

DOI:10.13275/j.cnki.lykxyj.2020.05.005

塞罕坝华北落叶松人工林不同经营模式 效果评价

葛兆轩, 苑美艳, 单博文, 黄选瑞, 张志东*

(河北农业大学林学院, 河北 保定 071000)

摘要: [目的] 优化华北落叶松人工林经营效果, 明确最优经营模式, 提高林地质量。[方法] 以河北省塞罕坝地区 29 年林龄的华北落叶松人工林为研究对象, 选取林分生长、林分结构、天然更新、物种多样性及土壤化学性质 5 个方面 20 项指标, 分析结构化森林经营 (S)、近自然森林经营 (N)、传统森林经营 (T) 和对照 (CK) 不同经营模式下的经营效果, 并运用主成分分析法对不同经营模式效果进行综合评价。[结果] 表明, 不同经营模式单株材积年均生长量差异显著 ($P<0.05$), 表现为 $S>N>T>CK$, 林分蓄积定期平均生长量表现为 S、N、CK3 种经营模式显著高于 T 模式 ($P<0.05$); 林分结构指标在不同经营模式间变化呈现一定的差异。平均树高在 4 种经营模式间无显著差异。胸径为 24~28 cm 的林木株数在 N 和 T 经营模式样地较高, 在 S 模式样地最高; 空间结构指标角尺度和胸径变异系数在不同经营模式间差异不显著 ($P>0.05$); 不同经营模式林分的草本物种丰富度和 Shannon-Wiener 多样性指数存在显著差异 ($P<0.05$), 表现为 $N>S>T>CK$; 在 0~20 cm 土层, 土壤有机质、碱解氮、有效磷和速效钾含量 S 模式显著高于对照 CK; T、N、S 和 CK 模式经营效果综合得分分别为 -6.14、9.30、11.49 和 -14.64。[结论] 塞罕坝 29 年林龄的华北落叶松人工林在 S 模式的经营效果最佳。

关键词: 华北落叶松; 近自然经营; 结构化经营; 主成分分析法; 经营效果

中图分类号: S750; S791.22

文献标志码: A

文章编号: 1001-1498(2020)05-0038-10

森林经营模式是培育森林或利用森林的一系列经营措施的组合^[1]。不同经营模式, 如近自然森林经营^[2-3]、生态系统经营^[4]、检查法择伐经营^[5]、目标树经营^[6-7]、结构化森林经营^[8]等, 对森林结构和功能产生了显著的影响。近年来, 随着林业发展目标由以木材生产为主转向以生态建设为主, 人工林在生态保护方面起着重要作用^[9]。为了培育健康稳定的森林, 提高人工林质量和林地生产力, 相继开展了经营模式设计^[10]、经营方式对林分的影响^[11-13]、经营效果评价及方法^[14-16]、经营效果评价指标的选取和量化^[3]等一系列研究。研究主要集中于一种经营模式对林分质量影响的量化评价, 而针

对不同经营模式效果综合评价的研究还较少。

华北落叶松 (*Larix principis-rupprechtii* Mayr) 为冀北地区主要造林与用材树种^[17], 华北落叶松人工林在木材供给、生物多样性保护和生态效益等方面具有重要作用。但长期的粗放经营造成冀北地区华北落叶松人工林林下物种多样性减少, 稳定性差, 林分生产力普遍较低。因此, 探寻适宜的经营模式是当前华北落叶松人工林可持续经营的迫切任务。本研究以河北省塞罕坝机械林场华北落叶松人工林为研究对象, 从林分生长、林分结构、天然更新、物种多样性和土壤化学性质 5 个方面建立综合评价指标体系, 并运用主成分分析法对结构化森林

收稿日期: 2019-11-10 修回日期: 2020-01-15

基金项目: 国家重点研发计划《结构调控对人工林生产力形成的影响机制》(2016YFD060020303)

* 通讯作者: 张志东。E-mail: zhzhido@163.com

经营、近自然森林经营和传统森林经营的经营效果进行综合评价,以期为塞罕坝华北落叶松人工林的培育和经营提供参考依据。

1 研究区概况

研究区位于河北省承德市塞罕坝机械林场,属内蒙古地区浑善达克沙地南缘,于阴山与大兴安岭山脉交接处(116°52′~117°39′ E, 42°04′~42°36′ N)。地势南低北高,分为坝上和坝下两个部分。属于寒温性大陆季风气候。年平均气温-1.4℃,其中最高温度可达30.9℃,最低温度达-43.2℃;降水量较少,年均均为450 mm,蒸发量大于降水量^[18]。土壤种类十分丰富,以风沙土、草甸土、棕壤、灰色森林土为主。植被类型多样,包括草原与草甸、针叶林、阔叶林、灌丛和水生群落等^[19]。其中按起源又可将乔木林分为天然次生林和人工林,天然次生林中主要的乔木树种有白桦(*Betula platyphylla* Suk)、山杨(*Populus davidiana* Dode)等;人工林中主要的乔木树种有华北落叶松、樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica* Litv)等;草本主要有早熟禾(*Poa annua* L.)、地榆(*Sanguisorba officinalis* L.)、铁丝草(*Ophiopogon chingii* Wang et Tang)等。

2 研究方法

2.1 样地设置和调查

在塞罕坝北曼甸和千层板林场林区内选择立地条件相对一致的林龄为29年生华北落叶松林分共3块,每个林分内随机布设3块50 m×50 m的样地,样地之间间隔至少为50 m。记录样地所在位置的经纬度、海拔、坡度、坡向、坡位、土壤类型、土壤厚度等。2014年5月,采用十字线法将每块样地划分为4个经营单元进行经营(每个经营单元边缘设置2.5 m的缓冲区),采用随机排列的方式布设4组经营模式,即近自然森林经营(N)、传统森林经营(T)、结构化森林经营(S)和对照(CK),每个经营模式3次重复。各经营模式设计如下:

