

秦岭中段华北落叶松人工林林分结构优化研究

郭怀林, 齐 伟\*

(甘肃林业职业技术学院, 甘肃 天水 741020)

**摘 要:**为了建立基于空间结构调整的华北落叶松林分结构优化方案,以秦岭中段 22 年生、40 年生华北落叶松人工林为研究对象,通过林分采伐强度确定、林分空间结构优化技术综合应用,从林分优势度、空间结构特征(角尺度  $W$ 、大小比数  $U$ 、混交度  $M$ )等方面定量分析华北落叶松人工林的林分结构变化。结果表明:秦岭中段 22 年生、40 年生华北落叶松人工林中,华北落叶松是乔木层的建群种与优势种,经营前后,22 年林分华北落叶松优势度变化不大,树种多样性保持不变,40 年生林分华北落叶松优势度有所下降;通过林分空间结构调整,22 年生林分的平均角尺度从 0.490 降到 0.478,林分分布格局更加合理,混交度由 0.283 增加为 0.396,胸径大小比数由 0.450 增至 0.497,树高大小比数由 0.487 增加到 0.492,林木个体生长的优势程度得到提高;40 年生林分的平均角尺度从 0.527 降到 0.506,林分分布格局由轻微团状分布变为随机分布,混交度由 0.348 上升到 0.477,林分混交度明显提高;胸径大小比数由 0.497 变为 0.492,树高大小比数由 0.493 变为 0.498。说明基于林分空间结构分析的择伐方案使林分结构得到了显著的优化,是提升秦岭中段华北落叶松人工林林分质量的有效手段。

**关键词:**华北落叶松人工林;林分结构;优化

**中图分类号:**      **文献标志码:**A      **文章编号:**1001-7461(2017)05-0144-06

Forest Stand Structure Optimization of *Larix principis-rupprechtii* Plantation  
in the Central Area of Qinling Mountains

GUO Hui-lin, QI Wei\*

(Gansu Forestry Technology College, Tianshui, Gansu 741020, China)

**Abstract:** In order to establish *Larix principis-rupprechtii* structure optimization plan based on spatial structure adjustment, 22- and 40-year-old plantations in the central area of Qinling Mountains were selected as the research objects. Through the determination of stand cutting intensity and the application of spatial structure optimization technology, changes of forest stand spatial structure were analyzed quantitatively from the stand dominance and spatial structure characteristics, e. g., uniform angle index ( $W$ ), neighborhood comparison ( $U$ ) and mingling ( $M$ ) degree. The results showed that *L. pricipis-rupprechtii* was the dominant and constructive species of the tree layers. Before and after forest managements, the stand dominance changed little, the tree species diversity remained the same in 22-year-old forest stand, but the stand dominance decreased a little in 40-year-old stand. Through the spatial structure adjustment of stand, in 22-year-old stand, the mean value of uniform angle index turned into 0.478 from 0.490, indicating the stand was more reasonable. The mean value of mingling degree changed form 0.283 into 0.396, meanwhile, the mean value of diameter at breast height (DBH) neighborhood raised from 0.450 to 0.497, and height neighborhood raised from 0.487 to 0.492. The advantage degree of individual tree growth was improved. In

收稿日期:2016-12-01    修回日期:2017-03-01

作者简介:郭怀林,男,副教授,研究方向:森林经营及病虫害防治。E-mail:466890579@qq.com

\*通信作者:齐 伟,女,副教授,研究方向:森林植物及森林培育。E-mail:249329319@qq.com

40-year-old stand,the mean value of uniform angle index turned into 0.527 from 0.506,indicating the stand structure changed from slightly aggregative distribution to random distribution and the mean value of mingling degree raised from 0.348 to 0.477,showing that the mingling degree was improved significantly. The mean value of DBH neighborhood raised from 0.497 to 0.492,and height neighborhood raised from 0.493 to 0.498. These suggested that the stand structure was optimized significantly by stand selective cutting scheme based on the stand spatial structure analysis,and the scheme was the effective measure in improving the *L. principis-rupprechtii* plantation quality in the central area of Qinling Mountains.

