

DOI:10.13275/j.cnki.lykxyj.2021.005.012

林分结构对辽东山区蒙古栎林天然更新的影响

董莉莉, 刘红民, 赵济川, 高英旭, 汪成成, 范俊岗*

(辽宁省林业科学研究所, 辽宁 沈阳 110032)

摘要: [目的] 探讨林分结构与林下更新幼苗之间的关系, 为人工促进天然更新提供理论依据。[方法] 以辽东山区蒙古栎林为研究对象, 采用拟合模型和 Pearson 相关分析法, 研究了林分空间结构对蒙古栎天然更新的影响。[结果] (1) 林分断面积对更新幼苗密度影响显著, 随林分断面积的增加, 幼苗密度呈增加趋势, 当断面积达到 $31 \text{ m}^2 \cdot \text{hm}^{-2}$, 幼苗密度增加逐渐放缓; (2) 林分断面积与幼苗基径和苗高呈显著负相关关系 ($P < 0.05$); (3) 林分竞争指数和密集度均与幼苗密度之间存在典型的抛物线关系, 与密集度相比, 竞争指数对幼苗密度的影响更显著; (4) 林分空间结构对更新幼苗的物种多样性影响显著, 林分的混交度越大, 垂直结构越复杂, 更新幼苗的种类和 Shannon-Wiener 多样性越高。(5) 多元逐步回归分析结果显示: 林分断面积、竞争指数和密集度是影响蒙古栎林更新幼苗密度的主要因子。[结论] 人工促进蒙古栎林天然更新, 改善林下物种多样性, 可通过调控林分断面积、竞争指数和密集度的经营方式来实现。

关键词: 林分空间结构; 林分密度; 幼苗更新; 蒙古栎林

中图分类号: S754.1

文献标志码: A

文章编号: 1001-1498(2021)05-0104-07

森林天然更新是森林生态系统自我繁衍恢复的手段^[1], 对未来森林群落的组成、结构及其生物多样性具有十分重要的作用^[2], 是森林经营和森林生态学研究的重要内容之一。近年来, 有关森林天然更新的研究主要集中在幼苗组成和空间分布格局^[3]、更新动态以及更新影响因素^[4]等方面, 其中在对天然更新影响因素的研究中, 主要关注环境因子^[5-7] (光照、土壤)、地形因子^[8-9]、林分因子^[10-11] (郁闭度、枯落物、灌草盖度)、种内种间竞争关系^[12] 以及干扰^[13] 等方面的影响, 对于林分结构尤其是林分空间结构对天然更新的影响研究较少, 有研究表明: 林分水平结构和垂直结构直接决定着林下的光照、降水以及土壤养分含量, 进而对更新幼苗的建立、存活和生长产生不同程度的影响^[14-17], 是森林天然更新成功的关键因子之一^[12], 同时林分

空间结构也是森林经营过程中最有可能调控的因子^[18], 因此, 开展林分空间结构对天然更新影响研究, 揭示林分空间结构对更新幼苗的影响机制, 对人工促进天然更新, 实现森林的可持续发展具有重要意义。

蒙古栎 (*Quercus mongolica* Fisch.) 林是东北地区常见的典型森林类型之一, 其面积占东北有林地面积的 15%~20%, 在涵养水源、保持水土及维持生态稳定性方面发挥了重要作用, 具有较高的经济和生态价值。近年来, 由于经营不当, 部分蒙古栎林出现天然更新差、幼苗存活率低, 幼苗难以成树的现象。因此, 本研究以辽东山区蒙古栎林为研究对象, 探讨林分结构对蒙古栎林更新幼苗的影响, 旨在解决蒙古栎林天然更新障碍的问题, 以期人工促进蒙古栎林天然更新提供理论依据。

收稿日期: 2021-01-08 修回日期: 2021-04-28

基金项目: 辽宁省“兴辽英才计划”项目 (XLYC1902081); 国家重点研发计划项目 (2017YFC0504105); 辽宁省农业科学院院长基金 (2021QN2012)

