

林木自然整枝研究的现状与方法

玉 宝

(国家林业和草原局管理干部学院, 北京 102600)

摘要: 分析了自然整枝的研究现状, 探讨了现有研究的局限性, 提出了自然整枝过程研究方法, 为森林抚育采伐、自然整枝规律研究提供了理论依据。研究表明: 目前研究以人工林林分结构(非空间结构)与自然整枝关系以及自然整枝影响因子为主, 对自然整枝机理和自然整枝时间规律的研究尚属空白, 需要深入研究天然林自然整枝过程、空间结构对自然整枝的影响; 缺乏通用研究方法, 在研究指标中缺失表征自然整枝时间规律的指标, 难以支撑自然整枝过程规律研究。枝条年龄和枝叶含水率2个指标能够弥补传统指标的不足, 可用于枝条生长规律、枯枝形成和脱落时间规律研究。分析树冠垂直结构、不同类型枝条分布特征和组成比例、不同类型枝条年龄和含水率变化规律以及与自然整枝的关系, 对揭示自然整枝机理、自然整枝时间规律有积极意义。

关键词: 自然整枝; 林分结构; 枝条分类; 树枝年龄; 含水率

中图分类号: S753

文献标志码: A

文章编号: 2095-1914(2026)03-0001-06

引文格式: 玉宝. 林木自然整枝研究的现状与方法 [J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2026, 46(3): 1-6. Yu B. Research Status and Methods of Natural Pruning in Forest Trees[J]. Journal of Southwest Forestry University, 2026, 46(3): 1-6. DOI: [10.11929/j.swfu.202506007](https://doi.org/10.11929/j.swfu.202506007)



Research Status and Methods of Natural Pruning in Forest Trees

Yu Bao

(National Academy of Forestry and Grassland Administration, Beijing 102600, China)

Abstract: Summarize the current research status of natural pruning, analyze the limitations of existing research, propose research methods for natural pruning process, and provide theoretical basis for forest nurturing and natural pruning law research. Research suggests that current studies mainly focus on the relationship between the stand structure (non spatial structure) of artificial forests and natural pruning, as well as the influencing factors of natural pruning. There is still a lack of research on the mechanism and timing of natural pruning, and further research is needed on the natural pruning process of natural forests and the impact of spatial structure on natural pruning; Lack of universal research methods and absence of indicators that characterize the natural pruning time pattern in research indicators, making it difficult to support the study of natural pruning process patterns. The two indicators of branch age and leaf moisture content can compensate for the shortcomings of traditional indicators and can be used for studying the growth patterns of branches, the formation and shedding time of dead branches. The study proposes a method for branch classification and crown stratification, which divides branches into three categories based on their moisture content and leaf volume: live branches, semi dead branches, and dead branches; There are three types of branches: full leaf branches, half leaf branches, and no leaf branches. Divide the vertical layer of the tree crown into three layers: full leaf branch layer, half leaf branch layer, and no leaf branch layer. Re-

收稿日期: 2025-06-09; 修回日期: 2025-07-06

基金项目: 国家林业和草原局“百千万人才工程”省部级人选培养经费资助。

作者简介: 玉宝(1976—), 男, 博士, 研究员。研究方向: 森林培育理论与技术、森林可持续经营理论与技术、干部教育培训理论与方法等。Email: nmlyb8@sina.com。

search has shown that analyzing the vertical structure of tree crowns, the distribution characteristics and composition ratios of different types of branches, the age and moisture content changes of different types of branches, and their relationship with natural pruning have positive significance in revealing the mechanism and timing of natural pruning.

Key words: natural pruning; stand structure; branch classification; branch age; moisture content