**Key words:***Larix principis-rupprechtii* plantation; forest stand spatial structure; optimization

华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)是华北亚高山地区的主要造林树种。陕西秦岭林区,落叶松面积达 0.79 万 hm<sup>2</sup>,其中人工林幼龄林面积 6 094 hm<sup>2</sup>、中龄林面积 411 hm<sup>2</sup>、近熟林面积 1 372 hm<sup>2</sup><sup>[1]</sup>。长期以来,由于缺乏对人工林结构优化方面的研究和技术指导,造成人工林质量低劣,影响了综合功能的发挥。截止目前,对秦岭中段华北落叶松人工林的雨淞雪及病虫害危害<sup>[2-3]</sup>、土壤特征<sup>[4-5]</sup>、群落与种群特征<sup>[6-8]</sup>、人工林空间结构及经营<sup>[9-12]</sup>等方面的研究已较多,但未见针对秦岭中部华北落叶松人工林林分结构优化方面的研究报道。

为了得到华北落叶松林分结构优化的最佳方案,以秦岭中部区域的 22 年生、40 年生华北落叶松人工林作为研究对象,以林分空间结构调整为基础进行模拟采伐,通过对采取采伐措施前后的林分结构量化指标对比分析,得到模拟采伐择伐方案的林分结构优化评价结果。研究结果可为秦岭及国内其它相似气候与经营措施区华北落叶松人工林的抚育改良提供技术指导。

## 1 研究区概况

本研究在位于秦岭中部的宁东林业局旬阳坝林场及西北农林科技大学火地塘试验林场进行。旬阳坝林场以中山为主,兼有低山、丘陵、河谷地形,地势南高北低,平均海拔 1 300 m,属北亚热带温暖湿润

气候区,雨量充沛、四季差异较大,年均气温 10℃,年均降雨量约 1 100 mm,年均蒸发量约 1 220 mm,无霜期约 200 d,年均日照时数约 1 640 h,≥10℃的积温约为 4 000℃;土壤为矿砾质壤粘土;林场中的华北落叶松人工林以幼龄林为主,面积约为 184 hm<sup>2</sup><sup>[12]</sup>。火地塘试验林场地处北亚热带气候区,地形复杂,坡度 20°~50°,山地垂直落差大,海拔 1 400~2 480 m,年平均降雨量 1 000 mm 左右,年均温度 12.69℃,年均无霜期 180 d,年均日照时数约 1 328 h;土壤主要有山地棕壤、暗棕壤和山地草甸土等;华北落叶松人工林主要分布于平河梁营林区,面积约为 33.3 hm<sup>2</sup><sup>[12]</sup>。

## 2 研究方法

### 2.1 样地设置及调查

按照典型选样法,在火地塘林场和旬阳坝林场共设置 2 块标准地(样地基本情况见表 1)。样地面积为 54 m×108 m,沿等高线方向设置长边。通过相邻网格法对样地全面调查:将样地从左到右、从上到下依次划分为 162 个小样方(6 m×6 m);在每个小样方内对所有胸径达到 7 cm 的乔木,测定胸径、树高及枝下高,并测定乔木南北向和东西向的冠幅,将平均值作为平均冠幅;使用网格对林木定位,并记录林木个体的位置信息。

表 1 华北落叶松人工林样地概况

Table 1 General conditions of the plots of *L. principis-rupprechtii* plantations

林龄 /年	海拔 /m	坡向	坡度 /(°)	坡位	平均胸径 /cm	平均树高 /m	郁闭度	密度 /(株·hm <sup>-2</sup> )
22	1 498	北 N	34	下 Down	11.2	14.3	0.75	1 915
40	2 134	东南 SE	8	下 Down	19.5	17.6	0.8	945