* 通讯作者: 范俊岗, E-mail: fanjungang178@163.com

1 研究区概况

辽东山区地处长白山脉龙岗山脉北麓, 地理坐标为 40°00′~43°09′ N、122°53′~125°47′ E, 属温带大陆性湿润季风气候, 年均气温 4~11℃, 年均降水量 700~850 mm, 年蒸发量 925~1 284 mm, $\geq 10^\circ\text{C}$ 的年有效活动积温为 2 497.5~3 943.0℃, 无霜期 120~139 d, 年日照时数为 2 403.1 h。土壤以棕壤暗棕壤为主。研究区主要乔木树种有红松 (*Pinus koraiensis* Sieb.)、蒙古栎、水曲柳 (*Fraxinus mandshurica* Rupr.)、胡桃楸 (*Juglans mandshurica* Maxim.)、沙松 (*Abies holophylla* Maxim.)、紫杉 (*Taxus cuspidata* Sieb. et Zucc.)、色木槭 (*Acer mono* Maxim.)、硕桦 (*Betula costata* Trautv.)、拧筋槭 (*Acer triflorum* Komarov)、毛榛子 (*Corylus mandshurica* Maxim.)、东北山梅花 (*Philadelphus schrenkii* Rupr.)、暴马丁香 (*Syringa reticulata* subsp. *amurensis*)、东北赤杨 (*Alnus mandshurica* (Call.) Hand.-Mazz.) 等; 林下灌木主要有胡枝子 (*Lespedeza bicolor* Turcz.)、龙牙楸木 (*Aralia elata* (Miq.) Seem.)、东北山梅花 (*Philadelphus schrenkii* Rupr.)、卫矛 (*Evonymus alatus* (Thunb.) Sieb.)、迎红杜鹃 (*Rhododendron mucronulatum* Turcz.) 等; 草本主要有关苍术 (*Atractylodes lancea* (Thunb.) DC.)、尾叶香茶菜 (*Rabdosia excisa* (Maxim.) Hara)、水金凤 (*Impatiens noli-tangere* L.)、荨麻叶龙头草 (*Meehania urticifolia* (Miq.) Makino) 等。藤本植物有软枣猕猴桃 (*Actinidia arguta* (Sieb. et Zucc.) Planch. ex Miq.)、五味子 (*Schisandra chinensis* (Turcz.) Baill.)、南蛇藤 (*Celastrus orbiculatus* Thunb.) 等。

2 研究方法

2.1 样地调查

2019年和2020年的6—9月, 分别在新宾县赵家林场、桓仁县八里甸子林场、本溪县碱厂林场、岫岩县刘家河镇等蒙古栎次生林内, 采用典型抽样法, 分别设置 25 m × 25 m 的矩形样地 28 块、0.1 hm² 的圆形样地 9 块, 共计 37 块样地。对样地内胸径 ≥ 5 cm 的林木进行每木检尺, 记录树种名称、位置、胸径、树高、冠幅、第一枝下高及健康情况。同时, 在样地内随机设置 3 个 5 m × 5 m

(矩形样地)、半径 2 m 圆形样地的更新苗小样方, 记录其中胸径 < 5 cm 的所有乔木更新幼苗的种类、基径、苗高和盖度等。利用手持 GPS 记录样地的地理位置、海拔、坡位、坡度、坡向等, 样地基本情况见表 1。

表 1 样地基本概况

Table 1 Basic characteristic of the sampling plots

样地号 Sample plot No.	海拔 Altitude/ m	坡度 Slope/ (°)	坡向 Aspect	坡位 Slope position	密度 Density/ (tree·hm ⁻²)	平均 胸径 Mean diameter/ cm	平均 树高 Mean height/ m
1	603	27	北	上	688	22.3	15.5
2	606	20	北	上	608	22.2	14.4
3	606	17	北	上	528	20.7	13.1
4	598	20	北	上	528	22.4	15.2
5	713	25	南	上	832	19.6	12.5
6	696	25	南	上	800	21.1	13.9
7	755	25	南	中	720	22.7	14.5
8	755	24	南	中	640	18.9	11.1
9	656	30	南	中	880	21.0	16.8
10	645	21	南	中	944	21.4	17.6
11	641	25	西北	中	816	23.0	20.3
12	646	20	南	中	656	23.6	18.1
13	685	27	南	上	1360	18.5	14.0
14	680	17.7	南	上	1072	19.9	15.4
15	679	20	南	上	1168	20.1	15.2
16	687	31	南	上	1152	18.2	14.0
17	588	18.9	西	中	528	19.4	13.3
18	617	28	西	中	617	18.8	12.1
19	599	11	西	中	720	19.6	12.5
20	615	22.5	西南	中	624	22.8	13.9
21	650	17	西南	下	656	25.3	14.7
22	644	16	西南	下	464	32.0	16.9
23	634	16	西南	下	480	28.8	16.2
24	638	14	西南	下	384	28.4	14.5
25	655	24	东	上	496	23.0	15.3
26	651	19	东	上	560	24.9	16.0
27	650	17	东	上	448	24.6	14.9
28	650	18	东	上	704	23.6	13.9
29	317	24	东	中	230	31.0	17.4
30	220	19	南	中	150	31.7	14.2
31	495	10	东	中	240	34.8	17.0
32	303	27	南	上	470	17.0	13.0
33	381	19	西	中	450	16.3	12.7
34	330	19	北	上	1250	10.8	10.9
35	391	25	西南	中	480	20.5	10.1
36	395	35	西	中	1040	12.7	9.1
37	214	29	西北	中	620	19.0	9.9

