

结构化森林经营研究进展

惠刚盈, 胡艳波, 赵中华

(中国林业科学研究院林业研究所, 国家林业局林木培育重点实验室, 北京 100091)

摘要: 本文全面系统地综述了结构化森林经营技术的最新研究进展。指出结构化森林经营是针对目的树单木经营的高度集成技术, 符合现代森林经营发展方向; 结构化森林经营有望成为解决人工林近自然化转变的有效途径; 结构化森林经营中林分空间结构参数综合评价势在必行。经历 10 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、应用推广更加广泛。大面积推广应用结构化森林经营理论与技术, 可有效提升我国森林质量, 并缓解森林资源可持续发展与利用之间的矛盾。

关键词: 结构化森林经营; 结构参数; 森林质量; 林木微环境

中图分类号: S750

文献标识码: A

文章编号: 1001-1498(2018)01-0085-09

Research Progress of Structure-based Forest Management

HUI Gang-ying, HU Yan-bo, ZHAO Zhong-hua

(Research Institute of Forest, Chinese Academy of Forestry; Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation, State Forestry Administration, Beijing 100091, China)

Abstract: Forests are considered as the green umbrella of human survival. Preserving forests is the same as taking care of habitat for humanity. How to solve the ecological and environmental problems caused by unreasonably development has currently been an urgent issue for humankind. To figure out the challenges of forest management and to accurately improve forests quality in China, this paper reviews the latest research progress of structure-based forest management technologies for the first time. Additionally, the authors highlight that the structure-based forest management is a highly integrated technology of single-tree management for target trees, which meets the development direction of modern forestry. Structure-based forest management is expected to be an effective way of transformation from plantations to near nature forest. Comprehensive evaluation of stand spatial structure parameters in structure-based forest management is imperative. After 10 years of development, the basic theory of structure-based forest management is more perfect, the technology system is more mature and popularization and its application is more extensive. Widespread popularization and application of structure-based forest management theory and technology can effectively improve forest quality in China, and can alleviate the contradiction between the sustainable development and utilization of forest resources.

Keywords: structure-based forest management; structure parameters; forest quality; tree microenvironment

森林生态系统是以乔木为主体的生物群落及其周围环境所组成的自然综合体, 是研究生物与环境、生物与生物之间进行物质交换、能量流动的生态

科学。森林作为面积最大的陆地生态系统, 被认为是人类赖以生存的绿色保护伞, 在人类历史文明进程中起着重要的作用^[1]。但由于人类爆发式增长及

其对自然生态系统无节制的利用,使森林面积减少、结构不稳定以及生态环境恶化。如何解决不合理开发而引起的系列环境生态问题,已经成为现阶段人类亟待解决的重大问题。目前世界面临增加森林面积、提高森林质量、增加生物多样性、维护生态系统功能等重大挑战^[2]。传统的森林经营,以用材林经营为核心,围绕森林更新、森林培育、森林采伐、森林结构调整等相关技术,进行了长期研究与探索,形成了一些理论、技术与实践经验储备,但已不能适应现代森林经营的多功能需求。现代森林经营,在森林可持续经营的原则指导下,以培育健康稳定优质高效的森林为目标^[3-5],更加强调创建或维护最佳的森林空间结构^[6]。国际上无论是德国的近自然森林经营^[7-9]还是美国的生态系统管理^[10-11],其实质都是为了维护森林生态系统健康,发挥森林的多种功能和自我调控能力^[4]。众所周知,森林经营是林业发展的永恒主题,其原理就是道法自然,遵从自然规律按照生态理论进行森林空间结构优化。惠刚盈等^[5]紧紧抓住“结构”这一控制系统功能发挥的“中枢”,汲取林业发达国家成功经验,紧密结合我国森林经营的历史与现状,通过十多年的潜心研究,系统地提出了创新性的森林经营理论与技术——结构化森林经营。为破解我国森林经营难题和精准提升我国森林质量,加速推广和应用结构化森林经营技术势必能够发挥重要的作用。在此,有必要对其理论研究和过程进行梳理。

1 结构化森林经营

基于4株最近相邻木空间关系的森林结构优化经营技术简称为结构化森林经营^[4-5]。结构化森林经营遵循结构决定功能的系统法则,量化和发展了德国近自然森林经营,坚持“以树为本、培育为主、生态优先”的理念,以培育健康稳定、优质高效的森林为目标,以优化调整森林结构为手段,用结构参数指导森林结构调整,用森林状态变化实时评价经营效果。该经营体系最突出的特点在于既能科学、准确地量化描述森林结构,揭示森林结构与林木竞争、树种空间多样性的关系,又能够制定有针对性的经营措施,指导经营者对森林结构进行量化调整。森林结构优化经营技术在我国已得到广泛的推广和应用,产生了显著的生态、经济和社会效益^①。

2 研究进展

结构化森林经营从2007年正式被提出到现在已有整整10年的发展历程。可以说,这10年间结构化森林经营的基础理论更加完善、技术体系更加成熟、应用推广更加广泛。

2.1 基础理论

首先,解决了结构单元大小的问题,确立了5株树结构体的合理性(图1)。单木的空间关系强调的是单木的微环境,自然涉及到与其最近 n 株相邻木的树种属性、分布格局和相对大小关系。 n 的大小问题一直以来就是植被生态学中竞争研究和森林培育学中目标树培育研究的核心^[15-17]。理论上分析较多的相邻木个数(即较大的 n)可以得到参照树周围更多相邻木的分布信息,但这同时会增加更多的调查成本^[18]。Gadow^[19]提出的基于3株最近相邻木的混交度在学术界产生了很大的反响^[20-29];为增加树种混交度分析的精细程度,惠刚盈和Gadow^[30]系统地提出由参照树及其4株最近相邻木组成的描述林分空间结构的最佳方法,Wang等^[31]对此进行了系统分析和数字验证,5株树结构体也恰巧符合“森林”5字木汉学文化。