### 2.2 林分结构优化方法

2.2.1 林分采伐强度确定 张丽楠<sup>[10]</sup>等建立了华北落叶松人工林立木胸径和树冠面积的最佳回归模型:

$$Cws=0.044\ 6D^2-0.755\ 1D+6.753\ 3(R^2=0.675,P<0.001)\tag{1}$$

式中, $Cws$  为树冠垂直投影面积(m<sup>2</sup>), $D$  为胸径(cm),公式适用条件为  $D\geq 8.5$  cm。

单位面积理论立木株数计算公式<sup>[13-14]</sup>为:

$$N_0=10\ 000/Cws\tag{2}$$

式中, $N_0$  为单位面积立木的理论株数(株/hm<sup>2</sup>), $Cws$  为一定林分不同径级树冠垂直投影的平均面

积( $m^2$ )。此时,则林分中无林间空隙、树冠重叠。

本研究根据林分的平均胸径和预期郁闭度,通过式(1)和式(2)计算出林分的适宜经营密度。如果现实密度比计算得到的适宜经营密度大,则该林分需要间伐,间伐株数为现实株数与适宜经营株数之差,间伐株数与现实林分密度的比值即为抚育间伐株数强度。

2.2.2 林分空间结构调整 基于空间结构调整的林分优化技术应参照研究区域同地段的原始林分结构特征,按照森林演替的一般规律从以下 3 个方面进行。

2.2.2.1 林分水平分布格局调整 相关研究表明,林分在未受严重干扰的情况下,经过漫长自然演替后,水平分布格局则呈现随机分布<sup>[14-15]</sup>。对林分在水平分布上可采用间伐措施使其由非随机分布逐渐转向随机分布,同时分析林分角尺度频率分布是否为正态分布<sup>[16]</sup>。

角尺度计算式:

$$w_i=\frac{1}{4}\sum_{j=1}^nZ_{ij}$$

(3)

式中, $Z_{ij}$ 为离散型变量,其值定义为当第  $j$  个  $\alpha$  角小于标准角  $\alpha_0$  时, $Z_{ij}=1$ ;反之, $Z_{ij}=0$ 。标准角  $\alpha_0$  可能取值 $\geq 60^\circ\leq 90^\circ$ ,研究证明, $72^\circ$ 为最优标准角<sup>[16]</sup>。

林分平均角尺度( $\bar{W}$ )用来判定林木分布格局,其计算式:

$$\bar{W}=\frac{1}{n}\sum_{j=1}^nW_i$$

(4)

式中, $W_i$ 是第  $i$  株参照树的角尺度, $n$ 为参照树的总株数。惠刚盈<sup>[17]</sup>等研究表明,林分平均角尺度在 0.475 与 0.517 之间时,分布格局可判定为随机分布;当林分平均角尺度 $<0.475$  时,分布格局为均匀分布;当平均角尺度 $>0.517$ ,林分分布格局则是团状分布。

在林分中应保持角尺度  $W_i=0.5$  的单木比例最高,如果角尺度频率分布不为正态分布,需要把林分中所有取该值的林木作为初选采伐木<sup>[17]</sup>。

2.2.2.2 林分混交度调整 已有研究表明,林分经过演替,混交度会逐步升高,人为调整林分时应扩大混交度<sup>[18]</sup>。在华北落叶松人工林中要通过择伐措

施,使林分的混交度提高。由于华北落叶松人工林通常树种组成单一,在择伐时要将主要树种混交度取值较低的落叶松单木作为采伐对象<sup>[16]</sup>。

2.2.2.3 林木大小比数调整 依据现实林分内各种树的生物学和生态学特性,有意识地调整林木个体的大小分化程度,通过对主要树种择伐,使林分中主要树种的大、中、小径木株数分布逐步趋于合理。综合考虑单木的胸径、树高、生物量和冠幅大小比数,同时结合树种的喜光特性,确定择伐备选木<sup>[16]</sup>。华北落叶松是喜光树种,大小比数取值较高(如 0.75、1)的单木成为备伐木的可能性更大。在筛选采伐木时,可根据 Johann 提出的临界距离计算公式进一步计算<sup>[19]</sup>。临界距离计算公式:

$$Giz=\frac{h_z}{A}\cdot\frac{d_i}{d_z}$$

(5)