自然整枝是指幼林郁闭以后, 林木树冠下部的枝条由于受到上部枝条遮荫, 受光不足, 随着年龄的增长逐渐衰退并枯死脱落的现象^[1-2]。自然整枝对林分结构、林分生长、木材质量、林下植物多样性、土壤理化性质等方面均有重要影响。在国外, 主要研究夏栎 (*Quercus robur*)^[3-5]、欧洲赤松 (*Pinus sylvestris*)^[6]、欧洲山毛榉 (*Fagus sylvatica*)^[5,7]、南洋杉 (*Araucaria angustifolia*)^[8] 等树种的自然整枝。在国内, 主要研究山桐子 (*Idesia polycarpa*)、杉木 (*Cunninghamia lanceolata*)、米老排 (*Mytilaria laosensis*)^[9-11]、楸树 (*Catalpa bungei*)^[12]、西南桦 (*Betula alnoides*)^[13-15]、兴安落叶松 (*Larix gmelinii*)、白桦 (*Betula platyphylla*)、山杨 (*Populus davidiana*)、毛白杨 (*Populus tomentosa*)、水曲柳 (*Fraxinus mandshurica*)^[16-17] 等树种的天然整枝。目前研究以人工用材林研究为主, 天然林研究少^[18-20], 以预测模型研究多, 长期观测研究少, 自然整枝影响因子的研究多, 自然整枝过程的研究少, 特别是自然整枝时间规律的研究未见报道, 亟待加强该领域的研究。但因现研究方法的局限性, 难以支撑进一步系统研究, 需要创新研究方法, 构建更加科学的自然整枝指标体系和量化值, 从而解析自然整枝时间规律。

林木分枝特性和自然整枝规律是人工整枝的理论基础^[2], 通过研究自然整枝规律为确定人工整枝时间、整枝强度^[21] 提供技术支撑。自然整枝是林分结构的合理性和林分质量高低的评价指标之一。从自然整枝过程规律和机理中, 可以找到林分结构优化、抚育经营、近自然化经营的技术措施。人工林自然整枝规律对生态公益林、次生林等林种并不适应, 代表性和适用性差。只有从天然林自然整枝规律入手, 才有效避免人工干扰因素, 能够破解自然整枝过程和机理。本研究综述自然整枝研究现状, 针对现研究中存在的不足提出新的研究思路和方法, 旨在为自然整枝研究和森林抚育提供理论依据。

1 自然整枝研究现状

自然整枝是人工抚育的重要依据。人工林自然

整枝达到树高的 1/3 (树冠长度/树高) 时, 林分开始自疏, 应进行抚育采伐^[22-24]。目前, 自然整枝规律的研究主要集中在林分结构对自然整枝的影响^[18-19]、抚育对自然整枝的影响^[7]、林分密度与自然整枝的关系^[11,14,24-25]、林木节子分布及变色规律^[3,9-10,12-13,16-17]、光照对自然整枝的影响^[15]、树冠生长规律及预测模型^[8,26-27]、胸径与自然整枝的关系^[4,8]、自然整枝预测模型^[5,28-29] 等方面。研究中使用的主要指标有: 枝下高、冠幅、枝条直径和长度、枝条死亡率、枝条数量、分枝角^[5-6,9,14,18-19,25,28-29], 枝下高 (活枝、死枝) 占树高比例^[18-19], 活枝下高与死枝下高差^[18-19]; 树冠比率 (树冠长度/树高)、树冠宽度/树冠长度比值^[24], 树冠长度、树冠投影面积、林分材积生长速率^[6] 等。

自然整枝受林分结构、林木生物学和生态学特征等诸多因子的综合影响, 过程十分复杂。掌握自然整枝规律是确保人工整枝科学性的前提。目前, 自然整枝规律研究仍缺乏系统性, 有诸多待解决的问题, 需要深入研究形成成熟的理论与技术。主要体现在: 在研究方向上, 以人工用材林的人工整枝为主^[30], 主要目的是为获得更多无节材提供支撑。人工林树种单一、结构简单, 研究人工林获得的结论有片面性, 对生态公益林和次生林的抚育经营难有参考价值。人工林自然整枝是在人为设计下形成的规律, 体现人为属性, 与造林设计、抚育经营措施有关, 林分结构是否合理决定其自然整枝的好坏。天然林结构复杂, 以复层异龄林居多, 水平结构、垂直结构、天然更新、植物多样性、空间利用率等方面较人工林有诸多优势^[31-33]。天然林特别是原始林未经人为干扰, 其自然整枝规律是在自然状态下形成的规律, 自然属性更加凸显。研究天然林获得的结论具有广泛性, 能够揭示自然整枝机理, 对不同林种均有参考价值。通过系统研究天然林自然整枝可以全面揭示自然整枝规律, 因此有待加强天然林自然整枝规律的研究。在研究内容上, 以林分结构与自然整枝关系为主。例如, 胸径、树高、林分密度、林龄与整枝强度间关系等, 这些研究侧重于林分或林木某个年龄节点的自然整枝特征, 并

