

基于熵值法的人工林林木邻体结构优化方法

王博恒^{1,2}, 卢 佶², 王 丹², 赵鹏祥¹, 李卫忠¹, 张国威^{2*}

(1. 西北农林科技大学 林学院, 陕西 杨陵 712100; 2. 国家林业和草原局 华东调查规划设计院, 浙江 杭州 310019)

摘 要:我国人工林普遍存在生产力低、树种单一、结构不合理的问题,亟须开展有效的林分改造和群落重建工作。以黄龙山油松人工林为对象,基于熵值法和贪婪算法对油松人工林林木邻体结构开展模拟优化调整。结果表明:1)人工林样地在模拟优化前,其树种属性、空间距离和大小分化等方面均与天然林样地存在较大差异。2)基于熵值法的邻体结构模拟优化模型可以有效地优化调整人工林中林木的邻体结构,改善人工林的胸径、树高和单木地上生物量等的分布状态,有利于油松人工林向近自然化方向演替。3)基于熵值法的优化调整方法具有良好的适用性,应用范围广泛,权重指标客观,计算逻辑合理,是人工林结构调整的新方法。

关键词:熵值法;邻体结构;模拟试验;油松;人工林

中图分类号:S725.7

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2024)01-0067-06

Entropy Based Optimization Method of Neighborhood Structure for the Individual Plantation Tree

WANG Bo-heng^{1,2}, LU Ji², WANG Dan², ZHAO Peng-xiang¹, LI Wei-zhong¹, ZHANG Guo-wei^{2*}

(1. College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; 2. Eastern China Forest Inventory and Planning Institute of National Forestry and Grassland Administration, Hangzhou 310019, Zhejiang, China)

Abstract: Plantations in China always exist problems, such as low productivity, simple tree species composition and unreasonable structure, which need rational stand transformation and community reestablishment. *Pinus tabulaeformis* plantations occurring in the Huanglong Mountain, Yanan, were taken as the research objects to carry out simulating optimization of individual tree's neighbor structure based on entropy and greedy algorithm method. The results were as follows: 1) the sample plots of the original plantations were different from the plots of natural forests in tree composition, spatial distance and tree size proportion. 2) The simulation optimization model based on entropy method could rationally adjust the neighbor structure among trees and could change the distribution of DBH, tree height and tree's aboveground biomass, which also improved the plantation succession to the near natural direction. 3) The results indicated that the entropy based optimization and adjust method present good adaptability, wide application scope, objective weight index and reasonable calculation logic, it is a new novel method for the adjustment for plantations.

Key words: entropy method; neighbor structure; simulated optimization; *Pinus tabulaeformis*; plantation

人工林是我国森林生态系统中重要的组成部分之一,占我国森林总面积的 36%,在维护区域生态安全、改善区域气候环境等方面具有积极的贡献^[1]。目前我国人工林普遍存在着树种单一、结构简单、病

虫害频发的问题^[1-2],已成为制约人工林发展的主要问题之一。国家林业和草原局在《“十四五”林业草原保护发展规划纲要》中,明确提出要加大人工纯林改造力度。因此,开展森林结构调整研究,是遵循自

收稿日期:2023-01-03 修回日期:2023-07-07

基金项目:国家重点研发计划课题(2016YFD0600203);陕西省林业科学研究重大项目(SHLY-2018-02)。

第一作者:王博恒,博士。研究方向:森林可持续经营。E-mail: vancywang@126.com

* 通信作者:张国威,工程师。研究方向:森林资源监测与调查。E-mail: 77053081@qq.com

然发展规律对低质低效人工林进行林分改造和群落重建的有效途径和理论基础。

林木是森林生态系统发挥功能的最小单元,林木与其相邻个体间的相互作用是森林动态变化的重要驱动力^[3]。邻体间的相互作用塑造了林木的生长、死亡和大小分化等特征,进而极大地影响了林分空间结构的形成^[4-5]。邻体结构^[6]是对目标树及其相邻林木在空间中分布特征的描述,反映了目标树邻域范围内林木的密度、邻体与目标树间的距离及大小关系、邻体树种组成等。开展单木水平的林木结构优化调整,不仅有助于森林经营实践中目标树的培育,也可以为增加林分生产力提供理论和技术依据^[7]。