式中, $h_z$ 为目的树  $Z$  的树高, $d_z$ 为目的树  $Z$  的胸径; $d_i$ 为竞争树  $i$  的胸径, $A$ 则为采伐权重的定义参数。如果目的树与竞争树的实际距离小于临界距离  $G_{iz}$ ,对目的树的生长形成干扰时,则需要伐除。

本文以林木空间结构单元为单位,利用角尺度、大小比数、混交度指标筛选备伐木,结合非空间结构因素最终确定采伐对象,分别标记保留木和采伐木,采用单株择伐方式进行林分空间结构调整,从而提高林分质量。

3 结果与分析

3.1 林分优势度分析

依据调查结果,对华北落叶松林分进行优势度分析,结果见表 2。

从表 2 可以看出,22 年生、40 年生林分中华北落叶松的相对多度、相对显著度都大,其株数比例分别占到总株数的 72.07%、61.87%,而断面积比例达到 75.49%、65.14%,平均胸径分别为 11.4 cm、19.3 cm,其他树种的株数比例和断面积比例都比较低,整个林分各树种平均胸径相差不大。在 22 年生、40 年生林分中,华北落叶松的优势度、相对显著度最高,为该林分的建群种。油松、锐齿栎、红桦等树种个体,主要来自于造林幸存以及自然更新,其数量占比、断面积均不占优势。

表 2 华北落叶松优势度分析

Table 2 Quantitative characteristics of *L. principis-rupprechtii* in plots

树龄/a	相对多度/%		相对显著度/%		树种优势度		胸径/cm		
	伐前	伐后	伐前	伐后	伐前	伐后	最大	最小	平均
22	72.07	73.21	75.49	75.82	0.621	0.621	21.3	7.0	11.4
40	61.87	60.35	65.14	63.39	0.589	0.586	32.6	7.7	19.3

经营前后林分中所有树种都得到了保留,树种多样性保持不变。22 年生林分中华北落叶松的密度变化较大,但其相对多度和相对显著度仍占有优势。从各树种优势度来说 22 年生林分华北落叶松优势度变化不大,主要是林分内多为中、小径木,符合对林木直径各径阶分布调整的要求。40 年生林分华北落叶松优势度有所下降,青杆、华山松优势度上升明显,其他树种变化不明显。

表 3 22 年生、40 年生林分空间结构特征

Table 3 Spatial structure characteristics of 22- and 40-year-old stands

林龄/a	参数取值	角尺度		胸径大小比数		树高大小比数		混交度	
		采伐前	采伐后	采伐前	采伐后	采伐前	采伐后	采伐前	采伐后
22	0	0.020	0.021	0.211	0.206	0.215	0.197	0.494	0.450
	0.25	0.219	0.234	0.192	0.193	0.207	0.219	0.091	0.091
	0.5	0.565	0.570	0.191	0.203	0.192	0.196	0.138	0.169
	0.75	0.180	0.167	0.203	0.200	0.189	0.193	0.112	0.149
	1	0.017	0.010	0.204	0.197	0.197	0.195	0.165	0.177
	平均	0.490	0.479	0.45	0.497	0.487	0.492	0.283	0.396
40	0	0.005	0.005	0.203	0.206	0.207	0.202	0.271	0.231
	0.25	0.164	0.193	0.208	0.203	0.215	0.209	0.206	0.203
	0.5	0.603	0.617	0.180	0.198	0.171	0.183	0.161	0.183
	0.75	0.178	0.143	0.215	0.203	0.216	0.206	0.182	0.193
	1	0.051	0.043	0.194	0.190	0.191	0.200	0.180	0.190
	平均	0.527	0.506	0.497	0.492	0.493	0.498	0.348	0.477