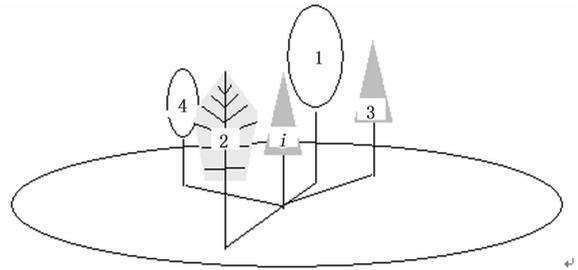


图1 林分空间结构单元

Fig. 1 Structural unit of forest spatial

其次,构筑了完整的林分空间结构参数体系(图2)。由最初的3个林分空间结构参数发展到基于最佳空间结构单元的混交度、大小比数、角尺度和密集

① 截至目前,结构化森林经营拥有国家发明专利授权6项,实用新型专利授权1项,专著7部,论文100篇,其中被SCI收录16篇、EI收录3篇,国际领先水平鉴定成果2项^[12],已被载入KFW中国南方14省森林可持续经营培训教材(KFW,2012)、面向21世纪课程教材《森林培育学》^[13]、全国高等农林院校规划教材《森林经理学》^[14]、中国林业科学研究院森林培育研究生教材以及国际著名出版社Springer出版的《Managing Forest Ecosystems》系列专著《Continuous Cover Forestry》^[6],被国内300多篇相关专业的硕博论文、1000多篇学术论文采用。有100个参观团1000余人次赴结构化森林经营示范区观摩学习,多家新闻媒体对该成果进行了专题报道。

度4个结构参数。早期的混交度、大小比数和角尺度等3个结构参数都是针对不同问题分别独立提出的,虽然得到了非常广泛的应用^[5-6, 15, 29-30, 32-37],但对森林群落结构分析而言,还缺乏对林木拥挤程度的表达,为此,惠刚盈^[38]、胡艳波和惠刚盈^[39]提出了体现林木密集程度的密集度参数,标志着完整

的基于最佳空间结构单元的、由混交度、角尺度、大小比数和密集度所构成的林分空间结构参数体系已经形成。这4个结构参数精准定位了每株林木在群落内的自然状态,确切回答了周围的相邻木比其大或小、在周围如何分布、有多少与其同种、是否受到挤压的问题。