不属于过程性研究。对树冠生长、分枝特性、枝条生长规律、自然整枝强度动态变化方面缺乏研究^[20]。尤其对枝条生长衰退、形成枯枝和脱落时间规律等关键技术的研究仍属空白。因此, 目前的研究仅能揭示阶段性特征, 无法揭示自然整枝过程规律, 形成的理论与方法指导生产有限。在研究方法上, 采用以试验样地和样木调查为主的临时样地调查法, 即以调查临时样地和空间代替时间方法为主, 缺乏通用或适用性广的研究方法。当研究对象不同或者林分结构和林木生长发生变化时, 其表现特征也会不同。另外, 在现研究中应用的自然整枝指标种类不少, 但缺乏能够表征自然整枝时间规律的指标。尽管有学者依据节子形成时间^[10]和变色时的直径大小^[16-17]规律, 分析自然整枝特征, 提出人工整枝时间和整枝强度。但该项研究需要开展树干解析、工作量大, 无法分析枝条枯死和脱落规律, 难以判别林分结构因子对自然整枝的影响。林木自然整枝是一个缓慢的过程, 尽管可以采用空间代替时间的方法得出一定规律, 但依据现研究方法, 无法揭示自然整枝过程规律。需要创新研究方法, 选定适合不同林种和树种自然整枝规律研究的通用方法。

综上所述, 自然整枝规律是人工整枝的理论基础和重要依据, 与林木特征和林分结构有关^[18-20]。自然整枝质量直接影响木材质量, 也是林分结构合理与否的表现^[19,34]。研究自然整枝规律对森林抚育、森林结构优化、人工林近自然化改造具有重要意义。目前在森林经营中存在重视人工整枝而忽视自然整枝的问题^[19]。在掌握自然整枝机理的基础上, 注重自然修复原则, 充分利用自然力量, 提升森林自然整枝能力, 降低抚育成本是亟待解决的重要课题^[19-20,34]。当前, 对林分结构与自然整枝关系以及主要影响因子的研究比较深入, 而对自然整枝进程规律的研究不系统, 缺乏自然整枝机理研究, 尤其是枝条生长规律、枯枝形成和脱落时间规律方面的研究^[19]尚属空白。需要完善研究方法和指标体系, 通过系统研究天然林自然整枝揭示这些规律。

2 自然整枝的研究方法

林木自然整枝过程分为枝条枯死、枝条脱落、死枝残桩为树干所包合等3个阶段^[1-2]。其中, 前2个阶段的研究是关键。树冠下部枝条生长衰退和枯死速度与林木年龄、林分密度的关系密切。枝条脱落是由于生物、物理和化学等综合因子促成的。例如, 真菌和昆虫的寄生、温暖潮湿气候、树种习性、死枝直径大小等^[1-2]。林分因子或林木因子对自然整枝的影响, 均体现在枝条的生长上。针对上

述问题, 本研究围绕林木枝条生长规律, 提出自然整枝过程的研究方法。

2.1 枝条分类

在目前的研究中, 将枝条根据其生长状况分为活枝、枯枝(死枝)2类。此分类方法, 不能满足系统研究的需要, 有必要详细进行分类便于研究分枝特性、枝条生长规律、树冠生长特征, 为分析自然整枝过程、破解自然整枝时间规律提供重要信息。在自然整枝过程中, 一般经过枝条生长衰退、枝条部分叶脱落、枝条一部分枯死、完全枯死成枯枝(死枝)、枯枝脱落等过程。根据枝条枯萎程度或含水率将枝条可分为活枝、半枯枝、枯枝(死枝)3类。枝条上的叶量是枝条生长活力的重要表现。根据枝条上的叶量, 将枝条可分为全叶枝、半叶枝、无叶枝3类。其中, 全叶枝(活枝)是指分布于树冠中上部的枝条, 生长正常, 未出现衰退状态, 叶子无脱落。半叶枝(半枯枝)是指分布于树冠中下部的枝条, 生长出现衰退状态, 叶子部分脱落。无叶枝(枯枝)是指分布于树冠下部的枝条, 生长已停止, 叶子全部脱落。