2.2 林分结构指数计算

采用基面积、混交度 (M_i)、角尺度 (W_i)、林层指数 (S_i)、密集度 (C_i)、Hegyi 竞争指数 (CI_i) 作为表达林分结构的参数。为避免边缘效应对林分结构的影响, 设置 3 m 为缓冲区。本研究结构单元 n 取 4。

混交度 (M_i) 表达树种空间隔离程度的指数^[19]。

$$M_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n V_{ij} \quad (1)$$

式中: 当参照树 i 与相邻木 j 非同种时, $V_{ij} = 1$, 反之 $V_{ij} = 0$; n 为最近邻木株数 (下同)。

角尺度 (W_i) 用来反映林分林木的水平空间分布格局^[20]。

$$W_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n Z_{ij} \quad (2)$$

式中: 当第 j 个 α 角小于标准角 α_0 时, $Z_{ij} = 1$, 反之 $Z_{ij} = 0$; $\alpha_0 = 360 / (n + 1)$ 。

林层指数 (S_i) 表达林层的垂直结构, 其反映了空间结构单元中林层的垂直结构分布格局及林层多样性^[21]。

$$S_i = \frac{Z_i}{3} \times \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n S_{ij} \quad (3)$$

式中: Z_i 为参照树的空间结构单元内林层的个数; 当参照树与最近邻近木第 j 株相邻木属同一林层时, $S_{ij} = 0$, 反之 $S_{ij} = 1$ 。

密集度 (C_i) 用来反映林木的疏密程度^[22]。

$$C_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_{ij} \quad (4)$$

式中: 当参照树 i 与相邻木 j 的树冠投影相重叠时, $y_{ij} = 1$, 反之 $y_{ij} = 0$;

Hegyi 竞争指数 (CI_i) 用来反映林木个体所承受的来自相邻木的竞争压力大小^[23]。

$$CI_i = \sum_{j=1}^n \frac{d_j}{d_i L_{ij}} \quad (5)$$

式中: d_j 为最邻近木 j 的胸径, d_i 为参照树 i 的胸径, L_{ij} 为参照树 i 与第 j 株相邻木之间的水平距离。

2.3 物种多样性计算

采用 α 多样性测度方法中的 Patrick 丰富度指数 (S)、Shannon-Wiener 多样性指数 (H)、Pielou 均匀度指数 (J) 来分析更新幼苗的物种多样性水平。其计算公式如下:

$$\text{Patrick 丰富度指数 } S = N \quad (6)$$

$$\text{Shannon - Wiener 多样性指数 } H = - \sum_{i=1}^S P_i^2 \ln P_i \quad (7)$$

$$\text{Pielou 均匀度指数 } J = \frac{H}{\ln S} \quad (8)$$

式中, N 为样地内乔木更新物种的总数, P_i 为第 i 种的个体数占所有种个体总数的比例。

2.4 数据分析方法

采用 SPSS20.0 和 Origin2019b 软件对数据进行统计分析。利用散点图结合拟合模型分析林分结构变量、更新幼苗密度之间的相互关系, 采用决定系数 (R^2) 来反映拟合优度检验。采用 Pearson 相关分析探讨林分空间结构与更新幼苗多样性之间的关系。

3 结果与分析

3.1 蒙古栎林更新幼苗数量特征

经统计分析 (表 2) 可知, 蒙古栎林林下更新幼苗密度为 $10\,759 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$, 总体更新状况良好, 但变异系数较大, 为 62.6%, 说明不同样地间更新差异较大, 更新幼苗分布不均匀, 更新密度最大的样地为 $23\,600 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$, 最小的样地仅为 $800 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$, 更新幼苗分布趋向斑块状。更新幼苗的基径为 $0.53 \sim 2.17 \text{ cm}$, 苗高为 $37.6 \sim 207.8 \text{ cm}$ 。