油松(*Pinus tabulaeformis*)是黄土高原区重要的乡土树种和地带性造林树种,对维护缓解水土流失^[8-10]、小气候改善等具有重要的意义。由于早期造林、经营理论基础缺乏,培育技术落后,目前该地区油松人工林混交度低、结构简单、林下植被生长状况差^[1,11],亟须开展林分改造和群落结构调整等工作。本研究以陕西省延安市黄龙山林区油松人工林为对象,在单木水平上通过熵值法^[12-13]和贪婪算法(greedy algorithm)^[14],提出了一种单木邻体结构模拟优化模型,探讨了油松人工林近自然经营的策略方法,以期为该地区油松人工林的精准经营提供

科学依据和理论方法。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于黄土高原东南部(35°28′46″—36°02′01″N,109°38′49″—110°12′47″E),总面积约19.4万hm²,地势西北高、东南低,地貌以丘陵沟壑为主,林区内的地形破碎化程度较高^[15]。该地区属温带大陆性季风气候,四季分明,昼夜温差大,年平均气温8~12℃,无霜期175d,全年日照时数达到2370h,年平均降水量350~600mm,主要集中于7、8、9月,约占年降水量的60%。黄龙山林区森林资源储量丰富,有林地面积16.8万hm²,活立木蓄积量为602万m³^[16-17],植被覆盖率85%。林区内主要乔木种包括:油松、杜梨(*Pyrus betulifolia*)、海棠(*Malus spectabilis*)、野山楂(*Crataegus cuneata*)、白桦(*Betula platyphylla*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)、辽东栎(*Quercus wutaishansea*)等。

1.2 样地布设与调查

基于实地踏查结果,于2017年7—8月在立地质量、海拔、坡度等条件相似,起源不同的林分中,依据典型取样的方法,分别设置天然林样地1块和人工林样地3块,样地大小均为20m×30m。各样地基本信息见表1。

表1 样地基本信息

Table 1 The basic information of sample plots

样地特征	天然林样地	人工林样地 a	人工林样地 b	人工林样地 c
起源	萌生起源	植苗	植苗	植苗
海拔/m	1 457	1 509	1 844	1 360
坡度/(°)	22	17	13	21
坡位	上坡位	上坡位	中坡位	上坡位
郁闭度(%)	82	86	80	83
林龄/a	42	37	22	30
株数密度/(株·hm ⁻²)	1 517	2 617	2 083	2 217
平均胸径/cm	14.46±8.14	13.37±5.15	14.27±6.33	13.51±5.88
优势木平均高/m	14.26±2.35	13.25±1.12	15.01±1.74	13.40±2.26
树种组成	9 油+茶+杜—白— 棠—辽—杏—楂	9 油+桦+辽—茶—株	9 油+茶+桦—辽—白	10 油—白

注:油、油松;茶、茶条槭(*Acer ginnala*);杜、杜梨;白、白杜(*Euonymus maackii*);棠、海棠;辽、辽东栎;杏、山杏(*Prunus sibirica*),楂、山楂;桦、白桦;株、株木(*Cornus macrophylla*)。

在样地中,分别测定和记录胸径3cm以上所有乔木的树种、胸径、树高、位置(相对坐标)、冠幅等因子。在后续计算邻体结构指数时,人为在样地内部外缘设置2m宽的缓冲带,以消除边缘效应。

1.3 邻体结构评价指标体系的构建

林木的邻体结构从林木与其相邻个体的空间距离关系、大小分化程度和树种属性差异3个维度进行量化,指标体系见图1。

其中,空间距离关系、大小分化程度和树种属性差异维度的评价分别基于2、3和1个指标,各指标的含义和计算公式见表2。

邻体结构中各指标权重的计算基于熵值法,该方法是一种基于信息熵(即信息混乱程度)进行指标权重估计的方法,可以有效避免主观因素对赋权过程的影响,具有客观、高效的优点。为了将人工林单木邻体结构调整至近自然状态,本研究以天然林样