(1)近自然森林经营:以选定的目标树作为经营主体对象。首先将林分中的所有林木按照林木经营目标进行分级,确定目标树、干扰树、特殊目标树和一般林木。其次,确定每公顷所选目标树数量(成熟林的每公顷胸高断面积/单株树的胸高断

面积)以及目标树之间的平均距离(目标胸径的20倍),按三角形均匀配置。最后,伐除影响目标树和特殊目标树生长的干扰树(与目标树干距离小于被干扰半径(目标树当前胸径加上4 cm再乘以20)的林木),在特殊目标树与目标树发生冲突时,优先保留特殊目标树^[3,7]。

(2)结构化森林经营:主要是对林分结构进行调整。基于结构化指标(大小比数、角尺度、混交度等)确定保留木和采伐木(研究区华北落叶松的目标胸径达到50 cm以上,可采伐利用;保留的中大径木的竞争大小比数不大于0.25;保留木最近4株相邻木的角尺度不大于0.5),林木分布格局的调整(调整林分中角尺度为1或0.75的单木),树种组成的调整(将林分中主要树种的取值为0、0.25的单木作为潜在的调整对象),竞争关系的调整(做到使经营对象的竞争大小比数不大于0.25)^[8,10,20]。

(3)传统森林经营:采用下层疏伐法,采伐林冠下层不健康的和其他树种林木。

(4)对照:对林分内的树木不做任何采伐作业。

同年7—9月在每个经营单元内对 $DBH \geq 5$ cm的林木进行每木检尺,记录林木所在位置、胸径、树高、枝下高、冠幅,并记录树种、健康状况以及林分的郁闭度等。将高度低于120 cm的华北落叶松幼苗定为更新幼苗,在标准地内以每个10 m×10 m的样方为单位进行调查,将更新苗统一编号挂牌,记录其高度、基径及其在样方内的相对坐标,并通过查轮生枝法确定其年龄。在标准地的四角及中心位置各设置1个1 m×1 m的小样方,调查草本物种、株数、高度和盖度。在每个1 m×1 m的小样方内,按照0~10 cm和10~20 cm两个土层,利用土钻取样,然后将各样方内同一层次的土壤分别进行混合,形成一个混合样,带回实验室阴干后进行土壤化学性质的测定。根据野外实际勘察情况和调查分析后的结果(林分郁闭度和林木生长状况),将不同经营单元的采伐强度控制在15%以下,明确采伐对象,然后做上标记进行林木的采伐作业。

2016年7—8月,对经营样地进行调查,调查的内容与采伐前相同,并记录好相关数据以备使用。样地林分基本情况见表1。

表1 样地概况
Table 1 Survey of sample plots

样地 plot	林分密度 Stand density/(株·hm ⁻²)				平均树高 Average height/m				平均胸径 Average DBH/cm			
	CK	N	S	T	CK	N	S	T	CK	N	S	T
1	488	328	360	236	13.91	13.09	16.46	16.75	15.	17	15	19
2	408	236	152	316	14.18	14.08	21.59	13.79	17	16	14	17
3	500	280	336	308	15.78	15.36	17.16	15.33	16	16	16	17
4	392	328	164	208	14.21	13.35	14.76	14.59	16	16	21	20
5	380	364	200	280	12.60	14.19	15.34	14.28	18	18	20	19
6	232	276	224	280	12.04	12.01	13.85	13.55	17	16	19	17
7	228	152	164	116	12.22	11.83	12.16	11.24	17	19	18	19
8	256	256	160	196	13.28	12.91	13.21	13.25	18	17	19	18
9	204	196	168	180	13.65	15.86	13.80	13.68	17	17	18	18

2.2 评价指标与因子

2.2.1 林分生长 采用林木单株材积年均生长量、林分蓄积定期平均生长量指标衡量林分生长。

2.2.2 林分结构 林分结构从林木树高、胸径、林木分布格局和林木大小分化程度等方面进行描述，林木分布格局用角尺度来表示，林木大小分化程度通过胸径变异系数来表达。利用空间结构分析软件 Winkelmass 进行林分空间结构分析。

2.2.3 天然更新 依据更新苗的高度将4种经营模式林分下的更新苗划分为5个等级，即：第Ⅰ级（ H_1 ）： $H_1 \leq 3$ cm；第Ⅱ级（ H_2 ）： $3 \text{ cm} < H_2 \leq 8$ cm；第Ⅲ级（ H_3 ）： $8 \text{ cm} < H_3 \leq 25$ cm；第Ⅳ级（ H_4 ）： $25 \text{ cm} < H_4 \leq 70$ cm；第Ⅴ级（ H_5 ）： $70 \text{ cm} < H_5 \leq 120$ cm。

2.2.4 物种多样性 计算草本植物的物种丰富度（ S ）、Pielou 均匀度指数（ J ）、Shannon-Wiener 指数（ H' ）和 Simpson 指数（ P ）来衡量物种多样性。

2.2.5 土壤化学性质 土壤化学性质的测试内容包括土壤有机质、全氮、全钾、全磷、碱解氮、速效钾、有效磷含量以及土壤的酸碱度（pH）指标。

2.3 评价方法

利用 SPSS 20.0 对所选评价指标进行描述性统计，得到各项指标平均值和标准差，并进行方差检验，方差齐性时采用 Tukey 多重比较，采用主成分分析法对华北落叶松人工林不同经营模式的效果进行综合评价。