综上所述, 可将树冠垂直层面划分为3层, 最上层为全叶枝(活枝)层, 中间层为半叶枝(半枯枝)层, 最下层为无叶枝(枯枝)层(图1)。树冠垂直层面由下而上经过全部为无叶枝、无叶枝逐渐减少并消失、半叶枝出现、半叶枝逐渐减少并消失、全叶枝出现、全叶枝逐渐增多、全部为全叶枝等逐渐变化的过程。随着自然整枝, 最下层的枯枝不断脱落, 并出现新的枯枝, 中间层也不断出现新的半枯枝, 林木枝下高逐渐上升。树冠中全叶枝、半叶枝和无叶枝组成结构和比例能够表明树冠生长和自然整枝特征, 与树种、林木年龄、林分结构以及林分发育阶段有关系。随着这些因素的不同, 自然整枝表现特征也不同。

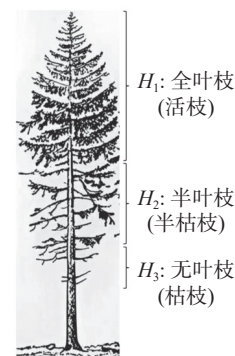


图1 不同类型枝分布示意图

Fig. 1 Schematic diagram of distribution of different types branches

2.2 调查分析指标

2.2.1 树枝年龄测定

自然整枝时间规律是研究自然整枝的关键技术问题。对科学安排人工整枝时间具有参考价值,为森林抚育经营提供技术支撑。目前的研究缺乏自然整枝时间规律的表征指标,主要应用枝直径、长度和节子3个指标研究相关规律,而忽略了枝年龄因子的重要指示性作用。树枝年龄能够表征分枝特性和树枝生长规律,目前有关树枝年龄与自然整枝关系的研究未见报道。通过分析全叶枝、半叶枝和无叶枝不同类型枝条组成比例与其年龄关系,解析林木和林分因子影响自然整枝过程,发现枝条由活枝(全叶枝)变成枯枝(无叶枝)的生长过程或从分枝到枯死脱落的动态变化规律。从而揭示自然整枝时间规律,可以确定树枝生长开始衰退年限、开始枯萎年限、枯死年限、脱落年限等。

2.2.2 树枝和树叶含水率测定

一般在树冠生物量生产力的研究^[27,35]中会涉及树枝和树叶含水率的测定,相关研究屡见不鲜,但自然整枝与树枝和树叶含水率的关系研究尚未见报道。树冠下部枝条和叶含水量能够指示其生长活力,从含水率变化中解析树枝生长衰退或枯萎规律。随着枝条生长开始衰退,其枝叶含水率也将变化,通过研究活枝、半枯枝、枯枝不同类型枝条和其叶含水率范围、表现特征,从而解析自然整枝过程。

2.2.3 林分空间结构因子

自然整枝是表征林木生长和林分结构合理性的重要指标^[20]。林分结构包括空间结构和非空间结构^[33]。目前,主要围绕胸径、树高、年龄、林分密度等以非空间结构与自然整枝关系的研究为主,对林木分布格局、垂直层次、垂直结构、空间利用率^[31-32]等空间结构与自然整枝关系的研究鲜见报道。不同密度和林木分布格局的林分自然整枝有显著差异^[19]。自然整枝影响因子之间的关系比较复杂,密度对自然整枝的影响程度除了密度范围之外取决于林木分布格局,因此必须把两者结合起来分析。林分密度和聚集系数增大,能够促进自然整枝,加速枯枝脱落^[18-19]。通过调查林分水平结构和垂直结构因子,分析不同结构林分自然整枝特征,揭示各因子影响自然整枝的规律。例如,在水平空间结构上,林木分布格局(聚集系数)影响自然整枝。相邻木的干扰对自然整枝有影响,相邻木树冠的挤压能够促进目标树的自然整枝。相邻木的具体方位与水平空间结构有关。再如,在垂直结构上,复层林垂直分布