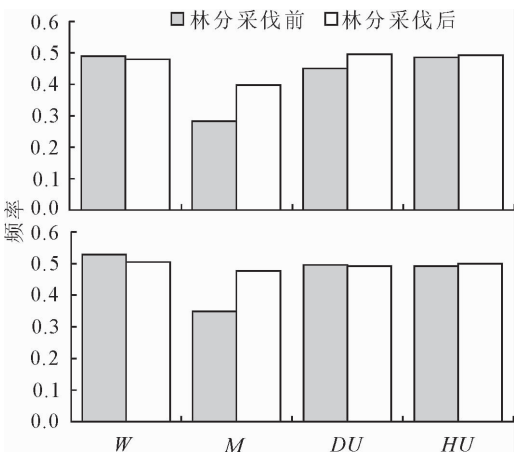
由表 3 可以看出,22 年生林分样地林木角尺度分布频率左侧大于右侧,其角尺度的均值为 0.485,落在 0.475 与 0.517 之间,样地内林木的整体分布格局属于随机分布。40 年林分样地林木角尺度分布频率右侧大于左侧,其角尺度均值为 0.527,>0.517,说明样地内林木整体分布格局属于微团状分布。

22 年生、40 年生林分胸径、树高大小比数在各级上分布均匀,都在 20%左右,胸径平均大小比数分别为 0.45、0.497,树高平均大小比数分别为 0.487、0.493,基本处于中庸状态,由此可见,胸径大小比数和树高大小比数各级分布频率基本一致,平均大小比数略有差异。华北落叶松的大小比数的分布规律与林分基本一致,其他伴生树种的分化程度变异较大。可见,华北落叶松的大小比数分布很大程度上决定了该林分的大小比数的分布规律。

22 年生、40 年生林分平均混交度分别为0.283、0.348,华北落叶松平均混交度分别为 0.195、0.246,建群种华北落叶松个体混交度低,多为零度混交和弱度混交,又因为华北落叶松株数比例占林分的比例较大,整个林分林木聚集度高。除华北落叶松外的其他树种因为其种群数量太少,分布随机性高,混交度较好,多为强度以上混交,同时因为树种的株数和直径结构等不同,树种之间的混交略有差异。

3.2 林分空间结构特征分析

利用 Winkelmass1.0 软件对调查数据重新进行林木定位计算,林分空间结构参数见表 3。林分各样地面积 0.583 2 hm<sup>2</sup>,22 年生林分中胸径>7 cm 的林木共有 1 117 株,其中,落在 5 m 缓冲区内 373 株,核心区 744 株,占样地林木总数的 66.6%。40 年生林分共 551 株,其中,落在 5 m 缓冲区内 123 株,核心区内 428 株,占样地林木总株数的 77.7%。



注:DU为林分胸径大小比数;HU为树高大小比数。

图 1 22 年生、40 年生林分经营前后林分空间结构变化

Fig. 1 Changes of characteristics of spatial structure after cutting in 22- and 40-year-old stand

从表 3、图 1 可以看出,通过林木结构单元调整法,22 年生林分  $W_i=0.75、1$  的比例下降 2.9%,林分平均角尺度从 0.490 降低到 0.479,林分分布格局更加合理; $M_i=0、0.25$  的比例下降 4.4%,林分平均混交度由 0.283 增大到 0.396;胸径大小比数由 0.450 到 0.497,树高大小比数由 0.487 到 0.492,林木个体生长的优势程度得到提高;40 年生林分  $W_i=0.75、1$  的比例下降 4.3%,林分的平均角尺度从 0.527 降低到 0.506,林分分布格局由轻微

团状分布变为随机分布; $M_i=0、0.25$ 的比例下降4.3%,林分平均混交度由0.348上升到0.477,林分混交度明显提高;胸径大小比数由0.497变为0.492,树高大小比数由0.493变为0.498,略有上升。基于林分空间结构的择伐,使林分空间结构得到了显著优化,质量得到了提高,达到了预期目的。