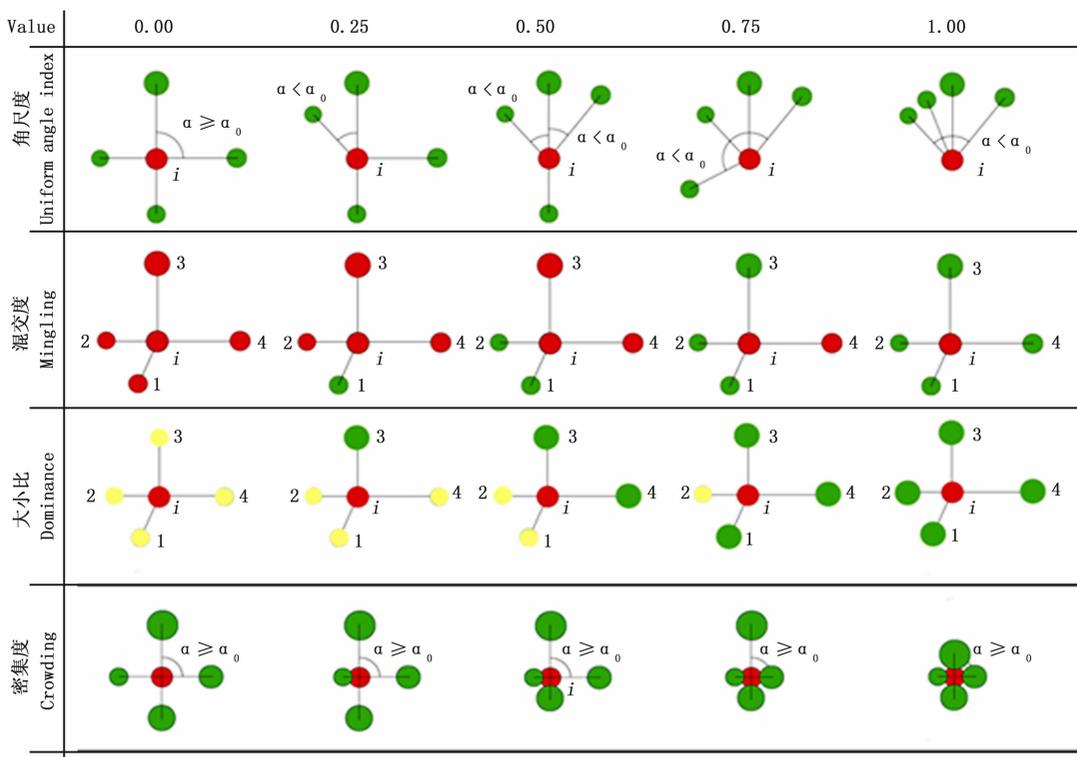


图2 林分空间结构参数体系

Fig. 2 Parameters of forest spatial structure

第三,提高了具体林分空间结构参数的科学化水平。完善了林分空间结构参数角尺度和混交度理论,对于角尺度而言,由最初定义的 90° 标准角的10%误差^[40]发展到 72° 为标准角、按角尺度均值3倍标准差^[30,41]进行格局评判,最近赵中华等^[42-43]提出了更为完整的角尺度检验方法。对于混交度而言,惠刚盈和胡艳波^[44]指出 Fuldner^[22]的林分平均混交度受混交树种比例的影响,不能真实表达林分的树种分隔程度。从此,有关混交度均值计算提出了很多修正办法,汤孟平等^[27]提出树种多样性混交度,将相邻木的树种数加入到混交度参数中;惠刚盈等^[45]对林分平均混交度和树种混交度做了进一步的研究,在每株林木的混交度计算过程中直接引入结构单元树种比例的概念,提出了修正的混交度均值计算公式,该修正得到非常广泛的应用^[46-47];娄

明华等^[48]提出了全混交度的概念;惠刚盈等^[49]提出基于修正的混交度的树种空间多样性指数(TSS);胡艳波和惠刚盈^[50]提出利用混交度判定种群格局的创新性方法,为群落生态学种间关系的研究开辟了全新的途径。

第四,结构参数的联合概率分布更加精细刻画了林木的微环境。结构参数的分析方法从一元分布、经过二元发展到多元分布。大多数研究在利用结构参数分析林分空间结构特征时,通常只是独立地应用各参数分别进行群落结构的某一方面分析。即角尺度及其分布仅展示林分整体结构中林木的水平分布格局,而与混交度或大小比数没有任何关系;混交度分布仅能够提供林分整体的混交状态,而不涉及直径大小或分布;大小比数分布仅能说明树木大小分化,而与另外两个指标无关,也就是说,仅独

立地研究了一个变量的频率分布,亦即数理统计学上所讲的变量的一元分布。可见,结构参数的一元分布无法同时展示结构单元中其他两种属性分布状况,这将不利于我们对林分空间结构的深刻认识。李远发等^[51]首次将这3个结构参数即角尺度、混交

度和大小比数进行了两两联合,得到混交度-大小比数、角尺度-混交度和角尺度-大小比数3种不同组合的频率分布,即3种二元分布(图3)。白超^[52]成功地对甘肃松栎混交林的结构进行了三元分布分析(图4)。