特征对自然整枝有影响。垂直郁闭的复层异龄林较水平郁闭的单层同龄林更有利于上层林木的自然整枝^[34]。通过混交形成垂直郁闭的森林,能够提高空间利用率,促进伴生树对目标树的自然整枝,促进下层木对上层木的自然整枝^[20,32,34,36]。

2.3 调查方法

分别调查天然林(原始林、次生林)和人工林自然整枝情况。分析不同起源森林自然整枝规律以及主要影响因子,并比较分析自然整枝过程差异性。通过探讨天然林自然整枝规律为人工林抚育经营提供技术支撑。具体调查方法如下:

1) 样地调查。以固定样地调查为主,临时样地调查为辅,选定样木长期观测和以空间代替时间的方法,调查林分因子、林木因子和枝条生长特性。每木调查时,主要测量指标为胸径、树高、年龄、树冠生长、每木相对坐标等。其中,树冠调查指标为冠长、冠幅、树冠各层(全叶枝层、半叶枝层、无叶枝层)长度比例、活枝下高、枯枝下高等。其中,活枝下高是指从地面到树冠下部在4个方向中第1个活枝的高度。枯枝下高是指从地面到树冠下部在4个方向中第1个枯枝的高度。

2) 树枝年龄测定。从树冠各层最下部中分东西南北4个方向各取1个枝(从地面到树冠各层下部的4个方向各取第1个枝),即每层各截取4个枝,每株共12个枝。分别测定全叶枝(活枝)、半叶枝(半枯枝)、无叶枝(枯枝)不同类型枝的年龄、直径和枝长等因子。利用枝直径、枝长、年龄建立相关模型,预测自然整枝过程。

测定树枝年龄方法:树枝基部年轮数就是树枝年龄,代表分枝后生长的年限。首先,从树枝基部处截取枝条。截锯树枝应尽量与枝轴垂直,不可倾斜。其次,查数年轮个数。必要时将树枝基部锯面刨光,并通过髓心划出东西、南北2条直径线,然后由髓心向外查数年轮个数。

3) 树枝和树叶含水率测定。从树冠各层最下部中分东西南北4个方向各取1个枝(从地面到树冠各层下部的4个方向各取第1个枝),即每层各截取4个枝,每株共12个枝。将枝和叶分别带回实验室,在105℃下烘干至恒质量,测定干质量后求算含水率。可结合测定树枝年龄进行。

以上调查时间为6—7月份,必须在生长期完成调查工作,不能在秋季落叶时开展调查。在固定样地中枯枝脱落等个别指标每年调查1次。

4) 林木分布格局。应用方差/均值比率法(V/\bar{X}),

求算林木聚集系数, 检验林木分布格局。

$$V = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{(n-1)} \quad (1)$$

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad (2)$$

式中: n 为样方数; X_i 为第 i 样方样本数; V 为样本方差; \bar{X} 为样本均值。 $V/\bar{X} < 1$ 时, 均匀分布; $V/\bar{X} = 1$ 时, 随机分布; $V/\bar{X} > 1$ 时, 聚集分布。

3 结论与讨论

以往的研究方法适合于人工用材林自然整枝研究, 对其他林种并不适用, 缺乏自然整枝时间规律关键载体和表征指标, 需要创新研究方法。了解分枝特性、枝生长规律、树冠结构是研究自然整枝机理的重要前提。本研究提出枝条年龄和枝叶含水率 2 个新指标, 是对自然整枝规律常规表征指标的重要补充。这 2 个指标便于测定, 可开展枝条年龄、枝叶含水率变化与自然整枝关系的研究, 能够填补相关研究空白, 对揭示自然整枝机理、自然整枝时间规律有积极意义。枝条分类和界定对研究枝条生长、树冠结构和生长规律提供了重要指标因子, 为揭示自然整枝时间规律提供了更多可能性。分析空间结构因子与自然整枝关系, 使自然整枝规律研究更具系统性。例如, 林木分布格局、林分垂直层次结构、空间利用率等水平空间和垂直空间结构对自然整枝的综合影响。本研究提出的方法能够填补传统研究方法, 为进一步系统研究林木自然整枝规律提供理论依据, 具有一定的实用价值。