地的邻体结构熵值总得分为参照,通过模拟采伐,将 3 个人工林样地的熵值总得分调整至与天然林样地相近似的状态。天然林和人工林样地的熵值总得分计算方法如下。

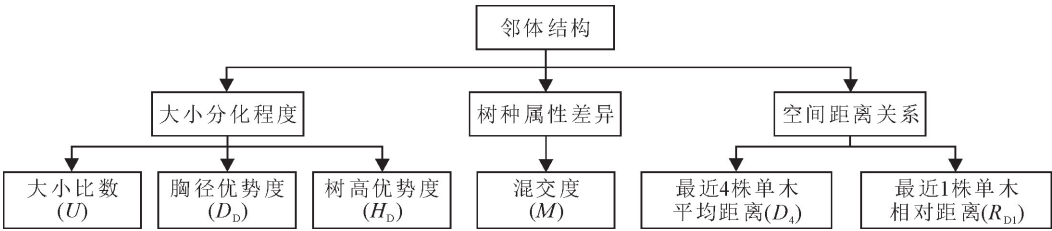


图 1 邻体结构的评价指标体系

Fig. 1 Evaluation system of neighborhood structure

表 2 邻体结构评价指标汇总表

Table 1 Summary table of evaluation index of neighborhood structure

指标名称	含义	计算公式	注释
最近 4 株单木平均距离(D_4)	林木与最近 4 株相邻个体的距离关系	$D_{4i} = \frac{1}{n} \sum_{j=n}^1 d_{ij}$	d_{ij} 为林木 i 到相邻个体 j 的平均距离。
最近 1 株单木相对距离(R_{D1})	林木与最近 1 株相邻个体的相对距离关系	$R_{D1i} = \frac{d_i}{\bar{d}}$	d_i 为林木 i 到其最近相邻个体的距离, \bar{d} 为林分中的所有林木与其最近相邻个体的距离平均值。
大小比数(U) ^[18]	林木与最近 4 株相邻个体的大小优势程度	$U_i = \frac{1}{n} \sum_{j=n}^1 u_{ij}$	u_{ij} 的取值为 0 和 1; 当林木 i 的胸径大于相邻个体 j 的胸径时, u_{ij} 等于 1; 当林木 i 的胸径小于相邻个体 j 的胸径时, u_{ij} 等于 0。
胸径优势(D_D)	林木与最近 4 株相邻个体的胸径比例关系	$D_{Di} = \ln \frac{D_{BHi}^4}{D_{BHi1} \times D_{BHi2} \times D_{BHi3} \times D_{BHi4}}$	D_{BHi} 为林木 i 的胸径; $D_{BHi1} \sim D_{BHi4}$ 分别为最近 4 株相邻个体的胸径。
树高优势度(H_D)	林木与最近 4 株相邻个体的树高比例关系	$H_{Di} = \ln \frac{H_i^4}{H_{i1} \times H_{i2} \times H_{i3} \times H_{i4}}$	H_i 为林木 i 的树高; $H_{i1} \sim H_{i4}$ 分别为最近 4 株相邻个体的树高。
混交度(M) ^[19]	林木与最近 4 株相邻个体的物种隔离程度	$M_i = \frac{1}{n} \sum_{j=n}^1 m_{ij}$	m_{ij} 取值的为 0 和 1; 当林木 i 与相邻个体 j 属同一种时, m_{ij} 为 1; 当林木 i 与相邻个体 j 不属同一种时, m_{ij} 为 0。

1) 将邻体结构评价指标体系使用数据矩阵 X 表示

$$X = \begin{pmatrix} x_{11} & \cdots & x_{61} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{1i} & \cdots & x_{6i} \end{pmatrix} \quad (1)$$

2) 将数据矩阵 X 转换为数据比重矩阵 Y

$$P_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^n x_{ij}} \quad (2)$$
$$Y = \begin{pmatrix} P_{11} & \cdots & P_{i1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{1j} & \cdots & P_{ij} \end{pmatrix} \quad (3)$$

3) 计算每个指标的权重 W_j 、样地熵值总得分 S 和样地熵值平均得分 \bar{S} :

$$K = \frac{1}{\ln m} \quad (4)$$

$$e_j = -K \times \sum_{j=1}^6 P_{ij} \ln P_{ij} \quad (5)$$

$$d_j = 1 - e_j \quad (6)$$

$$W_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^6 d_j} \quad (7)$$

$$S = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^6 W_j \times x_{ij} \quad (8)$$

$$\bar{S} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^6 W_j \times x_{ij} \quad (9)$$

式中: $x_1 \sim x_6$ 为评价指标体系中的 6 个指标; n 为纳入评价指标体系的总样本数; P_{ij} 为第 j 个样本在第 i 个指标的上的比重值; d_j 为第 j 个指标的信息效用价值; e_j 为第 j 个指标的信息熵; K 为常数且与评价指标体系中指标数量有关; m 为评价指标体系中指标数量, 本研究中 $m=6$ 。

1.4 模拟调整

人工林样地的模拟调整过程基于贪婪算法, 该算法是求解复杂问题最优解的方法之一, 其计算逻辑是: 在求解需要多层次问题时, 每一层将当前的局部最优解作为结果, 并在该结果的基础上进行后续部分求解, 从而得到多层次问题的结果。通过贪婪算法通