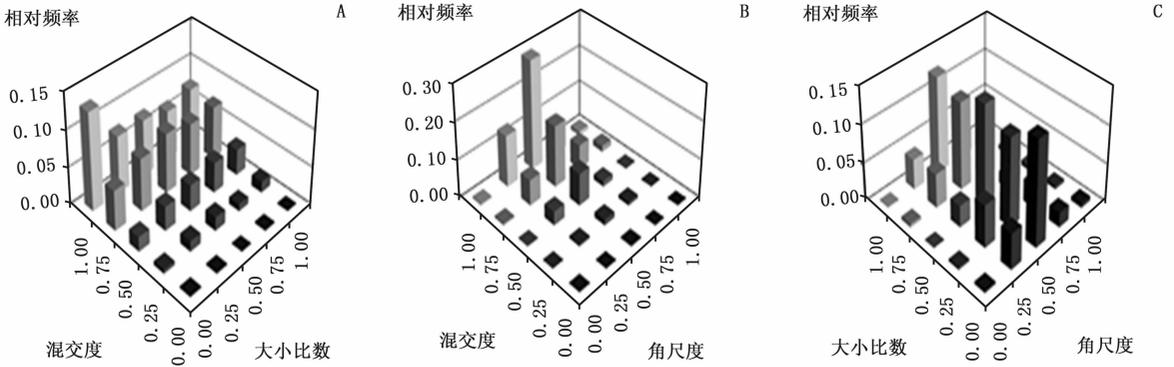


图3 结构参数的二元分布
Fig. 3 Bivariate distribution of structural parameters

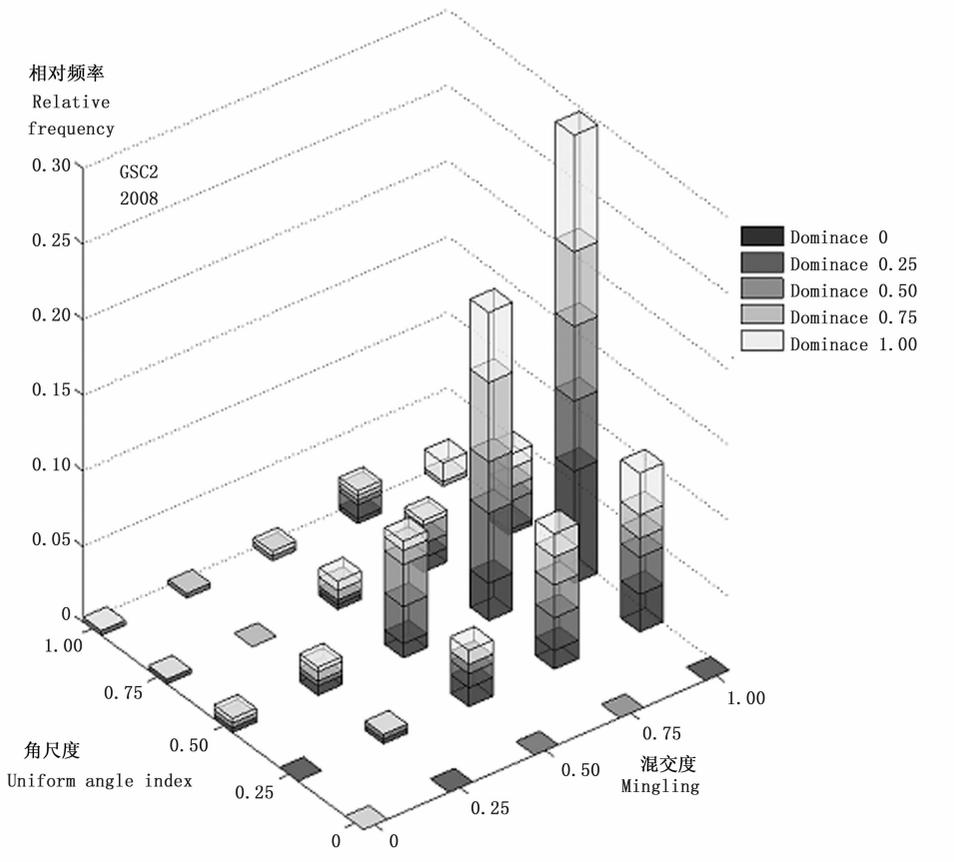


图4 结构参数的三元分布
Fig. 4 Trivariate distribution of structural parameters

结构参数二元或三元分布的提出为我们进一步认识林分空间结构的微观特征,如濒危种或稀有种或优势种的结构特征等提供了分析方法,使林分空间结构的二维平面分析即一元分布(变量的独立研究)步入三维甚至多维立体化阶段^[53]。

2.2 技术体系

完备的数据调查体系已经建成。结构化森林经营的数据调查,可采用全站仪每木定位大样地法(2 500 m²以上)或借助判角器或激光判角仪的样方法和无样地的点抽样法^[5]。在样方法研究中给出了样方大小和对应的数量,并指出样方法中调查4个大小为30 m×30 m是最经济和科学的^[54];点抽样法中49个抽样点及调查方法,以距抽样点最近4株林木为调查对象调查林分结构,并测抽样点到第4相邻木的距离,可以实现结构参数的精确估计与林分密度(蓄积、断面积)的无偏估计^[5],王宏翔等^[55]的研究表明,林分密度估计与林木分布格局有关,并指出精准确定每公顷株数可根据角尺度均值的取值区间采用不同的方法进行估测。目前结构化森林经营的数据调查均可采用新研发的“森林结构多样性测度仪”进行,计算软件可以用早期的 Winkel-mass^[30]或目前的林分结构分析 R-code^[56]。生产实践中推崇采用“结构多样性测度仪”进行点抽样调查,实现操作应用简单化。

规范了林分状态分析方法。林分状态合理与否关系到森林经营的必要性和紧迫性,对其评价的质量直接影响到经营决策的质量。只有明确了最优林分状态,才有可能对现实林分状态做出合理与否的评价,也才有可能对其进行有的放矢的经营调节。林分状态可从林分年龄结构、林分空间结构(林分垂直结构和林分水平结构)、林分密度、林分组成(树种多样性和树种组成)、林分长势、顶极树种(组)或目的树种竞争、林分更新、林木健康等8方面加以描述(图5),这8个方面能够表征林分主要的自然属性,而对应的每1个指标值都是容易可测的。采用单位圆分析方法进行林分状态综合评价^[57],单位圆方法能够直接给出最优林分状态的期望值,即最优林分状态的 π 值法则,无论何种林分,也无论描述的指标有多少或命名是什么,均不影响林分状态的期望值,其值恒等于单位圆面积 π 。

提出了新的基于经营目标的林分经营迫切性。林分经营迫切性反映了现实林分与健康林分状态的符合程度,通过经营迫切性评价可以确定森林经营

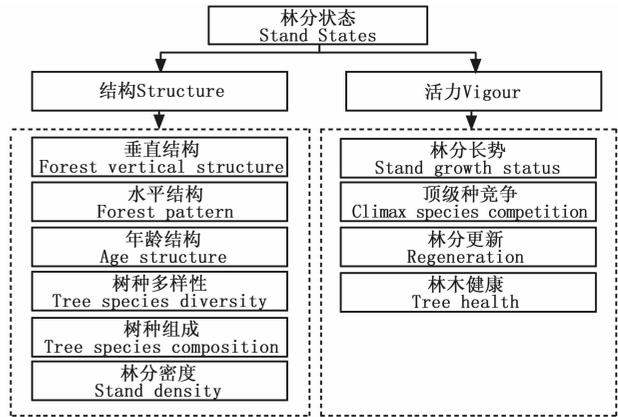


图5 林分状态指标体系

Fig. 5 Index system of forest status

方向。健康稳定森林的特征应该是异龄、混交、复层和优质(图6),并从这些特征出发,充分考虑林分的结构特点和经营措施的可操作性,从林分空间特征和非空间特征两个方面来分析判定林分是否需要经营,为什么要经营,调整哪些不合理的林分指标能使林分向健康稳定的方向发展。并对原有的指标评价标准^[5]进行了完善。

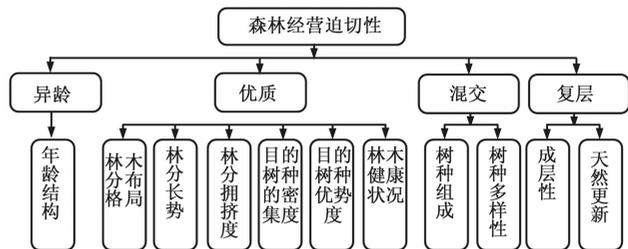


图6 森林经营迫切性评价指标体系

Fig. 6 Index system of forest management urgency

增加了密集度结构参数指导森林空间结构调整的方法。结构化森林经营中,为增加林木随机性而采用角尺度来调整林分空间分布格局;为增加树种多样性,以混交度调整林木隔离程度;为增强目的树的竞争能力,以大小比数调整树种竞争关系^[5],为增加目的树的营养空间,以密集度来调整林木拥挤度^[4, 39],体现了森林经营中进行密度调整的重要性,进一步丰富了林分空间结构参数指导林分结构调整的方法。