研究表明, 目前研究人工林自然整枝而得出的理论与技术有局限性、通用性差, 难以系统指导生产, 须加强天然林自然整枝过程研究。详细分类枝条, 剖析树冠垂直结构, 分析不同类型枝条分布特征和组成比例, 为研究自然整枝提供重要信息。依据枝条含水率和枝条叶量, 将枝条分别分为活枝、半枯枝、枯枝 3 类和全叶枝、半叶枝、无叶枝 3 类。并相应地将树冠垂直层面划分为全叶枝层、半叶枝层、无叶枝层 3 层。在研究中介入枝条年龄、枝叶含水率等因子, 分析不同类型枝条年龄和含水率变化规律, 更好地解释自然整枝过程。林分结构对自然整枝的影响研究需要由非空间结构向空间结构转变, 以此使研究更具系统性。本研究就上述调查指标, 围绕样地调查、树枝年龄和枝叶含水率测定提出了具体调查方法。

尽管本研究探讨了自然整枝过程规律的研究思

路和方法, 但缺乏实证数据支撑, 需要在具体试验中进一步论证。例如, 枝条枯萎程度或含水率与枝条上的叶量有直接关系。枝叶含水率是本质, 其枯萎程度或枝上的叶量是表象。因此, 需要进一步明确枝叶含水率与不同类型枝条的对应关系, 界定相应含水率的范围。再如, 在树冠中, 需要界定树冠不同层次的长度比例, 明确全叶枝、半叶枝和无叶枝组成结构和比例的范围等。

[参 考 文 献]

- [1] 叶镜中, 孙多. 森林经营学 [M]. 北京: 中国林业出版社, 1995: 94.
- [2] 孙时轩. 造林学 [M]. 2 版. 北京: 中国林业出版社, 1992: 390.
- [3] Mederski P S, Szczawiński D, Gieffing D F, et al. Knot soundness and occlusion time after the artificial pruning of oak [J]. *Forest Research Papers*, 2019, 80(1): 5–11.
- [4] Szymański M, Pazdrowski W, Kaźmierczak K, et al. Self-pruning of pedunculate oak (*Quercus robur* L.) stems and the diameter at breast height of trees in commercially managed stands [J]. *Forest Research Papers*, 2010, 71(1): 61–73.
- [5] Kint V, Hein S, Campioli M, et al. Modelling self-pruning and branch attributes for young *Quercus robur* L. and *Fagus sylvatica* L. trees [J]. *Forest Ecology and Management*, 2010, 260(11): 2023–2034.
- [6] Mäkinen H. Growth, suppression, death, and self-pruning of branches of Scots pine in southern and central Finland [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 1999, 29(5): 585–594.
- [7] Peter Skovsgaard J, Nordfjell T, Holmgård Sørensen I. Precommercial thinning of beech (*Fagus sylvatica* L.): Early effects of stump height on growth and natural pruning of potential crop trees [J]. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2006, 21(5): 380–387.
- [8] Nutto L, Spatthelf P, Rogers R. Managing diameter growth and natural pruning of *Parana pine*, *Araucaria angustifolia* (Bert.) O Ktze., to produce high value timber [J]. *Annals of Forest Science*, 2005, 62(2): 163–173.
- [9] Qin G M, Hao J, Yang J C, et al. Branch occlusion and discoloration under the natural pruning of *Mytilaria laosensis* [J]. *Forests*, 2019, 10(10): 892.
- [10] 何韦均, 杨锦昌, 郝建, 等. 米老排人工林节子时空分布特征及变色规律 [J]. *浙江农林大学学报*, 2022, 39(4): 814–820.
- [11] 王志海, 尹光天, 杨锦昌, 等. 不同造林密度对米老排人工林枝条发育的影响 [J]. *林业科学研究*, 2019, 32(2): 78–86.
- [12] 关追追, 卢奇锋, 何双玉, 等. 榿树树干节子的空间分布特征及其面积预测模型 [J]. *中南林业科技大学学报*, 2021, 41(10): 20–28.
- [13] Wang C S, Hein S, Zhao Z G, et al. Branch occlusion and discoloration of *Betula alnoides* under artificial and natural pruning [J]. *Forest Ecology and Management*, 2016, 375: 200–210.
- [14] Wang C S, Zhao Z G, Hein S, et al. Effect of planting density on knot attributes and branch occlusion of *Betula alnoides* under natural pruning in Southern China [J]. *Forests*, 2015, 6(4): 1343–1361.
- [15] 骆丹, 王春胜, 曾杰. 西南桦幼林生长与枝条发育对光环境的响应 [J]. *华南农业大学学报*, 2021, 42(4): 83–88.
- [16] 关追追, 冯晨辛, 张彦东. 水曲柳人工林节子愈合与变色特征 [J]. *东北林业大学学报*, 2021, 49(1): 69–73.
- [17] 关追追, 张彦东. 水曲柳节子时空分布特征与变色规律研究 [J]. *北京林业大学学报*, 2020, 42(8): 53–60.
- [18] 玉宝. 大兴安岭天然林白桦和山杨的自然整枝特征 [J]. *森林与环境学报*, 2022, 42(5): 506–513.
- [19] 玉宝. 兴安落叶松天然林自然整枝特征及其影响因素 [J]. *浙江农林大学学报*, 2023, 40(1): 209–216.
- [20] 玉宝. 林木整枝技术研究现状及趋势 [J]. *林业科技*, 2019, 44(5): 54–58.
- [21] 吕坤, 班以琛, 坝仕宏, 等. 基于抚育整枝目标的毛白杨枝条冲击切割性能适应性分析 [J]. *北京林业大学学报*, 2024, 46(4): 158–166.