3.3 采伐木确定

3.3.1 采伐强度确定 根据计算结果,22年生林分平均胸径11.4 cm,落叶松人工林密度为1 915株/hm<sup>2</sup>,40年生林分平均胸径19.3 cm,落叶松人工林密度为945株/hm<sup>2</sup>。根据张丽楠<sup>[9]</sup>等编制的宁东林区落叶松人工林不同径阶密度表可知,22年生林分最适宜的理论密度为2 602株/hm<sup>2</sup>,伐后林分郁闭度控制在0.70左右,所以采伐株数为170株/hm<sup>2</sup>;40年生林分最适宜的理论密度为1 176株/hm<sup>2</sup>,伐后林分郁闭度控制在0.75左右,所以采伐株数为70株/hm<sup>2</sup>,因此,22年生林分的最适抚育间伐株数强度为8.9%,40年生林分最适抚育间伐株数强度为7.4%。

3.3.2 采伐木筛选

3.3.2.1 角尺度指标 根据调查及分析结果,20年林分的平均角尺度 $\bar{W}=0.485$ ,在0.475~0.517,样地内林木的分布格局整体上属随机分布。40年林分的平均角尺度 $W=0.527>0.517$ ,林木分布格局表现出一定的团状分布状态,要向随机分布调整,对采伐木的选择应优先考虑角尺度 $>0.527$ 的结构单元,在此林分内有 $W=0.75$ 和 $W=1.00$ 的两个结构单元。将这2个结构单元的单木,以及角尺度频率分布中不遵从正态分布的那些植株确定为采伐的初选木。

3.3.2.2 混交度指标 在间伐前,22年生林分的平均混交度为0.283,主要建群种华北落叶松的混交度为0.195,都较低;40年生林分分别为0.348、0.246。因此,混角度的调整主要在华北落叶松种群中进行,对参照树取值为0.00、0.25的林木结构单元作为调整对象,间伐后,22年生和40年生林分平均混交度分别为0.396、0.477。

3.3.2.3 大小比数指标 根据分析结果,22年生、40年生林分中的参照树整体处于中庸状态,平均大小比数分别为0.500、0.497。由于华北落叶松属于喜光树种,将大小比值为1.00、0.75和0.50的单木全都确定为择伐木。在筛选出备选木后,另外考虑为乡土树种、珍稀濒危树种以及主要建群树种生长保留适宜的空间,从而最终确定标准地内符合调整要求的林木结构单元。以22年生林分6号参照树和40年生林分157号参照树构成的结构单元具体

分析:6号参照树初选采伐木是3、4号树,3号胸径12.4 cm、大小比数0.75,4号胸径15.9 cm、大小比数0,两者距离0.1 m,说明3号受周围林木挤压,处于劣势,应予以伐除;157号参照树构成的结构单元中,初选采伐木为154、156号树,154号大小比数0.75,距153号1.0 m,为保证混交度156号暂不予伐除,所以154号应伐除。以此类推分别分析各初选采伐木单元,确定最终的采伐木结构单元。

3.3.2.4 干扰强度 秦岭中段华北落叶松人工林22年生林分密度1 915株/hm<sup>2</sup>,依调整方案共确定采伐木101株,40年生林分密度为945株/hm<sup>2</sup>,确定采伐木39株。22年生林分按株数、胸高断面积、蓄积计算采伐强度分别为9.04%、8.25%、7.85%,40年林分分别为7.08%、5.70%、5.72%。因此本次采伐强度较小,属于轻度干扰,符合林木结构调整的原则。

4 结论与讨论

华北落叶松在空间结构单元中大小比数分布规律与林分基本一致,在华北落叶松人工林中华北落叶松为优势种和建群种,其株数比例和断面积比例均达60%以上,林分处于零度混交到中度混交情况较多,整体混交度不高。由此可见,华北落叶松的大小比数分布很大程度上决定了该林分的大小比数的分布规律。