表 2 蒙古栎林更新幼苗的数量特征

Table 2 The quantitative characteristics of regeneration seedlings in *Q. mongolica* forest

项目 Items	平均值 Mean	最小值 Min	最大值 Max	标准误 SE	变异系数 CV/%
密度 Density/(stems·hm ⁻²)	10 759	800	23 600	1 122	62.6
基径 Basal diameter/cm	1.23	0.53	2.17	0.08	37.4
苗高 Seedlings height/cm	104.4	37.6	207.8	7.3	42.2

3.2 密度因素对更新的影响

由图 1 可知, 林分断面积对幼苗密度影响显著, 随着林分断面积的增加, 幼苗密度逐渐增加, 当断面积达到 $31 \text{ m}^2 \cdot \text{hm}^{-2}$, 幼苗密度增加趋势逐渐放缓; 同时, 林分断面积对幼苗的基径和苗高生长影响显著 (图 2), 随着林分断面积的增加, 幼苗基径和苗高呈降低趋势 ($R^2 = 0.36$, $P < 0.05$; $R^2 = 0.34$, $P < 0.05$)。

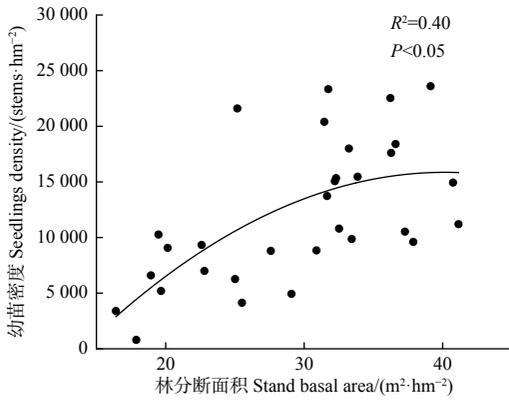


图1 林分断面积与幼苗密度的关系

Fig. 1 Relationships between stand basal area and seedling density

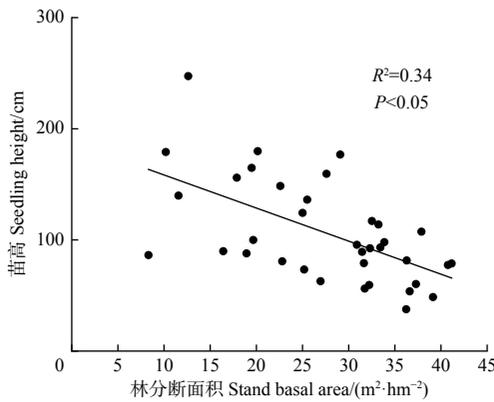
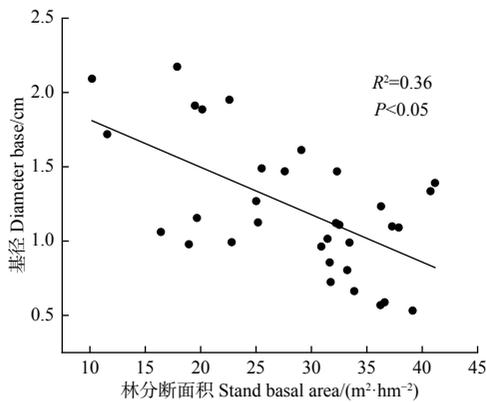


图2 林分断面积与幼苗生长的关系

Fig. 2 Relationships between stand basal area and seedling growth

3.3 林分空间结构对更新的影响

3.3.1 林分空间结构对幼苗密度和生长的影响 空间结构指数(混交度、角尺度、竞争指数、林层指数、密集度)与更新幼苗密度做拟合曲线见图3。结果显示: 竞争指数和密集度对更新幼苗密度影响显著, 随竞争指数和密集度的增加, 幼苗密度先增加后降低, 表现为典型的抛物线关系, 但竞争指数

与更新幼苗密度的拟合程度更高 ($R^2 = 0.4$), 表明与密集度相比, 林分竞争指数对更新幼苗密度的影响效应更显著。其他空间结构指数对更新幼苗密度的影响均未达到显著水平 ($P > 0.05$)。进一步分析空间结构指数对幼苗生长影响, 由图4可知, 竞争指数与幼苗的基径和苗高呈显著负相关 ($P < 0.05$), 随着竞争指数增加, 幼苗基径和苗高逐渐降低, 其他空间结构指标对更新幼苗生长影响不大 ($P > 0.05$)。

