 ~ 1 的 5 级梯度[21]。参数包括描述树种隔离程度的混交度（M_i）、体现林木分布均匀程度的角尺度（W_i）、反映林木优势程度的大小比数（U_i）以及表达林木拥挤程度的密集度（C_i）。这 4 个结构参数可精准描述单木的自然状态和其在群落内的生态位，确切回答了周围的相邻木有几个比其大或小、如何分布在周围、有多少与其同种、是否受到挤压的问题。4 个结构参数均有 5 种可能的取值，分别为 0.00、0.25、0.50、0.75、1.00，对应不同的林分状态，生物学意义直观明了。林分空间结构参数则基于最近相邻木关系，统一由空间结构单元出发，同步完成森林结构从树种、大小、格局和竞争等多方面的分析，有助于了解林分结构的细微之处，对森林多样性和特殊物种竞争环境的探索有潜在的应用意义，同时也使经营对象选择精准化和简易化，可直接指导森林经营。（3）多层次解析系统：创新性提出“望远镜法”分析框架[18,22]，采用结构参数的均值和多元分布（一元分布到四元分布（图 3）），从不同层次和角度描述林分空间结构特征，注重研究空间结构多样性，全方位、详细精准分析林分空间结构信息。“望远镜法”可系统解译不同分辨率水平下林分空间结构异质性信息。也就是说，林分整体的空间结构状况可通过零元分布，即结构参数平均值（$\bar{X}$）来描述[23]；每个空间结构参数 5 个取值的相对频率可称为结构参数的一元分布，用来反映林分单方面的结构特征；二元、三元和四元分布则组合了 2 ~ 4 个不同空间结构参数，从而形成 25、125 和 625 种空间结构组合，这些结构参数组合的联合概率分布可同时体现林分多个方面的空间结构特征。因此，这些结构参数组合中所包含的状态信息可通过不同解译程度水平详细量化，即林分整体、单方面和多方面的空间结构特征可通过结构参数均值（零元分布）、一元分布、二元分布、三元分布和四元分布系统描述，对应林分空间结构“点—线—面—体—超体”的精准解译，此即为具有不同分辨率水平的林分空间结构解译的“望远镜法”[24]。这种表述类同森林模型研究中的林分模型、直径分布模型和单木模型，像使用一台可扩大到显示各个详尽水平的望远镜。所以，在林分空间结构研究中，将角尺度、混交度、大小比数和密集度的灵活组合所形成的多元分布比喻成一台具有不同分辨率水平的望远镜，满足了多尺度林分空间结构的系统解译。

基于相邻木关系的林分空间结构分析方法与标记二阶特征 O-ring 函数一起被称为国际上分析森林空间结构的两大主流分析方法[24−25]。前者的优势在于：（1）兼容非空间参数（如胸径分布）；（2）支持遥感技术整合；（3）为结构化经营提供量化择伐依据（如优先采伐 $C_i > 0.75$ 的受压个体）。

2.3 林分空间结构多样性

林分空间结构由水平结构和垂直结构两大维度



1 ~ 4 分别为参照树 i 的第一至第四邻体。

图 2 林分空间结构单元

Fig. 2 Spatial structure unit of stand

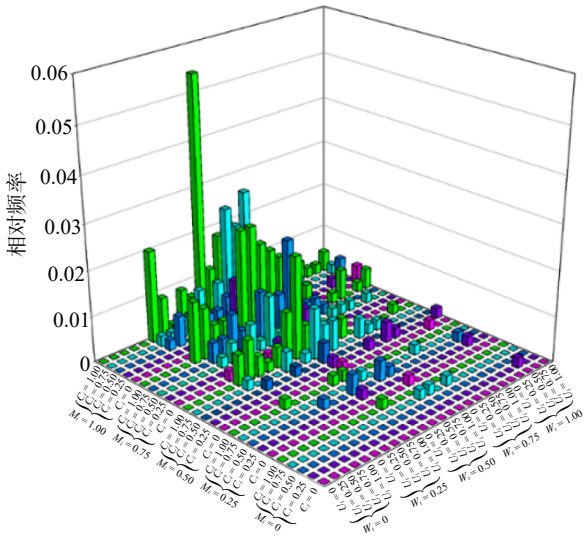


图 3 结构参数四元分布

Fig. 3 Quadrivariate distribution of structural parameters

构成。水平空间结构指在二维平面坐标系中，林木个体的空间配置及其属性关联方式，主要体现为树种隔离程度、竞争关系和分布格局；垂直空间结构则是在三维空间坐标系中，表征不同林层高度分布的层次关系及空间利用效率。