（1）为了消除量纲及数量级的影响，将原始数据标准化，公式如下：

$$X_{ij}^* = \frac{X_{ij} - \bar{X}_j}{S_j} \quad (1)$$

式中， X_{ij}^* 为 X_{ij} 的标准化数据； X_{ij} 为各样地原始数据； \bar{X}_j 和 S_j 分别为第 j 个指标的标准差和平均值。

（2）筛选主成分，将标准化后的数据利用 SPSS 软件进行分析，从方差分析结果中选取累积贡献率 $\geq 85\%$ 的前 m 个主成分，建立标准化变量与 m 个主成分之间的关系，公式如下：

$$Y_k = h_{k1}X_1^* + h_{k2}X_2^* + \dots + h_{kp}X_p^* \quad (2)$$

式中， Y_k 代表第 k 个主成分（ $k=1, 2, \dots, m$ ）；为第 k 个主成分的因子载荷； X_p^* 为第 p 个指标变量； h_{kp} 为第 k 个主成分的第 p 个指标变量的因子载荷。

（3）确定各个主成分的权重，用以下公式计算：

$$w_k = \frac{\lambda_k}{\sum_{k=1}^m \lambda_k} \quad (3)$$

式中， w_k 代表第 k 个主成分的权重； λ_k 表示第 k 个主成分的贡献率。

（4）根据公式（2）筛选出的 m 个主成分和公式（3）得到的权重建立综合评价函数：

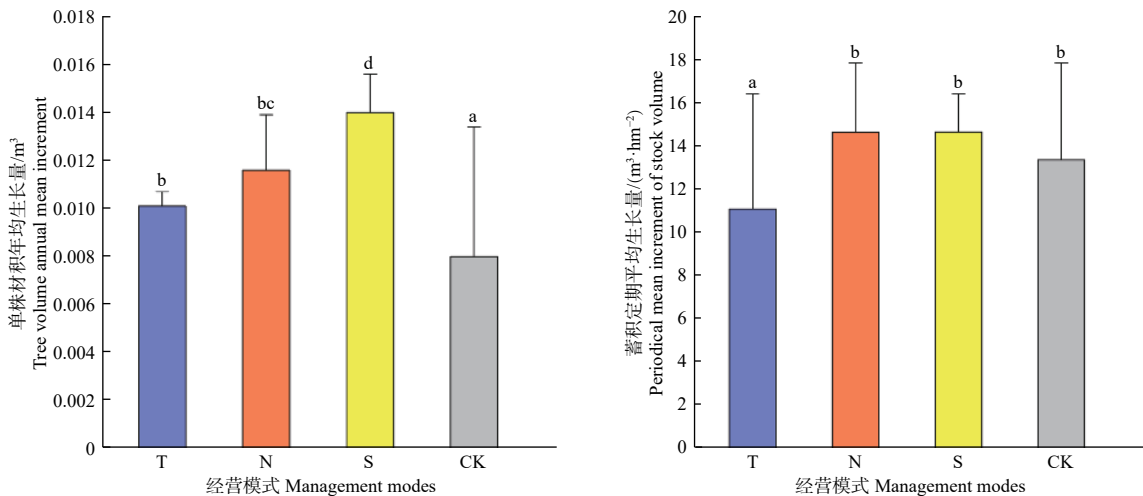
$$F = \sum_{k=1}^m w_k Y_k \quad (4)$$

其中， F 为各经营模式的综合得分，得分越高，说明该种经营模式效果越好^[21-23]。

3 结果与分析

3.1 林分生长特征

由图1可知，T、N、S3种经营模式单株材



注: 不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$) The different letters show significant difference at $P < 0.05$ level; T: 传统森林经营模式 Conventional forest management; N: 近自然森林经营 Close-to-nature forest management; S: 结构化森林经营 Structure-based forest management; CK: 对照。下同 the same below.

图1 不同经营模式单株材积年均生长量和林分蓄积定期平均生长量

Fig. 1 Tree volume annual mean increment and periodical mean increment of stand stock volume in stands with different management modes

积年均生长量显著大于 CK ($P < 0.05$), 其中 S 模式的值最高, N 模式次之, 且 S 模式显著高于 T 和 N 模式 ($P < 0.05$); 而对于林分蓄积定期平均生长量而言, S、N、CK 3 种经营模式显著高于 T 模式 ($P < 0.05$), 但 3 种模式间无显著差异 ($P > 0.05$), 总的来说, S 和 N 模式的林分蓄积定期平均生长量最大。

3.2 林分结构特征

3.2.1 林分树高 4 种经营模式管理后的华北落叶松人工林林分的平均树高间无显著差异 ($P > 0.05$), 且不同经营模式间林分的平均树高均呈现出 $T > CK > S > N$ (图 2)。

3.2.2 林木胸径分布 不同经营模式林分内胸径分布总体上均似正态分布。各经营模式林分林木胸径主要集中在 16~20 cm 径阶范围内, 径级为 18 cm 时林木株数达到最大值。S 模式中, 6~12 cm 径阶的林木数量明显减少, CK 模式中, 20~28 cm 径阶的林木严重不足, 小径阶林木株数分配较均匀, 而 T 模式林分中小径阶林木严重缺少。S、N、T 3 种经营模式 24~28 cm 径阶的林木株数均有增加, 但 S 模式株数增加的最多, 并且在 S 模式和 N 模式林分中新增了 30~32 cm 大径阶林木 (图 3)。

3.2.3 林木空间分布格局 由图 4A 可知, T、N、S、CK 模式林分角尺度均值分别为 0.476、0.493、0.501 和 0.483, 说明林木整体分布均属于随机分布