常无法得到复杂问题的全局最优解,但其结果通常与全局最优解近似。但相比于其他全局算法,贪婪算法

结构简单、运算速度快,目前仍广泛被应用于复杂问题的求解过程中。模拟调整的算法架构见图 2。

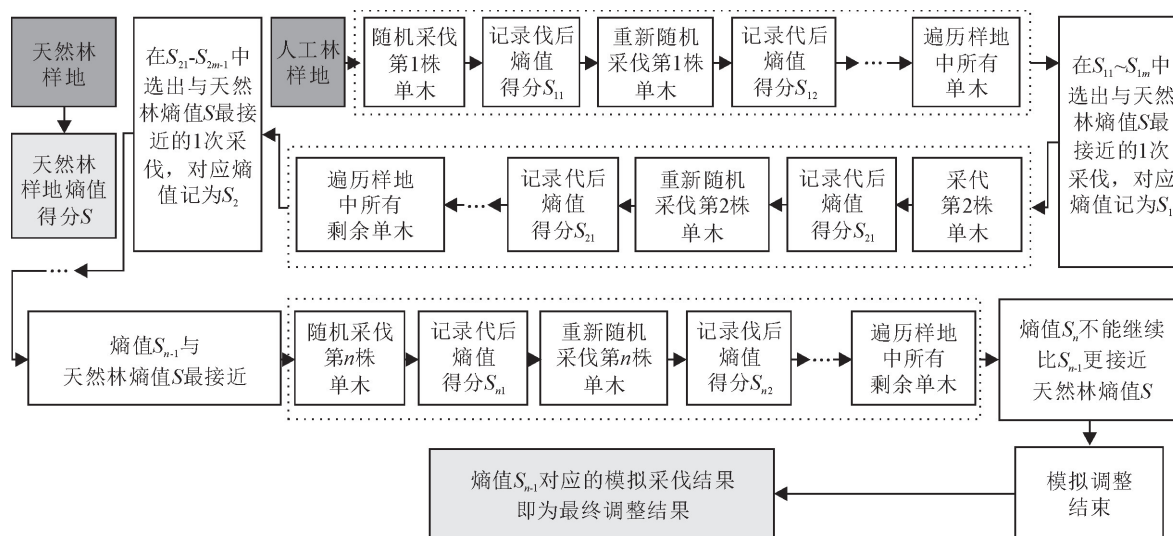


图 2 模拟调整的算法架构

Fig. 2 Simulation adjustment algorithm architecture

2 结果与分析

原始人工林 a、b、c 样地和天然林样地中林木各邻体结构指标的权重见表 3,表明人工林和天然林样地中林木在大小分化程度、树种属性差异和空间距离存在较大差异。在模拟采伐后,人工林样地 a、b 和 c 中,分别保留 63、59、61 株单木,采伐 58、29、41 株单木,3 个人工林样地中株数密度均与天然林样地中株数密度更加接近。3 个人工林样地的所有模拟采伐木中,林木胸径最大达到 20.2 cm,而最小仅为 4.7 cm。

表 4 为人工林样地在模拟调整前后与天然林样

地的参数对照,林分参数方面,调整后的人工林样地在优势木平均高、平均胸径、平均生物量、平均树高等参数的分布状态均更接近于天然林样地,说明通过模拟调整可以有效改善人工林的非空间结构参数分布,使其更接近于天然林。表征竞争的总覆盖指数(TOI)值分别从调整前的 1.72、1.64、1.77 降低至调整后的 0.96、1.02、0.99,显著低于该指标在天然林中的数值。邻体结构参数方面,大小比数、混交度、最近 4 株单木平均距离 D_4 和树高优势度在试验样地进行模拟调整后,均更接近于天然林样地,而模拟调整后人工林样地的胸径优势度则显著高于天然林样地。

表 3 原始人工林样地与天然林样地邻体结构指标权重

Table 3 The weight of experimental and control sample area

指标名称	天然林样地	人工林样地 a	人工林样地 b	人工林样地 c
最近 4 株单木平均距离(D_4)	0.118 9	0.078 8	0.095 4	0.081 3
最近 1 株单木相对距离(R_{D1})	0.162 2	0.139 6	0.149 8	0.140 2
大小比数	0.234 5	0.350 0	0.330 1	0.314 3
胸径优势度	0.101 3	0.111 4	0.104 7	0.110 2
树高优势度	0.078 1	0.041 9	0.035 2	0.033 8
混交度	0.305 0	0.278 4	0.289 6	0.172 8