在经营前后所有树种都得到了保留,树种多样性保持不变,表明择伐方式优化林分结构科学有效。22年生林分中华北落叶松密度调整后,相对多度和相对显著度仍占有优势,优势度变化不大;由于40年生林分华北落叶松林分中青杆、华山松优势度上升明显,优势度有所下降。

通过定量分析,秦岭中段华北落叶松22年生、40年生林分空间结构得到明显优化。22年生林分的平均角尺度从0.490降低到0.478,林分分布格局更加合理;混交度由0.283变到0.396;胸径大小比数由0.450到0.497,树高大小比数由0.487到0.492,林木个体生长的优势程度得到提高;40年生林分的平均角尺度从0.527降低到0.506,林分分布格局由轻微团状分布变为随机分布;混交度由0.348上升到0.477,林分混交度明显提高;胸径大小比数由0.497变为0.492,树高大小比数由0.493变为0.498。本次采伐主要调整林分角尺度、混交度,由于林分为华北落叶松人工同龄纯林,树种较单一、株数径阶分布集中,为防止林分结构的剧烈变化,选择低强度单株择伐方式进行,同时林分结构调整受多方面因素限制,致使林分大小比数变化较小。

因此,在林木结构调整优化的漫长过程中,林分空间结构也必须通过多次调整才能趋于理想状态,以实现其功能的最大发挥。

本次对林分空间结构的调整首先只采用单株择伐的方式进行,补植、补造、更新是对林木空间结构优化的有效补充,尤其是林中空地;其次是如何尽早调整天然更新幼苗、幼树的分布格局,例如人工补植或疏伐;再者采伐木及保留木在现地有效落实模拟有待进一步研究,希望后续的研究能在这些方面取得新突破。

本研究中大小比数的分析是利用 Winkelmass1.0 进行的,计算中未能将树高、冠幅、胸径等指标同时引入,只采用树种的胸径作为分析对象,空间维数单一,未能充分分析林木的优势程度。需要进一步研究完善,同时引入胸径、树高、冠幅、生物量等指数,作为评价指标分析林分中树种优势度的方法。

参考文献:

[1] 陕西省林业发展区划办公室. 陕西省林业发展区划[M]. 西安: 陕西省科学技术出版社,2008.

[2] 陈海滨,雷瑞德,尚廉斌,等. 秦岭南坡中山地带“雨淞+湿雪”对华北落叶松人工林危害规律的探讨[J]. 西北林学院学报, 1996,11(Supp.):152-156.

CHEN H B,LEI R D,SHANG L B,*et al.* Imact of “glaze+ wet snow” on larixpincipis-rupprechtii plantation at middle zone of south-facing slope of the Qinling Mountains[J]. Journal of Northwest Forest College,1996,11(Supp.):152-156. (in Chinese)

[3] 李孟楼,刘朝斌. 秦岭南坡火地塘林区落叶松人工林的昆虫群落及其结构[J]. 西北林学院学报,1995,10(1):68-73.

LI M L,LIU C B. Inseet community and strueture in *Larch* forest on south slope of Qinling Mountain[J]. Journal of Northwest Forest College,1995,10(1):68-73. (in Chinese)

[4] 齐高强,耿增超,周锋利. 秦岭南坡火地塘林区华北落叶松人工林土壤酶活性研究[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版, 2005,33(3):81-84.

QI G Q,GENG Z C,ZHOU F L. Study on the activity of soil enzymes inLarixpincipis-rupprechtii stands at Huoditang on the south slope of the Qingling Mountain[J]. Journal of Northwest A&F University:Nat. Sci. Edi.,2005,33(3):81-84. (in Chinese)

[5] 姚拓,杨俊秀,景耀,等. 秦岭落叶松林土壤真菌种群及其生态特性研究[J]. 生态学杂志,1998,17(4):7-13.

YAO T,YANG J X,JING Y,*et al.* Population and ecological characteristics of soil fungi in *Larch* plantation on Qinling Mountains[J]. Chinese Journal of Ecology,1998,17(4):7-13. (in Chinese)

[6] 石慧,王孝安,郭华. 秦岭华北落叶松人工林群落结构及物种多样性[J]. 安徽农学通报,2008,14(15):159-162.