2.3 应用示范

自基于相邻木关系的林分空间结构参数发表以来,有大量的博(硕)士论文及研究报告都采用了这一森林群落结构量化分析方法。如 Albert^[21]对德国疏伐干扰下混交林结构改变的分析;Aguirre 等^[20]对

墨西哥天然林的结构特征分析;胡艳波、汤孟平、安慧君、夏富才^[27-28, 58-59]等对我国长白山红松阔叶林群落的结构分析;赵中华、袁士云^[37, 47, 60]等对我国西北甘肃的人工林及松栎天然混交林结构分析;郝江勃等、倪静^[61-62]对黄土高原森林群落空间结构分析;李纪亮^[63]对宝天曼栎类天然次生林分结构分析;岳永杰、赵阳等^[64-65]对北京山地的水源涵养林空间结构分析;刘凤芹等、孟成生等^[66-67]对冀北山区混交林空间结构分析;李建军、付春风和刘素青^[68-69]对雷州半岛红树林生态系统空间结构研究;郑丽凤等^[70]对中亚热带天然针阔混交林分空间结构的择伐影响分析;赵洋毅等^[71]对西南亚热带典型天然常绿阔叶林的空间结构特征分析;等等。这些研究均采用了结构参数各自独立的一元分布及其均值分析方法(图3),展示出不同气候带如寒温带、温带、暖温带、亚热带及热带及其不同森林类型的空间结构特征即林木总体分布格局、树种混交状况和个体大小的优劣态势。

从2007年至今,国际著名期刊如“Journal of Vegetation Science”、“Forest Science”、“Forest Ecology and Management”、“Forestry”、“Canadian Journal of Forest Research”、“European Journal of Forest Research”以及“Allgemeine Forst – Und Jagdzeitung”等,已刊登了许多有关结构化森林经营的论文,提高了我国森林经营研究的知名度和影响力。结构化森林经营以其扎实的理论基础、简单的应用操作,在我国东北、西北、西南、华北等林区得以大面积示范与推广,建立了100余块定位监测样地,330余 hm^2 试验示范林,推广总面积达6万多 hm^2 ,培训基层技术人员700人次^[12]。十多年的科学研究和经营实践证明,结构化森林经营理论与技术不仅适用于多种森林类型,而且可实现多种经营目标。在甘肃小陇山林区松栎混交林中建立的试验示范区监测发现,经营后的森林目的树种的优势度得到明显提高,森林空间结构和树种组成更加合理,生物多样性得以保持,与对照相比每 hm^2 年生长量增加 1.4 m^3 以上,年生长率提高了58%。在华北林业实验中心的示范区监测表明,短短3年时间里,示范林与毗邻的农民林地形成了鲜明的对比,经营后的森林健康状况得到了明显改善,森林结构得到了有效调整,森林的质量和生产力得到了很大的提升^[72]。目前甘肃小陇山森林可持续经营的作业设计规定必须采用结构化森林经营,北京市国有林场发展规划(2016—

2025)中积极鼓励各林场推广应用结构化森林经营培育健康稳定森林。结构化森林经营技术及其数据调查2个行业标准已经通过专家审定,不久将颁布实施^[73],从而使结构化森林经营的推广应用有章可循、有规可依,为进一步大力推广提供了基础和可能。如此显著的成效,更加坚定了林业人的信心,推广应用面积逐步加大,并在生产实践中,总结出了一套易懂、易操作的“五字一句话”口诀——“观、测、筛、选、定,五观五优一审轻”,极大地方便了林业科技人员对该技术的理解与应用。西北林区的基层林业工作者在应用结构化森林经营技术后总结到:结构化森林经营技术调查内容科学严谨、使用设备经济常规、获取数据便捷准确、分析结果直观可靠、制定方案清晰可行、操作方法简单易学,经济成本低,能够以最快捷的方式得到最理想的结果,是一项为创新型国家真正添绿的实用新技术、新成果,具有广阔应用前景。

3 展望

3.1 结构化森林经营是精准提升森林质量的有效途径

世界林业正在由传统林业向现代林业转变,中国林业也正向林业现代化迈进,现代林业的标志之一就是要把森林看成一个同时发挥各种功能的整体,而不是把森林切割成各自发挥某种功能的区域,因此现代林业必然要以现代森林经营技术为支撑^[5]。根据系统论中结构决定功能的系统法则,森林生态系统持续发挥功能的必要条件是具有合理的结构,因此经营森林系统的切入点就是调整森林结构。结构化森林经营这种扎根于中华大地的现代森林经营理论与技术体系,一经诞生就产生强大的生命力和巨大的生产力。从长远的角度来看,大面积推广应用结构化森林经营理论与技术,可有效提升我国森林质量,并缓解森林资源可持续发展与利用之间的矛盾,无疑将对全球的森林经营产生巨大影响。

3.2 结构化森林经营是针对目的树单木经营的高度集成技术,符合现代森林经营发展方向

无论是欧洲语言中的未来木(Z-树)经营^[74-75],还是国文中提及的目标树经营^[3, 76],都涉及到改善目的树种的微环境,可见,针对单木的集约经营是未来森林经营的一个重要发展方向。单木微环境对林木个体未来的发展有着重要的影响,而科学描述和量化单木微环境的方法至关重要。目前点