图 3(a)、图 3(b)、图 3(c)分别表征模拟调整前的人工林样地 a、b、c 林木分布情况的可视化,图 3(e)、图 3(f)、图 3(g)分别为调整后人工林样地 a、b、c 林木分布情况的可视化,图 3(d)为天然林样地林木分布情况的可视化。相比于原始人工林样地,经过优化调整后该样地中林木的邻体结构状态得到明显改善,林木间拥挤程度明显降低,树种混交程度极大提高,林木在空间中的分布状态更趋近于天然林。

3 结论与讨论

本研究发现,在优化调整的人工林样地中,林木胸径结构更接近于天然林样地(呈倒“J”形分布)。这主要是由于原始人工林样地中林木均为同期栽种,且由于栽植密度较高,林木间竞争激烈,林下更新状况较差^[20],进而导致林分中大径级林木的比例较低,而中径级林木和小径级林木(多为更新幼树)

表 4 油松人工林样地优化调整后与油松天然林样地的对照

Table 4 Comparison of Pinus tabuliformis natural forest plots and plantation plots before and after optimization

指标	天然林样地	人工林 a 样地		人工林 b 样地		人工林 c 样地	
		调整前	调整后	调整前	调整后	调整前	调整后
株数(试验区)/株	60	121	63	88	59	102	61
平均胸径/cm	14.34	13.58	14.31	14.22	14.37	13.85	14.32
平均树高/m	11.86	12.78	12.46	12.41	12.09	11.29	11.62
优势木平均高/m	14.16	13.27	13.42	14.14	14.27	13.52	13.77
林木平均生物量/m ³	134.51	84.25	98.14	122.85	136.17	94.05	137.11
单木竞争(TOI)	1.53	1.72	0.96	1.64	1.02	1.77	0.99
大小比数	0.483	0.504	0.448	0.499	0.451	0.507	0.449
混交度	0.321	0.117	0.178	0.107	0.175	0.084	0.096
最近 4 株单木平均距离	2.069	1.543	2.194	1.723	2.189	1.510	2.181
最近 1 株单木相对距离	1.002	0.997	1.001	0.998	1.000	1.001	1.000
胸径优势度	0.022	-0.012	0.060	-0.008	0.084	0.010	0.067
树高优势度	-0.042	-0.026	-0.045	-0.022	-0.044	-0.018	-0.047
采伐强度(%)			48		33		40

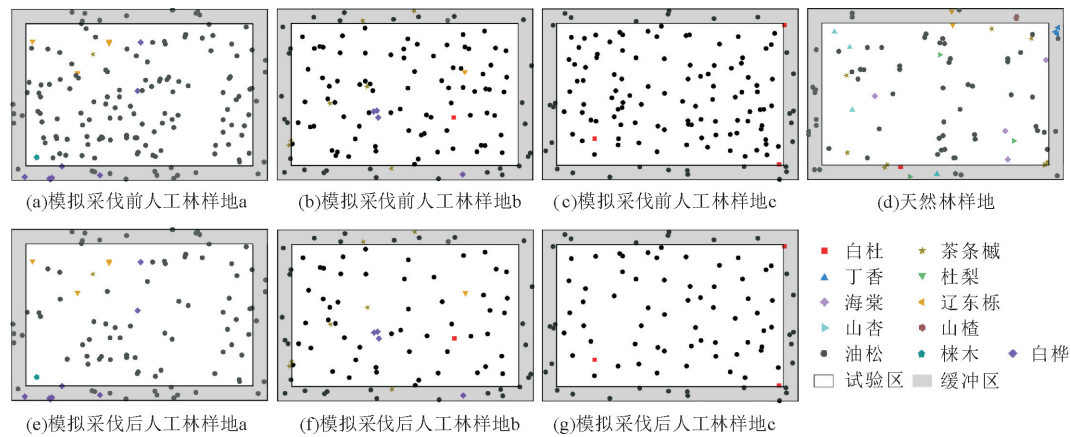


图 3 优化前后的人工林样地和天然林样地中单木邻体结构

Fig. 3 Comparison of natural forest plots and plantation plots before and after optimization