[7] 王雯雯,欧景莉,刘晓,等. 秦岭华北落叶松林乔木种群结构与更新[J]. 生态科学,2011,30(6):618-623.

[8] 彭舜磊,王得祥,柴宗政. 外来树种华北落叶松引种对秦岭森林

群落的影响[J]. 生态学杂志,2012,31(9):2170-2176.

[9] 张丽楠,王得祥,郝亚中,等. 陕西宁东林业局华北落叶松人工林最适经营密度研究[J]. 西北林学院学报,2013,28(1):146-150.

ZHANG L N,WANG D X,HAO Y Z,*et al.* Optimal management density of *Larix principis-rupprechtii* plantations of Ningdong forestry bureau in Shaanxi Province[J]. Journal of Northwest Forestry University,2013,28(1):146-150. (in Chinese)

[10] 张丽楠. 秦岭宁东林区落叶松人工林特征及近自然改造措施研究[D]. 杨陵:西北农林科技大学,2012.

[11] 柴宗政,王得祥,郝亚中,等. 秦岭中段华北落叶松人工林演替动态[J]. 林业科学,2014,50(2):14-21.

CHAI Z Z,WANG D X,HAO Y Z,*et al.* Succession dynamics of *Larix principis-rupprechtii* plantationin intermediate section of Qinling Mountains[J]. Scientia Silvae Sinicae,2014,50(2):14-21. (in Chinese)

[12] 张岗岗,王得祥,柴宗政,等. 秦岭中段华北落叶松人工林空间结构的二元分布特征[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2014,42(9):33-40.

ZHANG G G,WANG D X,CHAI Z Z,*et al.* Bivariate distributionof spatial structure in *Larix principis-rupprechtii* plantation in the middle section of Qinling Mountains [J]. Journal of Northwest A&F University:Nat. Sci. Ed.,2014,42(9):33-40. (in Chinese)

[13] 涂育合,叶功富,林武星,等. 杉木大径材定向培育的适宜经营密度[J]. 浙江林学院学报,2005,22(5):530-534.

TU Y H,YE G X,LIN W X,*et al.* Big-diameter-oriented cultivation techniques of *Cunninghami alanceolata* with suitable mangagement density[J]. Journal of Zhejiang Forest College, 2005,22(5):530-534. (in Chinese)

[14] 惠刚盈,von Gadow K,胡艳波,等. 林木分布格局类型的角尺度均值分析方法[J]. 生态学报,2004,24(6):1225-1229.

HUI G Y,KLAUS V G,HU Y B,*et al.* Characterizing forest spatial distribution pattern with the mean value of uniform angle index[J]. Acta Ecologica Sinica,2004,24(6):1225-1229. (in Chinese)

[15] 惠刚盈,von Gadow K,胡艳波. 林分空间结构参数角尺度的标准角选择[J]. 林业科学研究,2004,17(6):687-692.

[16] 董灵波,刘兆刚. 樟子松人工林空间结构优化及可视化模拟[J]. 林业科学,2012,48(10):77-85.

DONG L B,LIU Z G. Visual management simulation for *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation based on optimized spatial structure[J]. Scientia Silvae Sinicae,2012,48(10):77-85. (in Chinese)

[17] 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.

[18] 陈昌雄,刘健,余坤勇. 基于空间结构优化的马尾松阔叶树混交林模拟采伐[J]. 西南林学院学报,2010,30(6):29-37.

CHEN C X,LIU J,YU K Y. Simulated cutting for the mixed forest of *Pinus massoniana* and broad-leaved tree species based optimized spatial structure[J]. Journal of Southwest Forest University,2010,30(6):29-37. (in Chinese)

[19] 安慧君,张韬. 异林混交林结构量化分析[M]. 北京:中国环境科学出版社,2004.