格局研究中双相关函数 $g(r)$ 和 Ripley 函数^[77] 或 O-ring 函数^[78] 虽可进行尺度变化分析,但无法明了林木微环境,唯有结构化森林经营中基于相邻木关系的方法可以精准量化林木微环境。

3.3 结构化森林经营有望成为解决人工林近自然化转变的有效途径

我国人工林面积世界第一,85%为纯林,与天然林顶极群落的稳定结构(复层、异龄、混交、随机)相比,现有人工林大多稳定性和生产力低下、林分质量和效益不高,内在原因是林分结构简单:林层和树种组成单一、树木同龄、林木大小和格局均匀,等等。而造成简单结构的根源在于长期以来不合理的经营(粗放经营、科技含量低)和利用(皆伐轮伐)。为了更好地发展、经营和改造人工林,促进人工林生态系统的健康稳定,必须清楚地探究现实人工林为什么不能持续经营的原因与机理。人工林的近自然化经营是解决人工林稳定性和可持续的关键。结构化森林经营虽源于对天然林的优化经营,但由于其能不断的优化林分结构如林分分布格局、树种混交、大小空间配置和林分拥挤程度等因子,所以同样适合于人工林的结构优化,有望成为解决人工林近自然化转变的有效途径。

3.4 结构化森林经营应用的广泛性基于严谨的科学性和应用简单化

结构化经营可以解决森林经营中的许多问题,归功于其先进科学的方法。而在林分状态问题很多时,时下所采用的目标树经营技术将受到限制^[4],尤其面对我国森林现状,仅靠在每公顷林地上经营几十株目标树的方法值得商榷,而结构化森林经营面向林分中众多目的树中大径木的培育才是恰当的选择。目前结构化森林经营在西北天然林优化经营模式(3大类20种)中得到成功应用^[79]。可以预料,森林结构多样性测度仪及其相关软件的研制成功可快速实现结构化经营应用操作简单化,林业基层人员仅通过外业点抽样调查,就可获得林分基本测树因子(空间与非空间的信息)一览表、林分状态分析结果、经营诊断书(经营问题及经营方向)以及经营措施建议报告等,这将极大方便基层林业技术人员进行健康稳定森林的培育。

3.5 结构化森林经营中林分空间结构参数综合评价势在必行

林分空间结构参数之间既是相互独立,又是相互联系、相互制约的有机整体。可见,把林分空间结

构的4个方面作为整体来分析和研究林分空间结构的特征与变化,将能更全面科学地表征森林的结构与功能质量。以往通过单独分析这4个空间结构参数来分别阐述林分空间结构特征的研究中,尽管有将其作为整体来考量的意识,譬如把林分空间结构引入林分择伐规则,基于运筹学中多目标规划的乘法基本思想建立林分择伐空间优化模型^[27, 80];或直接以林分空间结构为目标函数,以空间和非空间指标为约束,以单株择伐的方式使林分空间结构达到最优^[5, 46, 56]。这些研究都是基于空间结构优化的林分经营模型,并不是专门作为量化综合指标来反映不同森林类型的林分空间结构优劣程度,很难直接用来评价、比较不同森林类型的林分空间结构的优度。也有文献借鉴微观经济学中的柯布-道格拉斯生产函数边际递减效益的思想,基于3个林分空间结构参数(混交度、大小比数和角尺度)构建了以林分空间结构参数为“投入”与林分空间结构为“产出”的林分空间结构生产函数,即林分空间结构指数,并以林分空间结构距离作为描述林分空间结构的综合指标,这为量化研究林分的结构和功能提供了有益参考^[81]。新近的基于单位圆的林分状态分析方法^[57],将有助于解决结构参数综合评价问题。

参考文献:

- [1] Keith H, Lindenmayer D, Mackey B, *et al.* Managing temperate forests for carbon storage: impacts of logging versus forest protection on carbon stocks[J]. *Ecosphere*, 2014, 5(6): 1-34.
- [2] 尹伟伦. 全球森林与环境关系研究进展[J]. 福建林学院学报, 2015, 35(1): 1-7.
- [3] 国家林业局. 全国森林经营规划(2016—2050年)[R]. 北京: 国家林业局, 2016.
- [4] 惠刚盈,等. 结构化森林经营原理[M]. 北京: 中国林业出版社, 2016.
- [5] 惠刚盈,等. 结构化森林经营[M]. 北京: 中国林业出版社, 2007.
- [6] Gadov K v, Zhang C Y, Wehenkel C, *et al.* Forest structure and diversity[M]// *Continuous Cover Forestry*: Springer Netherlands, 2012, 29-83.
- [7] Gayer K. *Der Waldbau*. vierte, verbesserte Auflage edition[M]. Berlin: Verlagsbuchhandlung Paul Parey, 1898.
- [8] Müller A. *Der Dauerwaldgedanke: sein Sinn und seine Bedeutung* [M]. Berlin: Springer, 1922.
- [9] Krutzsch H. *Der naturgemäße Wirtschaftswald, Begriffsbestimmung, Zweck und Ziel*[J]. *Allg Forstzeitschr*, 1950, 5: 85-87.
- [10] Franklin J F. *Toward a new forestry*[J]. *American Forests*, 1989, 95(11): 37-44.
- [11] Robertson F D. *Ecosystem management of the national forests and*