从生态学视角来看，森林结构多样性可借鉴生物多样性概念进行解析。生物多样性强调物种丰富度与均匀度[26]，生物种类越丰富，多样性就越大；物种分布越均匀，各物种由于竞争而消失的可能性越小，系统稳定性越高。同理，森林结构多样性可通过结构类型数量及其频率分布特征来表达。当 4 个林分空间结构参数的四元组合类型越丰富，且各类别频率分布越趋近均衡时，其结构多样性指数越高，生态系统稳定性随之增强。值得注意的是，这 4 个结构参数构成的四元分布理论最大组合达 625 种，为不同起源、不同树种组成和不同立地条件的林分提供了普适性评价框架。因此，通过分析林分结构参数四元分布中，不同结构参数组合类型个数的多少及其所占频率，结合结构单元中的树种数和林层数，就可以进行森林结构多样性综合评价。考虑到不同起源、不同树种组成、不同立地条件等林分结构的差异性和特殊性，为实现科学量化评价，采用对数变换法对结构类型数据进行处理，压缩结构类型数据的绝对尺度，降低数值波动对分析结果的干扰，增强低频结构类型的敏感性，同时保持数据间的相对大小关系。该方法创新性地利用 1 的对数等于 0 的数学特性，有效解决了天然林与人工林在结构复杂性上的量纲差异问题。这种多维结构分析方法突破了传统单一参数独立研究的局限，实现了对林分空间结构整体属性的系统解析，为森林质量精准提升提供了理论支撑。

基于以上研究，构造如下林分空间结构多样性指数（DFS）[27]。

$$\mathrm{DFS}=\frac{1}{2}\left(\mathrm{DFS_h}+\mathrm{DFS_v}\right) \tag{1}$$

式中：$\mathrm{DFS_h}$ 表示林分水平结构多样性；$\mathrm{DFS_v}$ 表示林分垂直结构多样性。

$$\mathrm{DFS_h}=\frac{1}{2}\left\{\frac{1}{2}\left[\left(1-\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{N_s}\left|x_i-y_i\right|\right)+\frac{\ln N_s}{\ln 625}\right]+\frac{\ln \bar{s}}{\ln 5}\right\} \tag{2}$$

式中：N_s 表示结构单元类型数；x_i 表示结构单元类型 i 的相对频率；y_i 表示各结构单元类型均匀分布时类型 i 的相对频率，即 $1/N_s$；$\bar{s}$ 表示结构单元的平均树种数。

$\mathrm{DFS_h}$ 由 3 部分组成：$1-\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{N_s}\left|x_i-y_i\right|$ 表示林分中结构单元类型分布的均匀性（NSE），$\frac{\ln N_s}{\ln 625}$ 表示结构单元类型的丰富度（NSR）；$\frac{\ln \bar{s}}{\ln 5}$ 表达的是结构单元中的树种丰富度。显然，这 3 个值越大，则水平结构多样性就越大，其值在 0 ~ 1 之间。

$$\mathrm{DFS_v}=\frac{\ln \bar{N}_c}{\ln 3} \tag{3}$$

式中：$\bar{N}_c$ 表示结构单元平均林层数。

$\mathrm{DFS_v}$ 值越大，林分空间结构多样性越高，结构异质性越大，其值在 0 ~ 1 之间；$\mathrm{DFS_v}$ 接近 0，表示空间结构多样性极差，接近 1 表示空间结构多样性极高。据此，将空间结构多样性指数 $\mathrm{DFS_v}$ 划分为（0，0.2]、（0.2，0.4]、（0.4，0.6]、（0.6，0.8]、（0.8，1.0] 5 个区间，分别代表空间结构多样性极差、较差、中等、良好与极好。

2.4　随机体–稳定性假说

基于林分空间结构参数中的角尺度分析原理，林木水平空间分布格局可划分为 3 种典型类型（图 4）。由任意 1 株参照树与其 4 株最近相邻木构成的空间单元可定义为结构体（即结构单元）。其中，当角尺度指数 $W_i=0$ 或 0.25 时，表明该参照树的相邻木形成均匀分布格局，此类参照树简称为均匀木，其构成的结构单元称为均匀体；当 $W_i=0.75$ 或 1 时，表明该参照树的相邻木呈聚集分布，对应的参照树为聚集木，形成的结构单元为聚集体；当 $W_i=0.5$ 时，该参照树的相邻木形成随机分布，相应参照树为随机木，其结构单元为随机体[28]。由此可知，任何林分的空间结构均可解构为均匀体、聚集体和随机体 3 类基本单元的有机组合[7]。

这种分类体系具有重要生态学意义：均匀体反映资源均衡分配状态，聚集体指示微生境异质性区域，随机体则表征自然干扰或生态位的随机作用。通过量化 3 类结构体的比例构成，可精确解析林分空间异质性特征，为森林经营中结构调整提供科学依据。值得注意的是，该分类系统通过离散化处理，将连续分布的角尺度参数转化为可操作的结构类型指标，极大提升了森林空间结构分析的实践应用价值。

基于角尺度分布的天然林格局研究发现，处于随机分布（$W_i=0.5$）的林木（随机木）数量（株数或断面积）最多，占 50% 以上[28–30]。惠刚盈[7]通过多维分布特征比对（包括树种多度分布、径级分布、空间格局分布、混交度分布、密集度分布及竞争分布）发现，天然林整体系统与随机木群落特征呈显著同构性，证实随机木是维系天然林生态系统功能的核心要素，承担着群落稳定性的主体功能。因此，本研究认为随机木是天然林的核心。