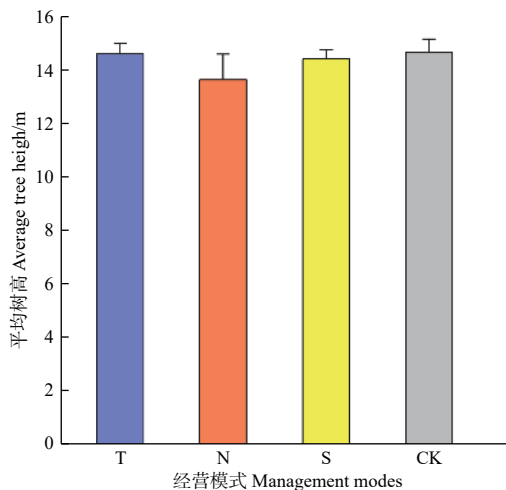


图2 不同经营模式林分平均树高

Fig. 2 The average tree height of stands with different Management modes

状态。但 S 模式更加随机, 说明更接近自然状态。角尺度为 0.5 时 4 种经营模式分布概率达到最大, 且随机分布的比例分别为 54.3%、54.1%、53.2% 和 53.5%, 非常相似。通过 One-way 方差检验发现, 当角尺度分别为 0、0.25、0.5、0.75、1 时, 4 种经营模式的角尺度分布频率整体上无显著差异 ($P > 0.05$) (图 4B)。

3.2.4 林木大小分化程度 4 种经营模式的胸径变异系数无显著差异 ($P > 0.05$), 经营前林分林木胸径变异系数是 0.256, T、N、S 3 种模式经营后林

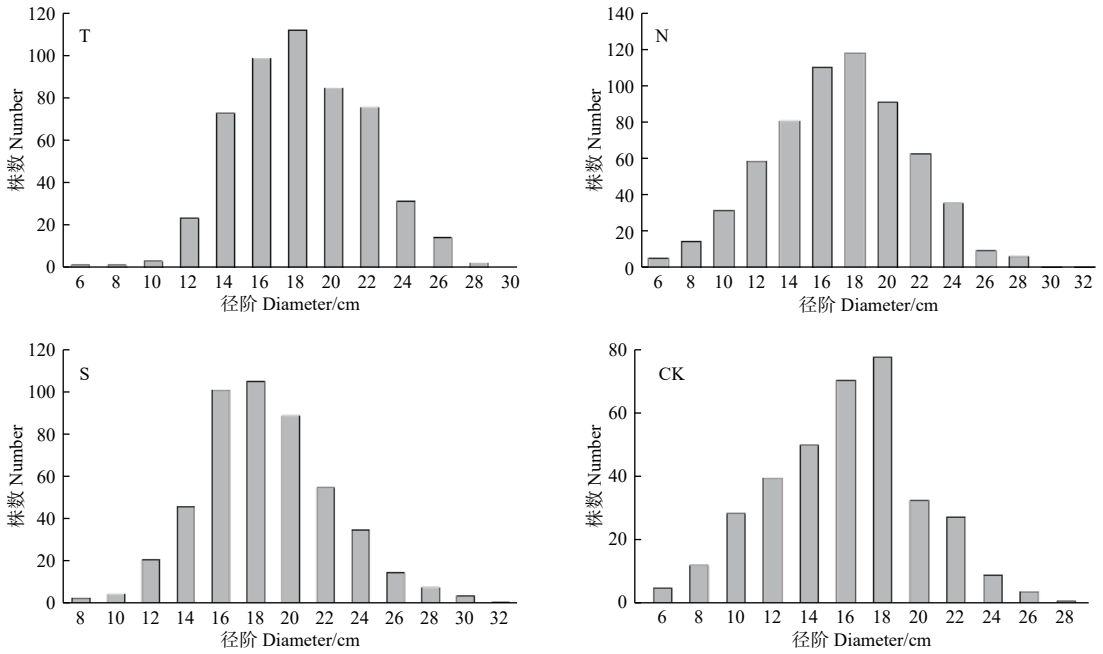


图3 不同经营模式林分胸径分布

Fig. 3 The DBH distribution of stands with different management modes

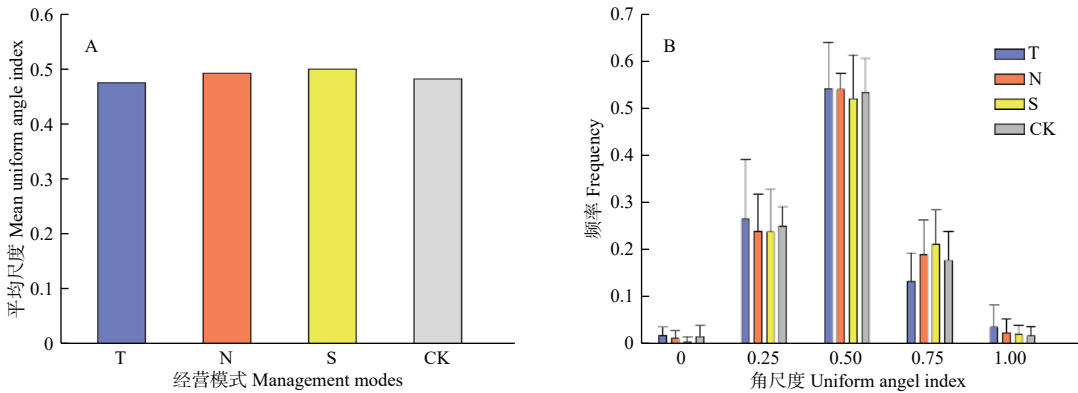


图4 不同经营模式林分角尺度分布图

Fig. 4 Uniform angle index distribution of stands with different management modes