- grasslands[R]. Washington, D. C. USDA Forest Service, 1992: 1330-1.
- [12] 韩士德. 结构化森林经营理论与技术创新纪实[N]. 科技日报, 2015-08-12(8).
- [13] 沈国舫, 瞿明普. 森林培育学(第2版)[M]. 北京: 中国林业出版社, 2011.
- [14] 亢新刚. 森林经理学[M]. 北京: 中国林业出版社, 2011.
- [15] Pommerening A. Evaluating structural indices by reversing forest structural analysis[J]. *Forest Ecology and Management*, 2006, 224(3): 266-277.
- [16] Gadow K v. Forsteinrichtung: analyse und entwurf der Waldentwicklung[M]. Göttingen: Universitätsverlag Göttingen, 2005.
- [17] 宋永昌. 植被生态学[M]. 上海: 华东师范大学出版社, 2001.
- [18] Stamatellos G, Panourgias G. Simulating spatial distributions of forest trees by using data from fixed area plots[J]. *Forestry*, 2005, 78(3): 305-312(8).
- [19] Gadow K v, Fuldner K. Zur Methodik der Bestandesbeschreibung [R]. Vortrag anlässlich der Jahrestagung der AG Forsteinrichtung in Klieken b. Dessau., 1992.
- [20] Aguirre O, Hui G Y, Gadow K v, *et al.* An analysis of spatial forest structure using neighbourhood-based variables[J]. *Forest Ecology and Management*, 2003, 183(1-3): 137-145.
- [21] Albert M. Analyse der eingriffsbedingten Strukturveränderung und Durchforstungsmodellierung in Mischbeständen [M]. Göttingen: Hainholz-Verlag, 1999.
- [22] Fuldner K. Strukturbeschreibung von Buchen-Edellaubholz-Mischwäldern[M]. Göttingen: Cuvillier Verlag, 1995.
- [23] Graz F P. The behaviour of the species mingling index M_{sp} in relation to species dominance and dispersion[J]. *European Journal of Forest Research*, 2004, 123(1): 87-92.
- [24] Hui G, Albert M. Stichprobensimulationen zur Schätzung nachbarschaftsbezogener Strukturparameter in Waldbeständen[J]. *Allgemeine Forst- u Jagdzeitung*, 2004, 175: 199-209.
- [25] Neumann M, Starlinger F. The significance of different indices for stand structure and diversity in forests [J]. *Forest Ecology and Management*, 2001, 145(1-2): 91-106.
- [26] Pommerening A. Approaches to quantifying forest structures[J]. *Forestry*, 2002, 75(3): 305-324.
- [27] 汤孟平. 森林空间结构分析与优化经营模型研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2003.
- [28] 胡艳波, 惠刚盈, 戚继忠, 等. 吉林蛟河天然红松阔叶林的空间结构分析[J]. *林业科学研究*, 2003, 16(5): 523-530.
- [29] Gadow K v, Hui G Y. Characterizing forest spatial structure and diversity[C]. *Proc of the SUFOR International Workshop: Sustainable Forestry in Temperate Regions*. weden, 2002, 20-30.
- [30] 惠刚盈, Von Gadow K. 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.
- [31] Wang H X, Zhang G Q, Hui G Y, *et al.* The influence of sampling unit size and spatial arrangement patterns on neighborhood-based spatial structure analyses of forest stands [J]. *Forest Systems*, 2016, 25(1): 1-9.
- [32] Corral-Rivas J J, Wehenkel C, Castellanos-Bocaz H A, *et al.* A permutation test of spatial randomness: application to nearest neighbour indices in forest stands [J]. *Journal of Forest Research*, 2010, 15(4): 218-225.
- [33] Graz F. Spatial diversity of dry savanna woodlands [J]. *Biodivers & Conservation*, 2006, 15(4): 1143-1157.
- [34] Graz F P. The behaviour of the measure of surround in relation to the diameter and spatial structure of a forest stand [J]. *European Journal of Forest Research*, 2008, 127(2): 165-171.
- [35] 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.
- [36] 汤孟平. 森林空间结构研究现状与发展趋势[J]. *林业科学*, 2010, 46(1): 117-122
- [37] 赵中华, 惠刚盈, 袁士云, 等. 小陇山锐齿栎天然林空间结构特征[J]. *林业科学*, 2009, 45(3): 1-6.
- [38] 惠刚盈, 张连金, 胡艳波, 等. 林分拥挤度及其应用[J]. *北京林业大学学报*, 2016, 38(10): 1-6.
- [39] 胡艳波, 惠刚盈. 基于相邻木关系的林木密集程度表达方式研究[J]. *北京林业大学学报*, 2015, 37(9): 1-8.
- [40] 惠刚盈. 角尺度——一个描述林木个体分布格局的结构参数[J]. *林业科学*, 1999, 35(1): 37-42.
- [41] Hui G Y, Gadow K v. Das Winkelmass-Theoretische Überlegungen zum optimalen Standardwinkel[J]. *Allgemeine Forstund Jagdzeitung*, 2002, 173(9): 173-177.
- [42] Zhao Z H, Hui G Y, Hu Y B. Testing the significance of different tree spatial distribution patterns based on the uniform angle index [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2014, 44(11): 1419-1425.
- [43] 赵中华, 惠刚盈, 胡艳波, 等. 角尺度判断林木水平分布格局的新方法[J]. *林业科学*, 2016, 52(2): 10-16.
- [44] 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.
- [45] 惠刚盈, 胡艳波, 赵中华. 基于相邻木关系的树种分隔程度空间测度方法[J]. *北京林业大学学报*, 2008, 30(4): 131-134.
- [46] 胡艳波. 基于结构化森林经营的天然异龄林空间优化经营模型研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2010.
- [47] 袁士云, 张宋智, 刘文桢, 等. 小陇山辽东栎次生林的结构特征和物种多样性[J]. *林业科学*, 2010, 46(5): 27-34.
- [48] 娄明华, 汤孟平, 仇建习, 等. 基于相邻木排列关系的混交度研究[J]. *生态学报*, 2012, 32(24): 7774-7780.
- [49] Hui G, Zhao X, Zhao Z, *et al.* Evaluating tree species spatial diversity based on neighborhood relationships [J]. *Forest Science*, 2011, 57(4): 292-300.
- [50] 胡艳波, 惠刚盈. 一种新的基于混交度的林木种群分布格局测度方法[J]. *北京林业大学学报*, 2015, 37(1): 9-14.
- [51] Li Y, Hui G, Zhao Z, *et al.* The bivariate distribution characteristics of spatial structure in natural Korean pine broad-leaved forest [J]. *Journal of Vegetation Science*, 2012, 23(6): 1180-1190.
- [52] 白超. 空间结构参数及其在锐齿栎天然林结构动态分析中的应用[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2016.
- [53] 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): 1-8.
- [54] 周红敏, 惠刚盈, 赵中华, 等. 森林结构调查中最适样方面积和