- [22] 马赤军. 人工杉木中幼林经营措施 [J]. 湖南林业科技, 2005, 32(4): 69-70.
- [23] 张二亮. 蒙古栎近自然培育经营技术 [J]. 中国农业信息, 2015, 27(11): 27.
- [24] 孙洪刚, 张建国, 段爱国. 杉木人工林自然整枝进程研究 [J]. 林业科学研究, 2014, 27(5): 626-630.
- [25] 朱秀征, 靳超, 房丽莎, 等. 不同密度下山桐子自然整枝差异性分析 [J]. 河南科学, 2022, 40(8): 1257-1263.
- [26] Mäkelä A. A carbon balance model of growth and self-pruning in trees based on structural relationships [J]. *Forest Science*, 1997, 43(1): 7-24.
- [27] 玉宝, 乌吉斯古楞, 王百田, 等. 兴安落叶松天然林树冠生长特性分析 [J]. 林业科学, 2010, 46(5): 41-48.
- [28] 马利强, 玉宝, 王立明, 等. 兴安落叶松天然林单木高生长模型 [J]. 南京林业大学学报 (自然科学版), 2013, 37(2): 169-172.
- [29] 朱念福, 张怀清, 崔泽宇, 等. 基于空间结构的杉木枝下高可视化模拟研究 [J]. 南京林业大学学报 (自然科学版), 2022, 46(1): 51-57.
- [30] 江宇, 吴雅琳, 许迪, 等. 修枝对人工林生态系统影响研究进展 [J]. 世界林业研究, 2024, 37(2): 46-52.
- [31] 玉宝, 张秋良, 王立明. 中幼龄兴安落叶松过伐林垂直结构综合特征 [J]. 林业科学, 2015, 51(1): 132-139.
- [32] 玉宝. 林分空间利用率量化方法的研究 [J]. 西南林业大学学报 (自然科学版), 2023, 43(5): 199-204.
- [33] 玉宝, 张秋良, 王立明. 不同起源兴安落叶松林结构特征的比较 [J]. 东北林业大学学报, 2013, 41(2): 18-21.
- [34] 玉宝, 彭华福. 基于自然修复理念的森林经营措施研究 [J]. 西南林业大学学报 (自然科学版), 2023, 43(1): 8-17.
- [35] 玉宝, 张秋良, 王立明, 等. 不同结构落叶松天然林生物量及生产力特征 [J]. 浙江农林大学学报, 2011, 28(1): 52-58.
- [36] 玉宝, 李俊魁, 林树国, 等. 塞罕坝机械林场森林质量提升主要措施及成效 [J]. 国家林业和草原局管理干部学院学报, 2023, 22(3): 5-9,17.

(责任编辑 陆 驰)