木胸径变异系数分别是 0.202、0.248 和 0.215。S 和 T 两种模式的胸径变异系数小于 N 和 CK 模式，说明 S 和 T 经营模式下的林分林木胸径离散程度较小（图 5）。

3.3 天然更新

华北落叶松人工林 4 种经营模式下林分林下更新苗数量具有相同的变化趋势，随着更新苗高度的增加呈明显的下降趋势。从各个高度级更新苗的株数来看，各经营模式林分都存在极高的繁殖量，极低的成活率现象。4 种经营模式林分中林下更新苗株高处于第 1 等级 ($0 < HI \leq 3$ cm) 的株数占绝大部分，分别达到 6 355、6 584、7 895 和 9 404 株，

CK 和 T 模式林分内的更新苗株数高于 N 和 S 模式，但随着更新苗高度的增加，更新苗数量呈降低趋势（图 6）。

3.4 草本物种多样性

不同经营模式林分的草本物种丰富度 (S) 和 Shannon-Wiener 多样性指数 (H') 均表现为 $N > S > T > CK$ ，且 N 模式显著高于 CK 模式 ($P < 0.05$)；Pielou 均匀度指数 (J) 和 Simpson 多样性指数 (P) 在不同经营模式间均无显著差异 ($P > 0.05$)，总体来看表现为 $N > S > T = CK$ （图 7）。

3.5 土壤化学性质变化

不同经营模式的土壤全钾含量、土壤 pH 值随

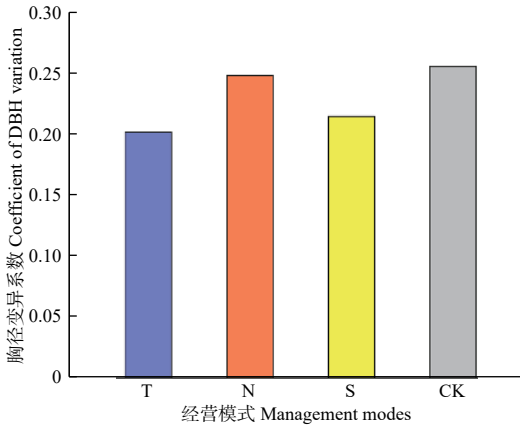


图5 不同经营模式林分胸径变异系数

Fig. 5 The coefficient of DBH variation in stands with different management modes

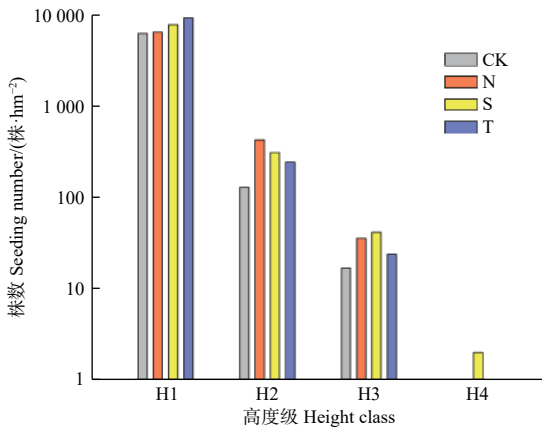


图6 不同经营模式林分各等级更新苗数量

Fig. 6 The number of seedlings belonging to different height level in stands with different management modes

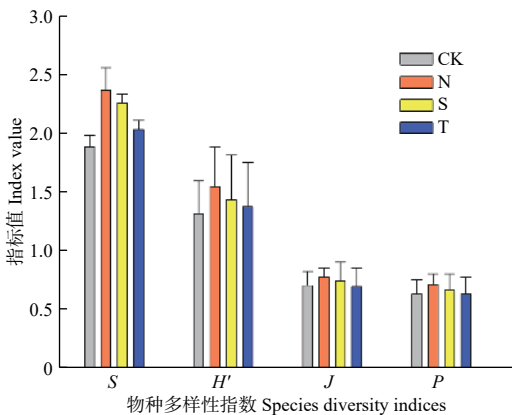


图7 不同经营模式林分物种多样性指数

Fig. 7 Species diversity indices in stands with different management modes

注: S: 物种丰富度 Species richness; H': Shannon-Wiener 指数 Shannon-Wiener index; J: Pielou 均匀度指数 Pielou evenness index.; P: Simpson 指数 Simpson index.

土层深度的增加逐渐增加, 土壤有机质、全磷、全氮、土壤碱解氮、有效磷和速效钾含量则呈现出随土层深度的增加而减少的趋势。其中土壤有机质含量在 10~20 cm 土层内 S 模式显著高于 CK 模式 ($P<0.05$)。土壤碱解氮含量在 0~10 cm 土层内 S 和 T 模式显著高于 CK 模式 ($P<0.05$), 10~20 cm 土层内 T 模式显著高于 CK 模式 ($P<0.05$); 有效磷含量在 0~10 cm 土层内 S 模式显著高于 CK 和 T 模式 ($P<0.05$), 10~20 cm 土层内 S 模式显著高于其它 3 种经营模式 ($P<0.05$), N 模式显著高于 CK 模式 ($P<0.05$) (表 2)。

3.6 效果评价

利用 SPSS 20.0 软件对标准化后的数据进行主成分分析, 由表 3 可知, 前 2 个主成分的累积贡献率为 70% 和 85%, 因此筛选出的前 2 个主成分已能充分表达各经营模式的总体经营效果。