比例则较高。而在模拟调整的过程中,原始人工林样地中大量中等胸径林木被剔除。此外,调整后的人工林样地中,表征林木竞争关系的 TOI 指数显著低于其在天然林样地中的数值。这主要是由于 TOI 竞争指数的计算主要基于林木的树冠大小和三维位置关系^[3],在模拟采伐后,尽管样地中林木邻体竞争和互补效应发生变化,但用于计算竞争指数的林木生长状态变量(胸径、树高和冠长等)仍需要一定时间才能发生变化^[21]。而调整后的人工林样地中,表征林木大小关系的胸径优势度则显著大于其在天然林样地中的数值,这是由于原始的人工林样地中,林木胸径大小分化程度较低,而在模拟采伐的过程中,大量中等胸径的林木被移除,导致林木胸径的分布状态趋向两极。总的来说,基于熵值法的邻体结构模拟调整效果符合试验预期,可以达到调整林木与其邻体空间分布状态的效果。

在现代人工林经营理论的研究中,人类对人工

林生态系统功能的要求不断提高,提倡在兼顾木材生产的条件下,不断提高其生态服务价值^[22-23]。而关于人工林结构和功能的优化调整,无论在近自然经营理论^[24],抑或是森林生态系统经营理论^[25]中,都以原始林作为最终目标^[26-27]。前人研究中,人工林的抚育经营策略通常以关于原始林的先验知识为基础,建立在人为设置的约束条件和目标函数之上。这种人为设置函数和条件的方法对研究者的理论基础和实践经验均有较高要求,受主观感受影响较大^[20]。而基于熵值法的模拟优化模型则以客观赋权法为基础,以林分中特定指标(本研究为邻体结构)的无序程度为桥梁,实现天然林和人工林的紧密联系,受研究者人为影响程度较低。该方法的核心逻辑为:通过量化计算,将林木特定指标(除本研究中的邻体结构外,还可以是竞争、胸径分布等指标)的无序程度调整至与天然林相似的状态,实现人工林的优化过程。

此外,由于异龄、混交的林分的演替周期与其林木的生长发育过程不同步,为了构建异龄、混交的人工林生态系统,侯元兆等^[28]认为在对人工林进行林分改造和群落重建时,需要以林木个体的经营周期为基础,将林木作为森林经营和收获的最小单位。本研究提出的邻体结构的配置方法可以从林木水平上实现对整体林分的结构调整,模拟试验的结果显示,采用该方法优化调整的效果符合研究预期,可以在林木水平上实现调整林分结构的效果,表明基于熵值法的优化调整可以广泛适用于林分演替周期与林木生长发育过程不同步的次生天然林、原始天然和异龄混交人工林。

除本研究中的邻体结构外,基于熵值法的模拟优化模型中还可以考虑使用其他参数作为核心变量,例如林木竞争^[29]、年龄结构、点格局关系^[30-32]等。同时,在核心变量的基础上,还可以增加林木健康、林木树冠所处冠层等类型的约束条件,优先对特定类型林木进行采伐。本研究中,为了获得人工林样地调整的最佳效果,模拟调整仅考虑了人工林和天然林样地中邻体结构的相似性,未设置单次采伐株数和采伐强度的约束条件,导致模拟采伐的强度(48%)远高于抚育经营规程中规定的最大采伐强度。在未来研究和实际应用中,可以按照实际生产需求,通过在模拟调整模型中增加单次采伐株数或强度的约束条件,逐年、多次对林分进行调整,进而达到与本研究相似调整效果。

参考文献:

- [1] 盛炜彤. 中国人工林及其育林体系[M]. 北京: 中国林业出版社, 2014.
- [2] 刘家顺. 中国林业产业政策研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2006.
- [3] WANG B, BU Y, TAO G, *et al.* Quantifying the effect of crown vertical position on individual tree competition: total overlap index and its application in sustainable forest management[J]. Sustainability, 2020, 12(18): 7498.
- [4] 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, *et al.* Research progress of structure based forest management[J]. Forest Research, 2018, 31(1): 85-93. (in Chinese)
- [5] 惠刚盈, 李丽, 赵中华, 等. 林木空间分布格局分析方法[J]. 生态学报, 2007, 27(11): 4717-4728.
HUI G Y, LI L, ZHAO Z H, *et al.* The comparison of methods in analysis of the tree spatial distribution pattern[J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(11): 4717-4728. (in Chinese)
- [6] 石雪云. 江西官山常绿阔叶林邻体结构特征[D]. 南昌: 江西农业大学, 2021.
- [7] 胡锐. 南方集体林区速生丰产用材林经营模式研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2011.
- [8] 洪德伟. 晋西黄土区油松根系与土壤的摩擦力学特性研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2019.
- [9] 韩兆敏. 内蒙古砬砂岩区油松和沙棘茎流耗水特性研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2019.
- [10] 张志达. 对森林经营若干问题的思考[J]. 林业资源管理, 2008(4): 12-14.
ZHANG Z D. On some issues of forest management[J]. Forest Resources Management, 2008(4): 12-14. (in Chinese)
- [11] WANG B, BU Y, LI Y, *et al.* Quantifying the relationship among impact factors of shrub layer diversity in Chinese pine plantation forest ecosystems[J]. Forests, 2019, 10(9): 781.
- [12] 黄国庆, 王明绪, 王国良. 效能评估中的改进熵值法赋权研究[J]. 计算机工程与应用, 2012, 48(28): 245-248.
HANG G Q, WANG M X, WANG G L. Weight assignment research of improved entropy method in effectiveness evaluation[J]. Computer Engineering and Applications, 2012, 48(28): 245-248. (in Chinese)
- [13] 陶晓燕, 章仁俊, 徐辉, 等. 基于改进熵值法的城市可持续发展能力的评价[J]. 干旱区资源与环境, 2006, 20(5): 38-41.
TAO X Y, ZHANG R J, XU H, *et al.* Assessment of city sustainable development based on improved entropy method[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2006, 20(5): 38-41. (in Chinese)
- [14] JACOBSON W, BRUSCO M J. Note: a local-search heuristic for large set-covering problems[J]. Naval Research Logistics, 1995, 42: 1129-1140.
- [15] 牛硕. 黄龙山林区人工油松林模拟抚育与预测[D]. 陕西杨陵: 西北农林科技大学, 2016.
- [16] 段高辉, 赵鹏祥, 周远博, 等. 黄龙山林区油松人工林立地质量评价研究[J]. 西北林学院学报, 2019, 34(5): 161-166, 194.
DUAN G H, ZHAO P X, ZHOU Y B, *et al.* On site quality evaluation of *Pinus tabulaeformis* plantation in the forest region of Huanglong Mountain[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2019, 34(5): 161-166, 194. (in Chinese)
- [17] 吴海平, 孙清琳, 张彦君, 等. 不同密度油松人工林群落特征与物种多样性耦合关系[J]. 西北林学院学报, 2022, 37(5): 1-8.
WU H P, SUN Q L, ZHANG Y J, *et al.* Coupling relationship between community characteristics and species diversity of *Pinus tabulaeformis* plantations with different densities[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2022, 37(5): 1-8. (in Chinese)
- [18] 惠刚盈, GADOW K V, ALBERT M. 一个新的林分空间结构参数——大小比数[J]. 林业科学研究, 1999, 12(1): 4-9.
HUI G Y, GADOW K V, ALBERT M. A new parameter for stand spatial structure neighbourhood comparison[J]. Forest Research, 1999, 12(1): 4-9. (in Chinese)
- [19] 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, HUI Y B. Measuring species spatial isolation in mixed forests[J]. Forest Research, 2001, 14(1): 23-27. (in Chinese)
- [20] PRETZSCH H. Forest dynamics, growth, and yield[M]. Switzerland: Springer, 2009: 1-39.