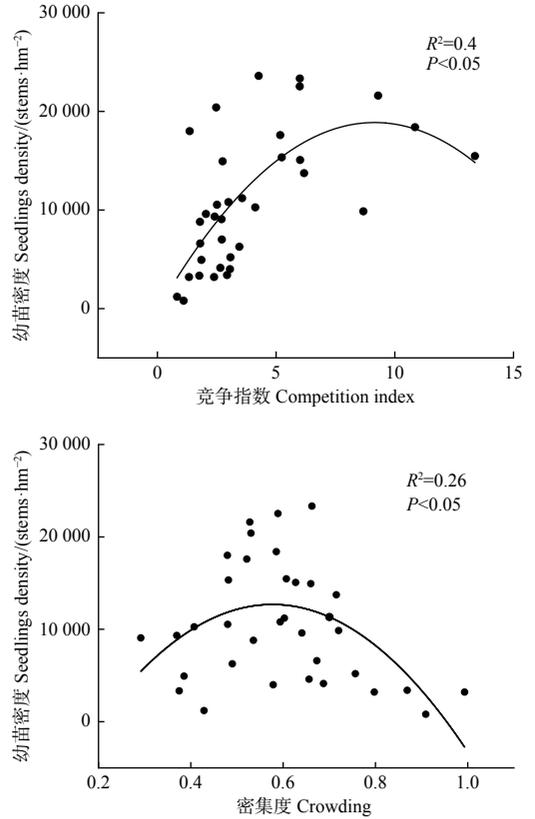


图3 林分空间结构参数(竞争指数和密集度)与幼苗密度的关系

Fig. 3 Relationships between indicators of stand spatial structure and seedling density

3.3.2 林分空间结构对幼苗物种多样性的影响 对林分空间结构指数(混交度、角尺度、竞争指数、林层指数、密集度)和林下更新幼苗物种多样性指数进行相关分析, 结果(表3)表明: 林分空间结构对更新幼苗物种多样性影响显著, 其中更新幼苗丰富度与林分混交度、竞争指数、林层指数呈极显著或显著正相关 ($P < 0.01$ 或 $P < 0.05$), 与密集度呈极显著负相关 ($P < 0.01$), 与角尺度相关性不大; Shannon-Wiener 多样性指数分别与林分混交度和林层指数呈极显著和显著正相关 ($P < 0.01$ 、 $P < 0.05$),

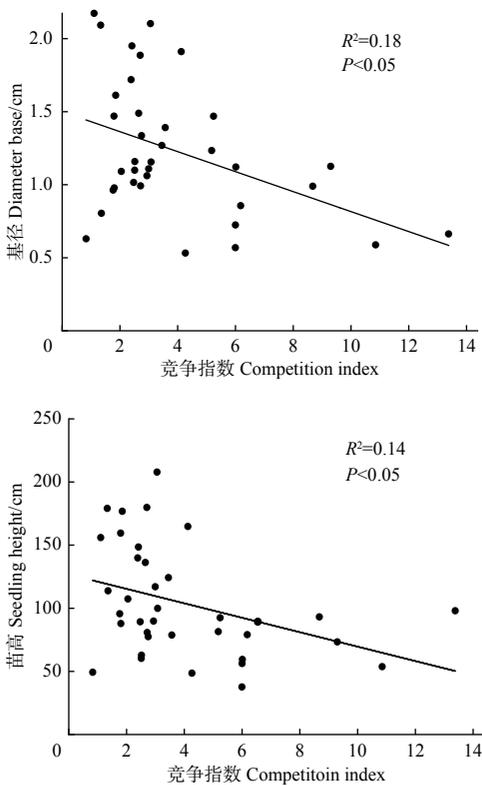


图4 竞争指数与幼苗生长的关系

Fig. 4 Relationships between competition index and seedling growth

与其他空间结构指数相关性不大。Pielou 均匀度指数与竞争指数呈极显著负相关 ($P < 0.01$), 与其他空间结构指数相关性不大。说明林分种间隔离程度越大, 林分垂直结构越复杂, 林下更新幼苗的种类和多样性越高。

3.4 密度因素和林分空间结构对幼苗更新的影响

以更新幼苗密度为因变量 (y), 密度因素和空间结构指标为自变量 (x) 进行多元逐步回归分析 (表4), 结果显示, 林分断面积、密集度和竞争指数是影响更新幼苗密度的主要因子, 3个变量