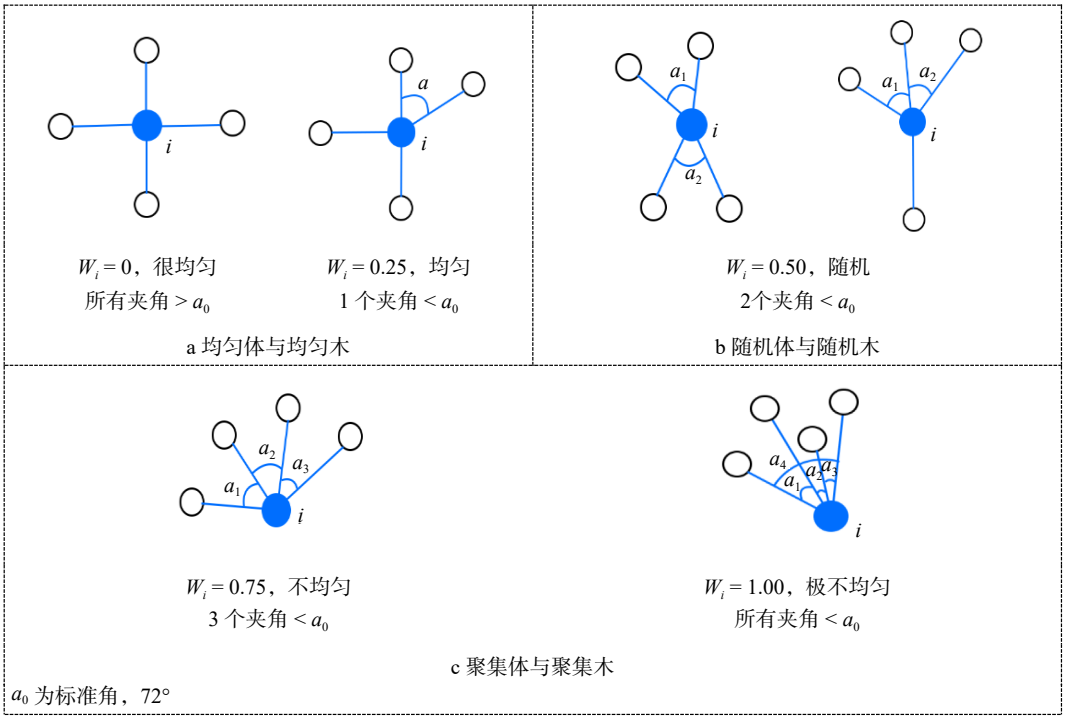


图 4 基于角尺度的林木分类

Fig. 4 Classification of trees based on uniform angle index

对于聚集体来说，其空间配置具有显著生态效应，相邻木的拥挤分布使参照树形成三向受光格局，获得较大营养空间与生产力增益，但相邻木间显著的大小差异将引发非对称竞争，尤其在相邻木相对拥挤时，竞争强度超过阈值，弱势小径木因资源剥夺导致生长放缓、停滞甚至死亡，聚集体原有结构随之瓦解，幸存个体通过空间重组形成新型结构体。聚集程度越高，结构体稳定性越低，越容易发生瓦解和重组（图 5a）。而均匀体的演化机制则呈相反特征：均匀木受 3 ~ 4 个方位相邻木的空间挤压或遮挡，形成多向竞争压力场，其生存概率将随压力方向数增加而下降，如果这时的均匀木大小处于竞争劣势，则更容易在自然选择过程中被淘汰，最终导致均匀结构体瓦解，原结构体内剩余的林木将与其他林木重组为新的结构体，林木越拥挤，越容易发生瓦解和接踵而来的重组（图 5b）。均匀体瓦解阈值与相邻木拥挤度也呈正相关，这与聚集体的瓦解机制形成生态学意义上的对称关系。两类结构体的动态平衡揭示了天然林自我更新的核心机制——通过局部结构瓦解与系统级重组实现资源再分配，该发现为结构化森林经营中的结构调整提供了重要理论依据，这也是造成天然林角尺度分布近似正态的主要原因，当然也许还由天然林下种的位置具有随机性所造成。

基于森林空间结构的生态适应性分析，随机体展现出独特的稳定性优势。与均匀体相比，随机木的邻体配置使其形成两面受光的格局，其竞争压力

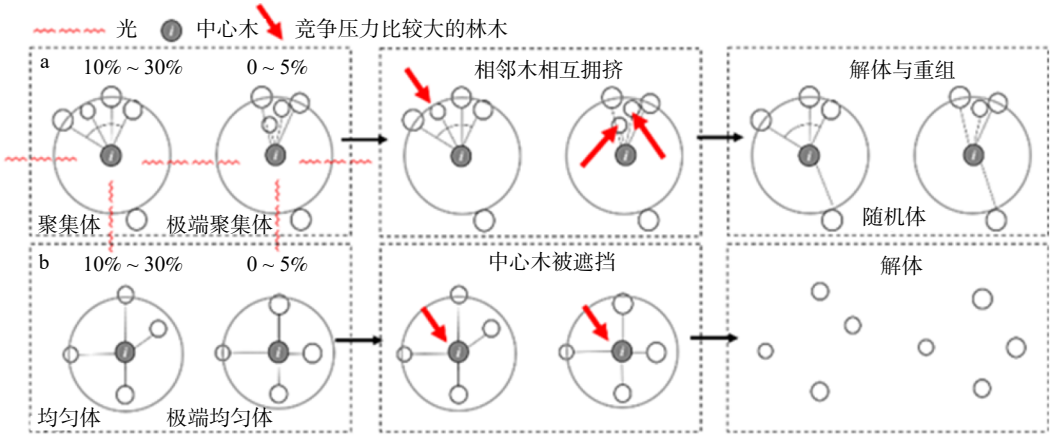


图 5 聚集体和均匀体瓦解–重组示意图

Fig. 5 Disintegration-reorganization diagram of clumped structural unit and regular structural unit