通过各因子载荷绝对值可知, 第一主成分在林分生长蓄积生长率、林分结构平均树高、物种多样性 S、H'、J、P、土壤化学性质有机质、全氮含量、全磷含量、有效磷含量、速效钾含量和 pH 值指标上具有较大载荷; 第 2 主成分在林分生长单株材积年均生长量、胸径、全钾含量、碱解氮含量指标上载荷较大 (表 4)。

利用因子载荷值与标准化数据计算各主成分的得分, 得出 2 个主成分的权重为: 0.814 和 0.186。通过构建综合评价函数, 计算不同经营模式的综合得分 (表 5)。4 种经营模式综合得分最高的均是 S 模式, 即华北落叶松在 S 模式的经营效果最好。

4 讨论

不同的经营模式可以通过调节林分密度改善保留木的生长空间和竞争力^[11], 对林木生长具有重要影响。研究表明, 抚育间伐可以促进林分林木胸径生长, 对林分单株材积生长量具有促进作用^[11,24-25]。本研究中, 不同经营模式林分生长差异显著, S 模式单株材积年均生长量和蓄积定期平均生长量最大 (图 1)。这可能是由于 S 模式是将整个林分内的中大径木和目标树分布都调整到了最佳位置。林分密度和郁闭度降低, 可以改善林木的光环境, 有利于林木生长^[26-27]。N 模式是将目标树周围的干扰木伐除, 只将目标树的生长调到了最佳位置, 其它无干扰的一般木生长空间几乎没有变化; T 模式虽然

表2 不同经营模式林下土壤化学性质的变化

Table 2 Soil chemical properties change among stands with different management modes in middle-aged plantation

指标 Index	土层深度 Soil depth/cm	经营模式 Management modes			
		CK	S	N	T
有机质 Organic matter/(g·kg ⁻¹)	0~10	42.87±10.73 a	46.16±10.02 ab	44.12±10.60 a	45.63±12.49 a
	10~20	36.47±8.35 a	41.65±9.8 b	40.37±11.93 ab	40.66±10.62 ab
全氮 Total N/(g·kg ⁻¹)	0~10	2.09±0.53 a	2.29±0.51 a	2.20±0.45 a	2.25±0.57 a
	10~20	1.91±0.46 a	2.04±0.50 a	2.08±0.56 a	2.00±0.51 a
全磷 Total P/(g·kg ⁻¹)	0~10	0.36±0.06 a	0.40±0.09 a	0.40±0.07 a	0.37±0.08 a
	10~20	0.32±0.05 a	0.38±0.08 a	0.39±0.07 a	0.34±0.06 a
全钾 Total K/(g·kg ⁻¹)	0~10	19.55±2.32 a	18.55±2.70 a	19.21±2.33 a	19.17±2.73 a
	10~20	19.60±2.39 a	19.25±2.19 a	19.35±2.56 a	19.58±2.60 a
碱解氮 Alkali-hydrolyzed N/(mg·kg ⁻¹)	0~10	102.74±35.35 a	130.28±32.69 b	124.12±36.33 ab	129.37±36.15 b
	10~20	87.87±27.84 a	111.42±26.03 ab	108.88±30.68 ab	115.65±33.85 b
有效磷 Rapidly available P/(mg·kg ⁻¹)	0~10	8.11±4.15 a	8.87±3.08 b	8.74±2.90 ab	8.02±2.35 a
	10~20	5.18±1.81 a	7.00±4.76 c	6.03±2.71 b	5.92±2.06 ab
速效钾 Rapidly available K/(mg·kg ⁻¹)	0~10	124.99±52.38 a	130.81±52.47 a	133.76±54.41 a	116.82±32.11 ab
	10~20	84.05±25.10 a	120.09±77.23 b	92.50±20.43 ab	92.05±26.36 ab
pH值 pH value	0~10	6.33±0.55 a	6.47±0.51 ab	6.44±0.62 ab	6.24±1.02 a
	10~20	6.39±0.54 a	6.53±0.52 ab	6.52±0.58 ab	6.36±0.44 a

表3 总方差分析

Table 3 Total variance analysis

主成分 Component	特征值 Eigenvalue	贡献率 Variance/%	累积贡献率 Cumulative/%
1	13.985	69.927	69.927
2	3.192	15.958	85.885

伐除了下层竞争力小的林木，但主林层林木的竞争还是比较激烈，保留木得不到足够的空间和养分，所以单株材积平均生长量和蓄积定期平均生长量低于S模式。这在其他学者的研究中^[13, 28]也得到了相似的结论。

林分结构是评价一种经营效果的重要指标^[23]。树高、胸径、角尺度和大小比数能够直接反映林木的生长。许多研究发现抚育间伐对林木树高生长无显著影响^[26]。本研究结果表明不同经营模式平均树高间无显著差异 ($P>0.05$) (图2)。通过分析林分内林木胸径分布发现，S模式中小径阶林木明显减少，24~28 cm径阶的林木株数增加的最多，在S模式和N模式林分中新增了大径阶林木 (图3)。此外，S和T经营模式下林木胸径变异系数小于N和CK模式 (图5)，说明S和T经营模式林分胸径离散程度较小。这可能是由于在S模式经营过

程中采伐了一些小径阶林木，改善了林分密度，有利于大径阶林木胸径生长。N模式以经营目标树为主，只采伐了影响目标树生长的其他木，林分密度降低，促进了林分内林木的生长。比较不同经营模式林分角尺度发现，经营前后林木整体分布均属于随机分布状态，N模式和S模式林分角尺度均值较CK模式均有小幅度的增加，林木有向随机分布的趋向，其中S模式更加随机 (图4B)。已有研究表明，理想的林分中林木分布为随机状态更好^[29]。可以说明N模式和S模式具有使林木分布改善为理想林分的效果，S效果更明显。