能够解释更新幼苗密度变异的41%。

4 讨论

4.1 密度因素对更新幼苗的影响

林分密度变化形成了群落中不同的光、热、水等小环境^[24], 林下乔木幼苗的更新对林分密度反映剧烈。本研究表明, 当林分基面积从 $16.41 \text{ m}^2 \cdot \text{hm}^{-2}$ 增加到 $31 \text{ m}^2 \cdot \text{hm}^{-2}$, 幼苗密度逐渐增加, 当林分基面积从 $31 \text{ m}^2 \cdot \text{hm}^{-2}$ 增加到 $41.75 \text{ m}^2 \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, 幼苗密度增加趋势逐渐放缓。黄朗等^[25]对柞栎甜槠混交林幼苗更新和张志东等^[14]对黑松种群更新的研究中也得出相似的结论。林下乔木幼苗具有一定的耐阴性, 林分基面积较低时, 过强光照抑制幼苗的发育。另一方面, 幼苗的发育, 需要一定量的水分支撑, 密度较小的林分, 蒸腾量较大, 林地水分比较缺乏, 不利于幼苗的构建, 幼苗数量较少^[26]。随着林分基面积的增加, 林地微环境逐渐改善, 母树结实能力增强, 更新幼苗密度逐渐增加, 但当林分基面积增加到一定程度, 受林地资源配置的影响, 幼苗密度随基面积的增加速度逐渐放缓。虽然幼苗密度随基面积的增加呈增加趋势, 但幼苗基径和树高随基面积的增加均表现为降低趋势, 这与 Kabrick 等^[27]对短叶松更新影响因素的研究中得出的结论相同, 可能是由于在林分密度较小时, 林下光照和养分含量充足, 有利于幼苗的生长, 随着林分密度的增加, 幼苗之间竞争加剧, 分配到幼苗个体的可利用资源逐渐减少, 从而影响幼苗的生长。

4.2 林分空间结构对更新幼苗的影响

林木在林地上的水平或垂直分布及其属性在空间上的排列方式, 可促进异质性微生境的形成、调节林内小气候, 影响林木生长和稳定, 在很大程度上决定着更新幼苗的分布和存活^[12]。本研究结果表

表3 林分空间结构-林下更新树种多样性的 Pearson 相关分析

Table 3 Pearson correlation analysis of stand spatial structure and tree species diversity of undergrowth regeneration

空间结构指标 Forest spatial index	丰富度 S	P	Shannon-Wiener指数 Shannon-Wiener diversity index	P	Pielou均匀度指数 Pielou	P
混交度 Mingling index	0.485 **	0.002	0.552 **	0.001	-0.103	0.542
角尺度 Uniform angle index	0.057	0.739	0.197	0.258	0.004	0.982
竞争指数 Competition index	0.411 *	0.012	0.059	0.737	-0.428 **	0.008
林层指数 Canopy layer index	0.465 **	0.004	0.350 *	0.040	-0.282	0.090
密集度 Crowding	-0.462 **	0.004	-0.251	0.145	0.135	0.426

* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$.

表4 更新幼苗密度与林分结构的多元逐步回归模型

Table 4 The optimal multiple regression models with stepwise of seedling density and forest structure

项目 Item	回归系数 Regression coefficient	标准化系数 Standardization coefficient	t值 t value	P
常数 Constant	7 105.365		1.206	0.236
林分断面积 Stand basal area	293.020	0.345	2.309	0.027
密集度 Crowding	-11 810.751	-0.273	-1.921	0.063
竞争指数 Competition index	885.678	0.308	2.189	0.036
$R^2 = 0.41, P = 0.000 4$				