比均匀木有所减少，而随机体内的相邻木之间挤压程度比聚集体内相邻木之间的挤压程度更小。这种拓扑特征使随机体具备三重抗逆机制：首先，双向光资源获取模式提升光合效率，有利于林木健康生长；其次，适度的竞争压力维持代谢平衡，不容易由于竞争的缘故而导致弱势林木频出，比其他两种结构体中的林木稳定生长的可能性更大，在自然演替过程中获得更多存活的几率；再次，随机体作为可以长期存在且不易瓦解的结构体，结构的稳定性为林木提供长效而稳定的微环境，从而达到维持林分整体健康、正常发育、稳定发展、持续输出生产力的动态平衡。即使考虑距离缓冲效应或个体差异等偶发因素，随机体的平均竞争压力仍显著低于其他结构类型。因此，在发育良好的天然林或顶极群落中，随机体成为主体构成，而均匀体和聚集体各自保持在一定比例范围内。随机木承受的较小竞争压力保全了其数量优势，其林分平均角尺度（$\overline{W}$）趋于 0.5 正是对这一平衡分布的体现[31]。当森林遭受严重自然灾害、病虫害或受到人为干扰时，可能会造成现有的森林空间结构平衡被打破，表现为非随机体增多，这些非随机体将在未来几年甚至更长时间内，逐渐在自然选择中被打破重组，完成自然选择和修复过程，非随机体逐渐减少，随机体恢复到一定比例，重新回归平衡稳定的状态并保持这种动态平衡。

天然林中主要的林木群体为随机分布的林木个体（随机木）。随机体作为可以长期存在且不易瓦解的结构体，为林木提供了长效而稳定的微环境，随机体在天然林中的主体构成是促使森林稳定的关键。

惠刚盈等[7,32]提出的“随机体–稳定性”假说系统阐释了这一现象：（1）林分中，均匀木由于受到四向的遮挡与挤压，其对环境资源（光）的利用受阻，加大了死亡率，导致均匀结构体容易解体；（2）聚集体内的相邻木相互拥挤，从而增加了死亡率，也容易导致聚集结构体解体；（3）随机体的架构形式使得随机木处于两面受光的邻体微环境，随机木的竞争压力小于均匀木，随机体内的相邻木之间的竞争压力小于聚集体，因此，随机体相对来说承受的生存压力较小，比其他两种结构体稳定存在的可能性更大，在自然演替的过程中获得更高的存活几率。随机体被认为是林木在森林群落条件下最为普适的邻体配置形式。植物由于位置的固定性，只能通过适者生存的自然选择法则来实现随机体的形成。随机体的数量越多，森林群落越稳定。

该理论突破传统群落生态学框架，将植物固着特性与空间拓扑学结合，证明随机邻体配置是林木应对环境胁迫的进化最优解。这为森林健康评价提供了新的空间维度指标，对天然林保护修复工程中目标树选择、抚育间伐强度确定等关键技术具有重要指导价值。

2.5　林木生长的结构–竞争效应

从生态学视角解析，本研究提出“结构–功能反馈循环”理论框架：结构决定功能，两者间存在协同演化机制，结构通过竞争介导生态过程调控系统功能，而功能输出又通过资源再分配驱动结构重组。从林木竞争的角度来看，结构参数密集度（C_i）和大小比数（U_i）体现了参照树所受到的侧向挤压和上方遮盖，二者共同决定林木的立体竞争格局，组成了林木竞争的双核心，而角尺度（W_i）和混交度（M_i）则属于竞争调节参数，反映了林木分布格局的均匀性和树种多样性，二者通过影响竞争作用维度改变林木竞争强度，进而影响系统稳定性。

进一步分析表明，空间结构参数具有双重表征功能：既是当前微环境特征的量化表达，又是未来竞争演替的预测指标。通过空间结构参数优化空间配置，实现竞争压力再分配，进而维持群落生产力与稳定性的平衡。所以，我们构建了基于林分空间结构参数的林木空间竞争指数（SCI_i）[33]。

$$\mathrm{SCI}_i = \sqrt{C_i \lambda_{W_i} U_i \lambda_{M_i}} \tag{4}$$

该竞争指数的取值范围为 [0，1]，即林木所承受的最小竞争压力为 0，最大为 1。林木的竞争强度 SCI_i 可划分为极弱度 [0，0.2）、弱度 [0.2，0.4）、中度 [0.4，0.6）、强度 [0.6，0.8）和极强度 [0.8，1.0]。