- tistics for the evaluation and comparison of models[J]. Journal of Geophysical Research, 1986, 90: 8995-9005.
- [24] SANTI E, TARANTINO C, AMICI V, *et al.* Fine-scale spatial distribution of biomass using satellite images[J]. Journal of Ecology and the Natural Environment, 2014, 6: 75-86.
- [25] CHRYSAFIS I, MALLINIS G, GITAS I, *et al.* Estimating mediterranean forest parameters using multi seasonal Landsat 8 OLI imagery and an ensemble learning method[J]. Remote Sensing of Environment, 2017, 199: 154-166.
- [26] GAO Y, LU D, ORCID G L, *et al.* Comparative analysis of modeling algorithms for forest aboveground biomass estimation in a Subtropical Region[J]. Remote Sensing, 2018, 10: 627.
- [27] ROY D P, WULDER M A, LOVELAND T R, *et al.* Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research [J]. Remote Sensing of Environment, 2014, 145: 154-172.
- [28] LOVELAND T R, IRONS J R. Landsat 8: The plans, the reality, and the legacy[J]. Remote Sensing of Environment, 2016, 185: 1-6.
- [29] ZHANG Y, MA J, LIANG S, *et al.* An evaluation of eight machine learning regression algorithms for forest aboveground biomass estimation from multiple satellite data products[J]. Remote Sensing, 2020, 12: 4015.
- [30] TORRE-TOJAL L, BASTARRIKA A, BOYANO A, *et al.* Above-ground biomass estimation from LiDAR data using random forest algorithms-science direct[J]. Journal of Computational Science, 2021, 58: 101517.
- [31] DANG A T N, NANDY S, SRINET R, *et al.* Forest aboveground biomass estimation using machine learning regression algorithm in Yok Don National Park, Vietnam[J]. Ecological Informatics, 2019, 50: 24-32.
- [32] GAO L, CHAI G, ZHANG X. Above-ground biomass estimation of plantation with different tree species using airborne LiDAR and hyperspectral data[J]. Remote Sensing, 2022, 14: 2568.
- [33] JIANG X, LI G, LU D, *et al.* Stratification-based forest aboveground biomass estimation in a subtropical region using airborne lidar data[J]. Remote Sensing, 2020, 12: 1101.
- [34] LI Y, LI M Y, LI C. Combining kriging interpolation to improve the accuracy of forest aboveground biomass estimation using remote sensing data [J]. IEEE Access, 2020, 8: 128124-128139.
- [35] LIU Y, GONG W, XING Y, *et al.* Estimation of the forest stand mean height and aboveground biomass in Northeast China using SAR Sentinel-1B, multispectral Sentinel-2A, and DEM imagery[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2019, 151: 277-289.
- [36] MA J, XIAO X, QIN Y, *et al.* Estimating aboveground biomass of broadleaf, needleleaf, and mixed forests in Northeastern China through analysis of 25-m ALOS/PALSAR mosaic data [J]. Forest Ecology and Management, 2017, 389: 199-210.

(上接第 72 页)

- [21] SPURR S H. Forest ecology[M]. New Jersey: John Wiley & Sons, 1980.
- [22] 谢剑斌. 论持续林业的分类经营与生态效益补偿[D]. 福州: 福建师范大学, 2003.
- [23] 张蕾. 中国林业分类经营改革研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2007.
- [24] 许新桥. 近自然林业理论概述[J]. 世界林业研究, 2006, 19(1): 10-13.
- [25] 项文化, 雷相东. 森林生态系统多功能性及经营优化途径[J]. 中南林业科技大学学报, 2022, 42(10): 1-8.
- XIANG W H, LEI X D. Forest ecosystem multifunctionality and optimizing management pathway[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technolog, 2022, 42(10): 1-8. (in Chinese)
- [26] 刘世荣, 马姜明, 缪宁. 中国天然林保护、生态恢复与可持续经营的理论与技术[J]. 生态学报, 2015, 35(1): 212-218.
- LIU S R, MA J M, MIAO N. Achievements in natural forest protection, ecological restoration, and sustainable management in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(1): 212-218. (in Chinese)
- [27] 张海浪, 廉旭刚, 王镭学, 等. 基于无人机低空遥感数据的时序动态生物量计算研究[J]. 森林工程, 2024, 40(1): 17-25.
- [28] 侯元兆, 曾祥谓. 论多功能森林[J]. 世界林业研究, 2010, 23(3): 7-12.
- HOU Y Z, ZENG X W. Discussion on multifunctional forest [J]. World Forestry Research, 2010, 23(3): 7-12. (in Chinese)
- [29] 张晓红, 周超凡, 张状, 等. 基于光竞争截止系数的崇礼冬奥核心区华北落叶松人工林目标树抚育间伐模拟[J]. 林业科学, 2023, 59(2): 30-39.
- ZHANG X H, ZHOU C F, ZHANG Z, *et al.* Simulation on crop tree management tending and thinning of *Larix principis-rupprechtii* plantation in Chongli winter olympics core area Based on coefficient of light competition[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2023, 59(2): 30-39. (in Chinese)
- [30] 窦啸文, 汤孟平. 基于引力模型的林木竞争分析[J]. 应用生态学报, 2022, 33(10): 2695-204.
- DOU X W, TANG M P. Gravitational model-based competitive analysis of trees[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(10): 2695-2704. (in Chinese)
- [31] 雷宇宙, 毛学刚. 结合 UAV-LiDAR 和 Sentinel-2 的森林蓄积量估测[J]. 森林工程, 2023, 39(6): 46-54.
- [32] 和云润, 陈朝情, 殷唐燕, 等. 基于地统计模型的林分蓄积量空间异质性研究[J]. 西北林学院学报, 2023, 38(3): 169-175.
- HE Y R, CHEN C Q, YIN T Y, *et al.* Research on the spatial heterogeneity of forest stand volume based on geostatistical model[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2023, 38(3): 169-175. (in Chinese)