明, 随着林分竞争指数和密集度的增加, 更新幼苗密度呈先增加后降低的趋势, 在林分竞争指数为4~6, 密集度为中等条件下, 更新幼苗密度最大, 随后更新幼苗密度逐渐减少。这可能是因为当竞争指数和密集度增加到一定程度时, 林木之间的竞争加剧, 分配到林下的光照和养分不足, 从而不利于更新幼苗的建成和存活, 同时也说明过高或过低的竞争指数和密集度均不利于幼苗密度的增加。林分空间结构不仅影响更新幼苗密度, 而且对更新幼苗多样性也具有一定的影响。研究结果显示, 林分混交度与更新幼苗的丰富度、多样性指数呈显著正相关, 随着林分混交度的增加, 更新幼苗的丰富度、多样性指数也相应的增大。一方面是由于混交度高的林分, 乔木树种丰富, 能够为更新幼苗提供丰富的母树, 另一方面混交度高低影响着乔木层各个树种的竞争程度, 不同树种的生态位在一定程度上会互相抑制^[28], 为林下幼苗的更新释放了营养空间。林分的垂直结构对更新幼苗的多样性也具有一定的影响, 研究表明, 林层指数与更新幼苗的丰富度和多样性指数均呈显著的正相关关系, 一方面是由于复杂的垂直结构促进异质性微生境的形成^[29], 从而增加幼苗定居的生态位, 为更多幼苗的萌发和生长提供机会和空间, 使森林容纳更多物种^[30]。另一方面, 树冠层深厚, 容易形成较多的枯枝落叶, 能够改善土壤的理化性质, 提高土壤的养分含量, 有利于林下更新幼苗的生长^[31]。

5 结论

辽东山区蒙古栎林乔木更新由密度因素和林分空间结构共同影响, 随着林分断面积的增加, 幼苗密度逐渐增加, 当断面积达到 $31 \text{ m}^2 \cdot \text{hm}^{-2}$, 幼苗密度增加趋势逐渐放缓; 林分空间结构对更新幼苗的

影响主要表现为随竞争指数和密集度的增加, 幼苗密度呈先增加后降低趋势, 林分种间隔离程度越大, 林分垂直结构越复杂, 林下更新幼苗的种类和多样性越高。因此, 欲人工促进蒙古栎林天然更新, 改善林下物种多样性, 可通过调控林分断面积、竞争指数和密集度等经营方式来实现。

参考文献:

- [1] 徐振邦, 代力民, 陈吉泉, 等. 长白山红松阔叶混交林森林天然更新条件的研究[J]. 生态学报, 2001, 21(9): 1413-1420.
- [2] 程瑞梅, 沈雅飞, 封晓辉, 等. 森林自然更新研究进展[J]. 浙江农林大学学报, 2018, 35(5): 955-967.
- [3] 陈贝贝, 匡文浓, 姜俊, 等. 长白山次生杨桦林优势更新幼苗空间分布及环境解释[J]. 生态学报, 2021, 41(11): 1-7.
- [4] 刘帅, 肖翠, 王均伟, 等. 长白山阔叶红松林乔木幼苗年际动态及影响因素[J]. 北京林业大学学报, 2016, 38(11): 57-66.
- [5] 朱教君, 刘足根, 王贺新. 辽东山区长白落叶松人工林天然更新障碍分析[J]. 应用生态学报, 2008, 19(4): 695-703.
- [6] 任学敏, 朱雅, 陈兆进, 等. 太白山锐齿槲栎林乔木更新特征及其影响因子[J]. 林业科学, 2019, 55(1): 11-21.
- [7] 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.
- [8] 刘明国, 殷有, 孔繁斌, 等. 带状采伐栽植阔叶树对油松人工林天然更新的影响[J]. 东北林业大学学报, 2014, 42(7): 1-4.
- [9] 张怡吟, 朱清科, 任正龔, 等. 地形对陕北黄土区衰退沙棘人工林天然更新的影响[J]. 林业科学研究, 2017, 30(2): 300-306.
- [10] 赵总, 贾宏炎, 蔡道雄, 等. 红椎天然更新及其影响因子研究[J]. 北京林业大学学报, 2018, 40(11): 76-83.
- [11] 李雪云, 潘萍, 臧颢, 等. 闽楠天然次生林自然更新的影响因子研究[J]. 林业科学研究, 2017, 30(5): 701-708.
- [12] 欧芷阳, 苏志尧, 彭玉华, 等. 桂西南喀斯特山地蚬木幼龄植株的天然更新[J]. 应用生态学报, 2013, 24(9): 2440-2446.
- [13] 周建云, 李荣, 何景峰, 等. 近自然经营对辽东栎林优势乔木更新的影响[J]. 林业科学, 2013, 49(8): 15-20.
- [14] 张志东, 毛培利, 刘玉虹, 等. 林分结构对烟台黑松海岸防护林天然更新的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(8): 2205-2211.
- [15] 周晓果, 温远光, 朱宏光, 等. 大明山常绿阔叶林冠层垂直结构与林下植物更新[J]. 应用生态学报, 2017, 28(2): 367-374.
- [16] 刘帅, 廖嘉星, 肖翠, 等. 长白山次生针阔混交林乔木幼苗存活的影响因素分析[J]. 植物生态学报, 2016, 40(7): 711-722.
- [17] Capellesso E S, Scrovonski K L, Zanin E M, et al. Effects of forest structure on litter production, soil chemical composition and litter-soil interactions[J]. Acta Botanica Brasiliica, 2016, 30(3): 329-335.
- [18] 张会儒, 唐守正, 雷相东. 东北天然林可持续经营技术研究[M]. 北京: 中国林业出版社, 2011.
- [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.