截至目前，大部分竞争指数多聚焦于邻木挤压和垂直遮荫的二元分析体系，尚未有效纳入空间分布格局和树种异质性的结构调节作用，更未触及竞争过程的空间自组织效应，这也许是大多数竞争指数较适合于规则分布的人工纯林，而不适合于结构复杂的多树种天然林的主要原因。研究基于空间结构参数（混交度、角尺度、大小比数和密集度）构建的的竞争指数（SCI_i）很好地表征了结构单元内单木的竞争态势，精准描述了各林木在群落内的自然状态，揭示单木生长的空间结构效应。该理论框架的创新性在于首次将林木竞争分解为方位维度（W_i）、大小维度（U_i）、距离维度（C_i）和物种维度（M_i）的四元作用体系，并建立参数间的动态耦合方程，量化林木分布随机性对竞争压力的调节效应，揭示树种多样性产生的生态位互补效应，表征竞争过程的空间记忆特性。这为精准量化“结构–功能–过程”相互关系提供了数学模型基础，对指导结构化森林经营具有重要实践价值，特别是在目标树培育、竞争调控和混交优化等关键环节形成量化决策支持系统。

2.6 最优林分质量的 π 值法则

基于系统生态学原理，林分质量可解构为结构−活力双维度体系[34]。结构维度涵盖垂直结构、水平结构、年龄结构、树种组成以及林分密度；活力维度则包括林分长势、林分更新、大径林木以及林木健康。根据不同的评价内容以及林分质量评价指标的选取原则，选取相对应的科学合理的评价指标。由于评价指标复杂多样，既有定性指标，也有定量指标，且不同指标之间存在显著的取值和单位的差异，因此根据每个指标的生物学意义，对所选评价指标所得到的度量值进行赋值、标准化和正向处理，使其变成 [0, 1] 的无量纲数值。

针对多维指标的整合难题，采用林分状态单位圆系统集成模型进行林分质量多指标综合评价[34−35]。首先，通过标准化变换消除量纲差异，实现指标正向化处理，随后构建半径为 1 的基准圆，将其等分为 m 个扇形区（对应 m 个评价指标），每个扇形中心角 $\theta = 2\pi/m$。现实林分各指标标准化值作为对应扇区的实际半径，最终形成由 m 个变径扇区构成的多维雷达图，其面积值就代表了现实林分质量状况（图 6）。

该模型创新性提出 π 值法则：当所有指标均达最优值，即取值为 1 时，图形成为标准单位圆，其面积恒等于 π，可视为最优林分质量状态的期望值，该期望值与质量指标有多少或指标是什么无关，这就是最优林分质量的 π 值法则。所以，与最优林分质量 π 值相比，就可以获得待评价林分质量等级值，其值在（0, 1] 之间，越大越好[7,34]，公式如下。

$$\mathrm{FQ} = \frac{\sum_{k=1}^{m} \dfrac{\pi R_k^2}{m}}{\pi R^2} = \frac{1}{m}\sum_{k=1}^{m} R_k^2 \tag{5}$$

式中：FQ 代表林分质量评价综合指数；m 代表评价指标个数；R_k 代表第 k 个正向指标评价值；R 为单位圆半径，等于 1。

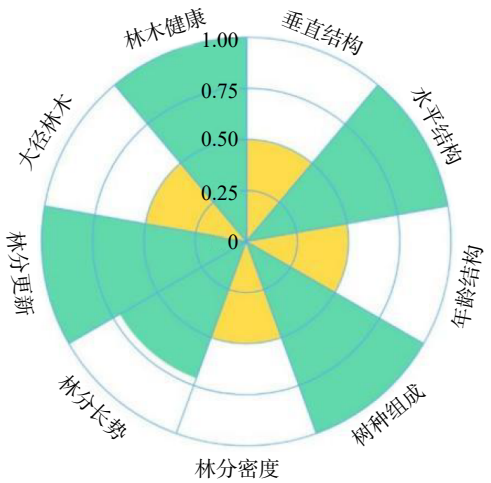


图 6 林分质量评价单位圆

Fig. 6 Stand quality evaluation unit circle

2.7 有效空间利用的林分初始密度

林分密度作为森林培育的核心调控指标，其本质反映了单位面积内林木个体的空间占有状况，从生态学视角解读，密度倒数即单木平均营养空间面积，这一双重属性使其兼具种群数量特征和生产力调控功能[36]。传统密度确定方法建立于造林试验的长期观测数据基础之上，但通过经验归纳形成的“经验密度”存在显著局限性：其一，特定树种−立地条件的强关联性导致外推应用困难，确定出的造林密度为经验密度，仅适合研究地的具体树种、具体地理环境和立地条件，且确定过程耗时费力；其二，长达数十年的观测周期严重滞后于现代林业决策需求；其三，忽视空间结构参数对密度效应的调节作用。现有研究[7,37−38]已明确密度与生产力的阶段响应规律，即在一定密度范围内，中幼林阶段，林分密度与林分生产力呈正相关关系，即密度越大，林分生产力越高；近成熟阶段，无论密度高低，林分总产量几乎恒定，但林分内中大径木的比例不同，低密度能生产出更多的大径材。这揭示了单纯数量维度的密度调控已无法满足优质大径材培育需求，亟需建立融合空间配置的密度优化体系。