林木更新直接影响着林分的健康程度，综合比较4种经营模式各等级更新新苗数量，S模式和N模式较CK和T模式均有优势。分析认为，S模式和N模式是将影响目标树生长或空间结构单元内不合理的林木伐除，大大的降低了林分的郁闭度。研究也表明，郁闭度与林下幼苗的生长为负相关关系^[30]。

物种多样性反映了群落物种组成，可以反映群落功能水平。众多研究结果表明，干扰改变森林群落物种多样性^[31]，同样对林分土壤质量也会产生一定的影响^[13]。本研究中，N模式物种多样性指数较其它经营模式要高 (图7)。S模式土壤有机质含

表 4 因子载荷
Table 4 Component matrix

项目 Item	指标 Index	主成分 Component	
		1	2
林分生长 Stand growth	单株材积年均生长量 Tree volume annual mean increment	0.722	0.544
	蓄积定期平均生长量(PIA)	0.634	-0.395
	蓄积生长率 Growth rate of stock volume	0.912	0.267
林分结构 Stand structure	平均树高 Average tree height	-0.920	0.341
	胸径 DBH	0.208	0.975
	角尺度 Uniform angle index	0.676	0.021
	大小比 Neighborhood comparison	-0.768	0.432
物种多样性 Species diversity	物种丰富度 Species richness (<i>S</i>)	0.989	0.130
	Shannon-Wiener指数 Shannon-Wiener index (<i>H'</i>)	0.992	-0.051
	Pielou均匀度指数 Pielou evenness (<i>J</i>)	0.944	-0.251
	Simpson指数 Simpson index (<i>P</i>)	0.954	-0.298
	有机质 Organic matter	0.871	0.342
土壤化学性质 Soil chemical properties	全氮 Total N content	0.918	0.199
	全磷 Total P content	0.813	0.410
	全钾 Total K content	-0.777	0.528
	碱解氮 Alkali-hydrolyzed N	0.699	0.585
	有效磷 Rapidly available P	0.992	-0.063
	速效钾 Rapidly available K	0.957	-0.288
	pH值 pH value	0.903	-0.268
天然更新 Natural regeneration	更新苗 Seedling	0.681	0.371

表 5 综合评价结果

Table 5 Comprehensive evaluation results

经营模式 Management modes	S_1	S_2	综合得分 Composite score	排名 Ranking
CK	-17.16	-3.67	-14.65	4
S	13.65	2.00	11.49	1
N	11.82	-1.72	9.30	2
T	-8.31	3.39	-6.14	3

量高, CK 模式最低 (表 2)。这可能是由于 S 模式更加注重林分结构的合理化, 经过林分结构调整, 使林分内的水热状况, 透气性能优于其它模式, 从而加速了凋落物的分解, 致使有机物质含量高于其它 3 种模式。

5 结论

结构化经营模式将林分内的中大径木和目标树调整到最佳位置, 改善了林分密度和郁闭度, 促进

了林木生长。并且林分内水热状况、透气性能要优于其它模式, 土壤有机质、有效磷等含量最高。

近自然经营模式和结构化经营模式通过伐除影响目标树生长的不合理的林木, 林分结构要优于传统经营模式和对照, 更有利于林下更新, 物种多样性较高。

传统经营模式采用下层疏伐, 主林层林木的竞争比较激烈, 保留木得不到足够的空间和养分, 生长缓慢, 林分更加趋向于均匀分布。

综合评价结果表明, 塞罕坝 29 年林龄的华北落叶松人工林在 S 模式的经营效果最佳。对于华北落叶松人工林来说, 林分生长是一个长期的过程, 如何在长时间尺度上优化林分结构, 提高更新和土壤理化性质, 还需对样地进行长期的连续观测和经营效果研究。

参考文献:

- [1] 亢新刚. 森林培育学[M]. 北京: 中国林业出版社, 2011.