- 数量的研究[J]. 林业科学研究,2009,22(4):482-485.
- [55] 王宏翔,惠刚盈,张弓乔,等. 基于空间结构调查的林分密度估计[J]. 应用生态学报,2014,25(7):1912-1918.
- [56] 张弓乔. 基于林分状态的试验设计与经营优化[D]. 北京:中国林业科学研究院,2015.
- [57] 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.
- [58] 夏富才. 长白山阔叶红松林植物多样性及其群落空间结构研究[D]. 北京:北京林业大学,2007.
- [59] 安慧君. 阔叶红松林空间结构研究[D]. 北京:北京林业大学,2003.
- [60] 赵中华. 基于林分状态特征的森林自然度评价研究[D]. 北京:中国林业科学研究院,2009.
- [61] 倪静,宋西德,张永,等. 永寿县刺槐人工林空间结构研究[J]. 西北林学院学报,2010,25(3):24-27.
- [62] 郝江勃,王孝安,郭华,等. 黄土高原柴松群落空间结构[J]. 生态学杂志,2010,29(12):2379-2383.
- [63] 李纪亮. 宝天曼栎类天然次生林林分结构量化分析[D]. 郑州:河南农业大学,2008.
- [64] 岳永杰. 北京山区防护林优势树种群落结构研究[D]. 北京:北京林业大学,2008.
- [65] 赵阳,余新晓,黄枝英,等. 北京西山侧柏水源涵养林空间结构特征研究[J]. 水土保持研究,2011,18(4):183-188.
- [66] 刘凤芹,曹云生,杨新兵,等. 冀北山区华北落叶松桦木混交林空间结构分析[J]. 内蒙古农业大学学报:自然科学版,2011,32(3):32-38.
- [67] 孟成生,汪林华,杨新兵,等. 冀北山地油松蒙古栎混交林空间结构特征研究[J]. 河北农业大学学报,2011,34(6):30-35.
- [68] 付春风,刘素青. 雷州半岛红树林空间结构研究[J]. 华南农业大学学报,2009,30(3):55-58.
- [69] 李建军,李际平,刘素青,等. 红树林空间结构均质性指数[J]. 林业科学,2010,46(6):6-14.
- [70] 郑丽凤,周新年. 择伐强度对中亚烈带天然针阔混交林林分空间结构的影响[J]. 武汉植物学研究,2009,27(5):515-521.
- [71] 赵洋毅,王克勤,陈奇伯,等. 西南亚热带典型天然常绿阔叶林的空间结构特征[J]. 西北植物学报,2012,32(1):187-192.
- [72] 李松龄,王建兰. 培育健康的森林难不难? 结构化经营破题![N]. 中国绿色时报,2015-08-11(1).
- [73] 中国林业网. “结构化森林经营技术规程”等两行业标准通过审定[O/L]. 2016.
- [74] Abetz P u, Klädtke, J, Die Df-2000-eine Entscheidungshilfe für Durchforstungen[J]. AFZ/Der Wald 2000, 9: 454-455.
- [75] Klädtke J, Konstruktion einer Z-Baum-Ertragstafel am Beispiel der Fichte[D]. Freiburg: Universität Freiburg. 1992.
- [76] 陆元昌,雷相东,洪玲霞,等. 近自然森林经理计划体系技术应用示范[J]. 西南林学院学报,2010,30(2):1-6.
- [77] Ripley B D. Modelling spatial patterns[J]. Journal of the Royal Statistical Society, 1977,39(2):172-212.
- [78] Wiegand T, Kissling W D, Cipriotti P A, et al. Extending point pattern analysis for objects of finite size and irregular shape[J]. Journal of Ecology, 2006, 94(4): 825-837.
- [79] 惠刚盈,赵中华,胡艳波,等. 我国西北主要天然林经营模式设计[J]. 林业科学研究,2016,29(2):155-161.
- [80] 李建军,张会儒,刘帅,等. 基于改进 PSO 的洞庭湖水源涵养林空间优化模型[J]. 生态学报,2013,33(13):4031-4040.
- [81] 董灵波,刘兆刚,马妍,等. 天然林林分空间结构综合指数的研究[J]. 北京林业大学学报,2013,35(1):16-22.

(责任编辑:彭南轩)