从林木群体生长发育理论可知，速生期的时空配置对材质形成具有决定性作用。林木快速生长期通常在幼中龄阶段，此时如果没有留足够的空间，则会造成速生期缩短、过早分化，甚至严重影响林木后期的生长质量。过低的造林密度尽管使林木个体因拥有足够的营养空间而生长快，但如果单位面积上的林木个体数过少，势必造成林分整体对空间的利用程度低。而过大的造林密度会造成林木在很短时间里就能达到树冠相切，过早地结束自由生长。此时，大部分林木在很大程度上还处于快速生长的幼中龄阶段，本该予以更大的营养生长空间，但由于此时林分中林木个体过多，使得单株可利用生长空间十分有限，致使林木个体在幼中龄阶段快速生长的时限缩短，即大大缩短了林木速生期时间，使林木闪过其生长最旺盛的时期而过早地进入竞争阶段，从而影响了林木质量和林分整体光合效能的充分发挥。生长好的林分通常具有足够大的林木生长空间，并且林分整体不存在较大的空间浪费。可见，林木个体所需营养空间和林分整体空间利用程度达成平衡状态时的密度就是适宜密度，此时既有利于林木个体发展，也有利于林分群体效能的充分发挥。

通过演绎方法，从高大树木的空间利用角度探寻林分密度问题，在阐述林木群体生长过程对空间

利用的相关理论基础上，模拟矩形和三角形配置条件下不同林分密度，并探讨林木间距、最大冠径、方形面积、圆形面积、潜在营养面积与密度之间的关系，最后，在明确林木潜在营养面积与林分密度数学关系的基础上，基于该数学关系特性和生物学理论，本着既有利于林木个体生长发育，又不造成不必要的空间浪费的原则，确定了适宜的林分密度。研究发现，在林木树冠相切时，林木潜在生长空间与林分密度成反比。从生物数学的角度，提出最优空间利用的适宜林分密度，矩形配置为 1 073 ~ 2 146 株/hm^2，三角形配置为 931~1 862 株/hm^2[7]。换句话说，对于高大的树木来讲，合理的适生密度范围应该在 1 000 ~ 2 000 株/hm^2。所确定的林分密度虽比目前生产上的造林密度低，但它符合稀密度有利于大径材生产、并容易通过天然更新形成混交林的原则。将人工培育目的树种和天然更新有机地结合起来，能充分发挥自然力的作用。该林分密度既不会限制林木个体的生长发育，又不会造成不必要的林分空间浪费，能确保林分达到最大自由生长极限时，林木间距为 2.16 ~ 3.05 m，每株林木具有 3.66 ~ 7.32 m^2 的树冠投影面积，林分内，每株树的外围还有 1 ~ 2 m^2 的潜在可利用空间[7]。这种基于林木生长空间利用的林分密度确定方法既可应用于人工造林，也为森林经营中林分密度控制提供了新思路。

3　结论与展望

3.1　结　论

经过 20 多年的发展，结构化森林经营的基础理论更加完善，技术体系更加成熟[39−42]。为使广大应用者对结构化森林经营有全面深刻的理解，本文系统总结了结构化森林经营理论体系，包括森林结构的诠释，基于最近 4 株相邻木关系的林分空间结构参数体系(角尺度、混交度、大小比数及密集度)、空间结构与竞争的关系、林分结构多样性、随机体−稳定性假说、π 值法则以及空间利用最优造林密度等，深度挖掘了结构化森林经营的生态学基础。

3.2　展　望

为大力推广这种先进的森林经营理论与技术，未来还需特别推进以下 2 个方面的理论研究。

3.2.1　基于林分空间利用的森林生长发育阶段

精准提升森林质量的有效途径就是开展有的放矢的全周期森林经营，关键是厘清不同发育阶段的森林结构规律，前提是科学合理的森林生长发育阶段划分。随着天然异龄混交林研究的不断深入，越来越多的研究者着眼于替代龄组的方法上，目前，国内有许多文献采用基于近自然经营的森林生长发育 5 阶段划分：建群阶段、竞争生长阶段、质量选择阶段、近自然森林阶段和天然恒续林阶段。这个划分方法的主要问题是评价标准不一致，阶段名称难以理解，还没有一种方法从空间利用的角度探讨森林生长发育阶段的划分。森林生长发育阶段划分与树木大小有关(如小树与大树)，与树木和林分生长(直径、树高和蓄积 S 形生长)过程有关，与林分状态特征(生长状况、开花结实、枯枝、枯立木等)有关、与土壤植被(草、灌木)有关，而这些皆与林分空间利用(林分密集度或郁闭度)等密切相关。构造“树木自由生长阶段−林分郁闭生长阶段−林分密集生长阶段−林分饱和生长阶段−林分稀疏生长阶段”5 阶段势在必行。

3.2.2　林分结构多样性的作用机理

一直以来，众多学者非常关注林分稳定性、树种多样性和林分质量等科学问题，本文前面已经提到，林分稳定性是群落存在的必要条件和重要功能表现，树种多样性是对森林系统树种构成的深层次表达，林分质量则综合体现了林分结构、生长状态、更新能力和健康状况的优劣程度。然而，林分结构多样性与这些重要科学问题存在何种关系，尚未见系统报道，而这正是目前森林可持续经营亟需解决的重要理论问题。

参　考　文　献

[1] 胡艳波, 惠刚盈. 优化林分空间结构的森林经营方法探讨 [J]. 林业科学研究, 2006, 19(1): 1−8.
Hu Y B, Hui G Y. A discussion on forest management method optimizing forest spatial structure[J]. Forest Research, 2006, 19(1): 1−8.