- [20] 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): 3-5.
- [21] 吕 勇, 臧 颢, 万献军, 等. 基于林层指数的青桐混交林林层结构研究[J]. 林业资源管理, 2012, 23 (3): 81-84.
- [22] 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.
- [23] 汤孟平, 陈永刚, 施拥军, 等. 基于Voronoi图的群落优势树种种内种间竞争[J]. 生态学报, 2007, 27 (11): 4707-4716.
- [24] 高成杰, 唐国勇, 刘方炎, 等. 林分结构调整对云南松次生林生长和土壤性质的影响[J]. 林业科学研究, 2017, 30 (5): 841-847.
- [25] 黄 朗, 朱光玉, 康 立, 等. 湖南栎类天然次生林幼树更新特征及影响因子[J]. 生态学报, 2019, 39 (13): 4900-4909.
- [26] 康 冰, 王得祥, 李 刚, 等. 秦岭山地锐齿栎次生林幼苗更新特征[J]. 生态学报, 2012, 32 (9): 2738-2747.
- [27] Kabrick J M, Knapp B O, Dey D C, *et al.* Effect of initial seedling size, understory competition and overstory density on the survival and growth of *Pinus echinata* seedlings under planted in hardwood forests for restoration[J]. *New Forests*, 2015, 46: 897-918.
- [28] 朱光玉, 徐奇刚, 吕 勇. 湖南栎类天然次生林林分空间结构对灌木物种多样性的影响[J]. 生态学报, 2018, 38 (15): 5404-5412.
- [29] 黄 萍, 刘艳红. 北京松山油松林分结构和地形对幼苗更新的影响[J]. 生态学杂志, 2018, 37 (4): 1003-1009.
- [30] 符婵娟, 刘艳红, 赵本元. 神农架巴山冷杉群落更新特点及影响因素[J]. 生态学报, 2009, 29 (8): 4179-4186.
- [31] 曹小玉, 李际平, 周永奇, 等. 杉木林林层指数及其与林下灌木物种多样性的关系[J]. 生态学杂志, 2015, 34 (3): 589-595.

Effects of Stand Structure on Natural Regeneration of *Quercus mongolica* Forest in Mountainous Area of Eastern Liaoning Province

DONG Li-li, LIU Hong-min, ZHAO Ji-chuan, GAO Ying-xu, WANG Cheng-cheng, FAN Jun-gang

(Liaoning Academy of Forestry Science, Shenyang 110032, Liaoning, China)

Abstract: [Objective] The relationship between stand structure and undergrowth regeneration seedling was discussed to provide theoretical basis for artificial promotion of natural regeneration. [Method] Several *Q. mongolica* forests in mountainous area of eastern Liaoning province were taken as the research objects, the fitting model and Pearson correlation analysis were used, and the effect of stand spatial structure on natural regeneration of *Q. mongolica* was studied. [Result] (1) The forest stand base area had a significant effect on seedling density. With the increase of stand base area, the seedling density showed an increasing trend. When the base area reached $31 \text{ m}^2 \cdot \text{hm}^{-2}$, the increase of seedling density gradually slowed down. (2) There was a significant negative correlation between stand base area and seedling base diameter and seedling height ($P < 0.05$). (3) The relationship between stand competition index and density and seedling density was typical parabola. Compared with density, the effect of competition index on seedling density was more significant. (4) The spatial structure of stand had a significant effect on the species diversity of regenerated seedlings, the higher the degree of mixing, the more complex the vertical structure, and the higher the diversity of regeneration seedling species and Shannon-wiener. (5) Multivariate stepwise regression analysis showed that the main variables influencing the total regeneration density were stand basal area, crowding and competition index. [Conclusion] Adjusting stand basal area, crowding and competition index are the effective ways to promote the natural regeneration and improve the species diversity of *Q. mongolica* forest.

Keywords: stand spatial structure; stand density; seedling regeneration; *Quercus mongolica*

(责任编辑: 彭南轩)