- [2] Pommerening A, Murphy S T. A review of the history, definitions and methods of continuous cover forestry with special attention to afforestation and restocking[J]. *Forestry*, 2004, 77(1): 27-44.
- [3] 彭舜磊, 王得祥. 秦岭主要森林类型近自然度评价[J]. *林业科学*, 2011, 47(1): 135-142.
- [4] 赵士洞, 汪业勛. 生态系统管理的基本问题[J]. *生态学杂志*, 1997, 15(4): 35-38.
- [5] Abetz P. Zur standraumregulierung in mischbeständen und auswahl von Zukunftsbäumen[J]. *Allgemeine Forst und Jagdzeitung*, 1974, 29(41): 871-873.
- [6] Möller A. Der Dauerwaldgedanke: Seinsinn und Seine Bedeutung[M]. Berlin: Verlag Julius Springer, 1992.
- [7] 张晓红, 张会儒. 蒙古栎次生林垂直结构特征对目标树经营的响应[J]. *北京林业大学学报*, 2019, 41(5): 51-65.
- [8] 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.
- [9] 李婷婷, 陆元昌, 姜俊, 等. 马尾松人工林森林经营模式评价[J]. *西北林学院学报*, 2015, 30(1): 164-171.
- [10] 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.
- [11] Lei Xiangdong, Lu Yuanchang, Peng Changhui, et al. Growth and structure development of semi-natural larch-spruce-fir (*Larix olgensis-Picea jezoensis-Abies nephrolepis*) forests in northeast China: 12-year results after thinning[J]. *Forest Ecology and Management*, 2006, 240(1): 165-177.
- [12] 冯琦雅, 陈超凡, 覃林, 等. 不同经营模式对蒙古栎天然次生林林分结构和植物多样性的影响[J]. *林业科学*, 2018, 54(1): 12-21.
- [13] 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.
- [14] 李婷婷. 热带林业实验中心森林资源监测和经营效果评价研究[D]. 北京, 中国林业科学研究院, 2014.
- [15] 赵中华, 倪建伟, 许新桥. 小陇山林区典型森林经营模式状态特征评价[J]. *林业经济*, 2018, 40(12): 111-115.
- [16] 苏立娟, 张谱, 何友均. 森林经营综合效益评价方法与发展趋势[J]. *世界林业研究*, 2015, 28(6): 6-11.
- [17] 张希和, 翟洪波, 田旭朝. 半干旱地区华北落叶松人工林采伐迹地更新树种选择——以塞罕坝机械林场为例[J]. *内蒙古农业大学学报: 自然科学版*, 2007, 28(2): 32-34.
- [18] 剪文灏, 吕发, 张建华, 等. 冀北山地林分结构化经营初探[J]. *防护林科技*, 2013, 20(1): 71-73.
- [19] 张树梓, 李梅, 张树彬, 等. 塞罕坝华北落叶松人工林天然更新影响因子[J]. *生态学报*, 2015, 35(16): 5403-5411.
- [20] 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.
- [21] 吕海龙, 董希斌. 基于主成分分析的小兴安岭低质林不同抚育改造模式评价[J]. *林业科学*, 2011, 47(12): 172-178.
- [22] 张洪, 董希斌, 郭辉. 基于主成分分析法综合评价小兴安岭低质林择伐生态改造模式[J]. *东北林业大学学报*, 2010, 38(12): 7-9.
- [23] 朱玉杰, 董希斌. 大兴安岭地区落叶松用材林不同抚育间伐强度经营效果评价[J]. *林业科学*, 2016, 52(12): 29-38.
- [24] Huffman D W, Moore M M. Responses of *Fendler ceanothus* to overstory thinning, prescribed fire, and drought in an Arizona ponderosa pine forest[J]. *Forest Ecology & Management*, 2004, 198(1): 105-115.
- [25] 黄鑫春. 不同抚育间伐强度对辽东落叶松林生长的影响[J]. *林业资源管理*, 2016, 44(1): 65-71.
- [26] 李志辉. 湘南地区马尾松人工林间伐效果的分析研究[J]. *中南林业科技大学学报*, 2010, 30(4): 1-6.
- [27] 尤文忠, 赵刚, 张慧东, 等. 抚育间伐对蒙古栎次生林生长的影响[J]. *生态学报*, 2015, 35(1): 56-64.
- [28] 陈明辉, 惠刚盈, 胡艳波, 等. 结构化森林经营对东北阔叶红松林森林质量的影响[J]. *北京林业大学学报*, 2019, 41(5): 19-30.
- [29] 陈亚南, 杨华, 马士友, 等. 长白山2种针阔混交林空间结构多样性研究[J]. *北京林业大学学报*, 2015, 37(12): 48-58.
- [30] Hofgaard A. Structure and regeneration patterns in a virgin *Picea abies* forest in northern Sweden[J]. *Journal of Vegetation Science*, 2010, 4(5): 601-608.
- [31] Finegan B, Delgado D. Structural and floristic heterogeneity in a 30-year-old Costa Rican rain forest restored on pasture through natural secondary succession[J]. *Restoration Ecology*, 2010, 8(4): 380-393.

Evaluation of Management Modes on *Larix principis-rupprechtii* Plantations in Saihanba of Hebei Province, China

GE Zhao-xuan, YUAN Mei-yan, SHAN Bo-wen, HUANG Xuan-rui, ZHANG Zhi-dong

(College of Forestry, Hebei Agricultural University, Baoding 071000, Hebei, China)

Abstract: [Objective] To study the effects of various management modes of *Larix principis-rupprechtii* plantation and determine the optimal modes in order improve the forest quality. [Method] Twenty indicators, including stand growth, stand structure, natural regeneration, species diversity, soil chemical properties, etc. were used to compare the developments of 29-year-old *L. principis-rupprechtii* plantations in Saihanba of Hebei province under different management modes, i.e. structure-based forest management (S), close-to-nature forest management (N), traditional forest management (T) and the control (CK). Principal component analysis was used to assess the effects of different management modes. [Result] The results showed that there was a significant difference in the average annual growth increment of individual tree volume among different management modes ($P<0.05$), which ranked in the order of $S>N>T>CK$. Stand-volume periodic annual increment under modes S, N and CK was significantly larger than that under mode T. The stand structure indicators varied differently among management modes. There was no significant difference in average tree height among the four management modes ($P>0.05$). The amount of tree with DBH of 24~28 cm showed larger volume in plots under modes N and T, and the largest was found on the plots under mode S. Spatial structure indices including uniform angle index and coefficient of DBH variation showed no significant differences among different modes ($P>0.05$). There were significant differences in herb species richness and Shannon-Wiener diversity indicators among stands under different modes ($P<0.05$), which ranked in the order of $N>S>T>CK$. The soil indicators, including soil organic matter, alkali-hydrolyzed nitrogen, available phosphorus and available potassium, showed significantly higher value in the plots under mode S than in CK plots. The comprehensive scores of modes T, N, S and CK were -6.14, 9.30, 11.49 and -14.64, respectively. [Conclusion] It is proved that, in Saihanba, the management effect of 29-year-old *L. principis-rupprechtii* plantations under mode S is the best.

Keywords: *Larix principis-rupprechtii*; close-to-nature forest management; structure-based forest management; principal component analysis; management effect

(责任编辑: 彭南轩)