[2] 惠刚盈, 胡艳波, 徐海, 等. 结构化森林经营 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2007.
Hui G Y, Hu Y B, Xu H, et al. Structure-based forest management[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2007.

[3] Li Y F, Ye S M, Hui G Y, et al. Spatial structure of timber harvested according to structure-based forest management[J]. Forest Ecology and Management, 2014, 322: 106−116.

[4] Larue E A, Knott J A, Domke G M, et al. Structural diversity as a reliable and novel predictor for ecosystem productivity[J]. Frontiers in Ecology and the Environment, 2023, 21(1): 33−39.

[5] Wang H X, Huang S X, Zhang S S, et al. Localized neighborhood species mingling is correlated with individual tree size inequality in natural forests in South China[J]. Annals of Forest Science, 2021, 78(4): 102.

[6] Pommerening A, Grabarnik P. Individual-based methods in forest ecology and management[M]. Berne: Springer International Publishing, 2019.

[7] 惠刚盈. 结构化森林经营理论与实践 [M]. 北京: 科学出版社,

2020.
Hui G Y. Theory and practice of structure-based forest management[M]. Beijing: Science Press, 2020.

[8] 张会儒, 雷相东, 李凤日. 中国森林经理学研究进展与展望 [J]. 林业科学, 2020, 56(9) : 130−142.
Zhang H R, Lei X D, Li F R. Research progress and prospects of forest management science in China[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2020, 56(9): 130−142.

[9] Zhai L, Will R E, Zhang B. Structural diversity is better associated with forest productivity than species or functional diversity[J]. Ecology, 2024, 105(4): e4269.

[10] 惠刚盈, 赵中华, 袁士云. 森林经营模式评价方法——以甘肃小陇山林区为例 [J]. 林业科学, 2011, 47(11): 114−120.
Hui G Y, Zhao Z H, Yuan S Y. Evaluation method of forest management models: a case study of Xiaolongshan forest area in Gansu Province[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2011, 47(11): 114−120.

[11] Dong L, Bettinger P, Liu Z. Stand spatial structural diversity: developing and validating a novel index[J]. Forest Ecology and Management, 2024, 569: 122157.

[12] Macarthur R. Fluctuations of animal populations and a measure of community stability[J]. Ecology, 1955, 36(3): 533−536.

[13] Janzen D H. Herbivores and the number of tree species in tropical forests[J]. American Naturalist, 1970, 104(940): 501−528.

[14] Connell J H. On the role of natural enemies in preventing competitive exclusion in some marine animals and in rain forests//den Boer P J, Gradwell G R. Dynamics of populations[M]. Wageningen: Centre for Agricultural Publishing and Documentation, 1971: 298−312.

[15] Pommerening A, Uria-Diez J. Do large forest trees tend towards high species mingling?[J]. Ecological Informatics, 2017, 42: 139−147.

[16] Wang H, Peng H, Hui G Y, et al. Large trees are surrounded by more heterospecific neighboring trees in Korean pine broad-leaved natural forests[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 9149.

[17] Pommerening A, Wang H X, Zhao Z H. Global woodland structure from local interactions: new nearest-neighbour functions for understanding the ontogenesis of global forest structure [J]. Forest Ecosystems, 2020, https://doi.org/10.1186/s40663-020-00224-5.

[18] 惠刚盈. 森林结构多样性深度解译方法及其应用 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2022.
Hui G Y. Deep interpretation methods of forest structure diversity and their applications[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2022.

[19] Wan P, Zhang G Q, Wang H X, et al. Impacts of different forest management methods on the stand spatial structure of a natural *Quercus aliena* var. *acuteserrata* forest in Xiaolongshan, China[J]. Ecological Informatics, 2019, 50: 86−94.

[20] 惠刚盈, 胡艳波. 混交林树种空间隔离程度表达方式的研究 [J]. 林业科学研究, 2001, 14(1): 23−27.
Hui G Y, Hu Y B. Measuring species sptial isolation in mixed forests[J]. Forest Research, 2001, 14(1): 23−27.

[21] 惠刚盈，克劳斯冯佳多. 森林空间结构量化分析方法 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2003.
Hui G Y, von Gadow K. Quantitative analysis of forest spatial structure[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2003.

[22] Zhang G G, Hui G Y, Zhang G Q, et al. Telescope method for characterizing the spatial structure of a pine-oak mixed forest in the Xiaolong Mountains, China[J]. Scandinavian Journal of Forest Research, 2019, 34(8): 751−762.

[23] 惠刚盈, 赵中华, 胡艳波, 等. 基于结构参数均值的林分空间结构综合评价研究 [J]. 林业科学研究, 2023, 36(2): 12−21.
Hui G Y, Zhao Z H, Hu Y B, et al. Comprehensive evaluation of forest spatial structure based on the mean values of structural parameters[J]. Forest Research, 2023, 36(2): 12−21.

[24] Hui G Y, Zhang G G, Zhao Z H, et al. Methods of forest structure research: a review[J]. Current Forestry Reports, 2019, 5(18): 1−12.

[25] Wiegand K, Saltz D, Ward D. A patch-dynamics approach to savanna dynamics and woody plant encroachment: insights from an arid savanna[J]. Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics, 2006, 7(4): 229−242.

[26] Fisher R A, Corbet A S, Williams C B. The relation between the number of species and the number of individuals in a random sample of an animal population[J]. The Journal of Animal Ecology, 1943, 12(1): 42−58.

[27] 惠刚盈, 赵中华, 胡艳波, 等. 基于 4 株相邻木关系的林分空间结构多样性测度方法研究 [J]. 北京林业大学学报, 2023, 45(7): 18−26.
Hui G Y, Zhao Z H, Hu Y B, et al. Research on the measurement method of forest spatial structure diversity based on 4 neighborhood tree relationship[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2023, 45(7): 18−26.

[28] Zhang G Q, Hui G Y, Zhao Z H, et al. Composition of basal area in natural forests based on the uniform angle index[J]. Ecological Informatics, 2018, 45(1): 1−8.

[29] 陈科屹. 云冷杉过伐林经营诊断及目标树抚育效果研究 [D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2018.
Chen K Y. Studies on management diagnosis and effectiveness of thinning based on crop tree management for over-logged spruce-fir forest[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2018.

[30] 万盼. 经营方式对甘肃小陇山锐齿栎天然林林分质量的影响 [D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2018.
Wan P. Impacts of management methods on stand quality of natural *Quercus aliena* var. *acuteserrata* forests in Xiaolongshan, Gansu[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2018.

[31] Hui G Y, von Gadow K. Das Winkelmass-theoretische Überlegungen zum optimalen Standardwinkel[J]. Allgemeine Forst-und Jagdzeitung, 2002, 173(9): 173−177.

[32] 惠刚盈, 赵中华, 张弓乔, 等. 基于角尺度的随机体在森林稳定性维持中的作用 [J]. 林业科学, 2021, 57(2): 22−30.
Hui G Y, Zhao Z H, Zhang G Q, et al. The role of random structural pattern based on uniform angle index in maintaining

forest stability[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2021, 57(2): 22−30.

[33] Hui G Y, Wang Y, Zhang G Q, et al. A novel approach for assessing the neighborhood competition in two different aged forests[[J]]. Forest Ecology and Management, 2018, 422: 49−58.

[34] 惠刚盈, 张弓乔, 赵中华, 等. 天然混交林最优林分状态的 π 值法则 [J]. 林业科学, 2016, 52(5): 1−8.
Hui G Y, Zhang G Q, Zhao Z H, et al. A new rule of π-value of natural mixed forest optimal stand state[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2016, 52(5): 1−8.

[35] Zhang G G, Hui G Y, Zhang G Q, et al. A novel comprehensive evaluation method of forest state based on unit circle[J]. Forests, 2018, 10(1): 5.

[36] Zeide B. Optimal stand density: a solution[J]. Canadian Journal of Forest Research, 2004, 34(4): 846−854.

[37] Hui G Y. Wuchsmodelle für die Baumart *Cunninghamia lanceolata*[M]. Göttingen: Cuvillier Verlag Göttingen, 1998.

[38] 沈国舫, 翟明普. 森林培育学 [M]. 2 版. 北京: 中国林业出版社, 2011.
Shen G F, Zhai M P. Silviculture[M]. 2nd ed. Beijing: China Forestry Publishing House, 2011.

[39] 惠刚盈. 基于相邻木关系的林分空间结构参数应用研究 [J]. 北京林业大学学报, 2013, 35(4): 1−9.
Hui G Y. Studies on the application of stand spatial structure parameters based on the relationships of neighborhood trees[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2013, 35(4): 1−9.

[40] Zhang R B, Ding G J, Luo X M, et al. Bivariate distribution characteristics of spatial structure in five different *Pinus massoniana* forests[J]. Dendrobiology, 2017, 78: 75−84.

[41] 惠刚盈, 胡艳波, 赵中华. 结构化森林经营研究进展 [J]. 林业科学研究, 2018, 31(1): 85−93.
Hui G Y, Hu Y B, Zhao Z H. Research progress of structure-based forest management[J]. Forest Research, 2018, 31(1): 85−93.

[42] Pommerening A, Zhang G Q, Zhang X H. Unravelling the mechanisms of spatial correlation between species and size diversity in forest ecosystems[J]. Ecological Indicators, 2021, 121: 106995.

（责任编辑　范　娟　李　契
责任编委　张会儒）