

DOI:10.12403/j.1001-1498.20230140

# 不同密度下小陇山蒙古栎次生混交林 树冠结构与密集度的关系

蒋孟多<sup>1,4</sup>, 马映栋<sup>2\*</sup>, 蒋睿<sup>3</sup>, 李平英<sup>1</sup>, 包永平<sup>4</sup>

(1. 甘肃省次生林培育重点实验室, 甘肃 天水 741020; 2. 新疆大学生态与环境学院, 新疆 乌鲁木齐 830000; 3. 西北师范大学地理与环境科学学院, 甘肃 兰州 730000; 4. 甘肃省小陇山林业保护中心滩歌林场, 甘肃 天水 741314)

**摘要:** [目的] 林木树冠结构与密集度具有一定关联性。密度效应一直是森林经营关注的问题, 本研究通过探究蒙古栎次生林林分密度与树冠结构、密集度的关系, 以期深入掌握蒙古栎次生林结构特征, 为蒙古栎林可持续经营提供充分的科学依据。[方法] 于2020年8月在小陇山蒙古栎次生混交林中选择立地条件均一、不同密度的典型样地进行调查, 采用最小显著性差异法、Pearson 相关系数和最优结构方程模型, 分析不同密度下树冠结构与密集度的关系。[结果] 不同密度蒙古栎林中树冠体积的变异最强, 其次为冠长与树冠面积, 冠幅、冠长率和冠形率的变异最弱, 树冠结构特征的变化趋势随林分密度的改变呈单峰型分布。随着林分密度递减, 冠幅、树冠面积、树冠体积分别与胸径的相关性趋势近似于“L”型, 而冠长和胸径的相关性趋势与林分密度的变化保持了一致, 林分密度对冠长率、冠形率与胸径相关性的影响不大。蒙古栎林密集度处于中等密集至很密集状态, 但不同密度林分内林木树冠的挤压与重叠程度有差异, 其中优势树种蒙古栎、白桦、华山松和椴树起了决定性作用。蒙古栎林中林分密度对树冠结构与密集度关系的影响包含两种路径: 林木竞争—树冠结构共同介导的间接影响; 林木竞争—胸径—树冠结构共同介导的间接影响。[结论] 不同密度蒙古栎林树冠结构有差异, 树冠结构特征与林木胸径有关, 林分密度影响了蒙古栎林树冠结构与密集度的关系。要实现蒙古栎林的可持续经营, 不仅要考虑林木胸径大小, 更要关注林木树冠结构特征, 通过调整林分密度可优化树冠结构, 改善林冠层挤压状况, 以促进森林更新与增加物种多样性。

**关键词:** 树冠结构; 密集度; 林分密度; 小陇山

**中图分类号:** S718.54

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-1498(2024)01-0110-09

树冠结构属于森林结构的范畴, 不仅决定林木形态、未来长势与活力<sup>[1]</sup>, 其变化还能降低林木复杂的竞争<sup>[2]</sup>。研究树冠结构能帮助理解林木利用生态空间的能力, 揭示其生长对策和适应机制<sup>[3]</sup>。密集度是林分空间结构的重要属性, 与林分密度有区别, 通过判断林分空间结构单元中树冠连接来分析林木疏密程度, 反映了树冠的密集程度与林冠层的连续遮盖程度和挤压状况<sup>[4]</sup>。密集度与树冠结构有关系。通常, 密集度取值越大, 林地微环境林木密

集程度越高, 树冠遮盖越连续, 即林木竞争就越激烈; 取值越小则说明林木密集程度越低, 即竞争压力减小, 说明此时林木生长稀疏, 出现林隙的可能性增加。森林经营中, 冠幅常用于表征树冠特征, 要探究林木密集程度与树冠结构的关系, 单一的树冠特征难以起到普遍性作用且意义不大。就整个林冠层挤压与林木竞争而言, 林木密集程度很可能受到除冠幅外的其它树冠结构特征, 如树冠面积、冠长和树冠体积等的影响。

收稿日期: 2023-04-06 修回日期: 2023-06-05

基金项目: 中央财政林业科技推广项目“小陇山次生林修复”(2021-ZYTG-004); 2019年甘肃省次生林培育重点实验室开放研究基金资助项目(2019-GCZS-003)。

\* 通讯作者: 马映栋, 工程师, 主要从事森林生态研究, 737765993@qq.com

针对树冠结构与林木密集程度关系的专门研究迄今极为少见, 多数研究集中于树冠结构与林木竞争关系层面。早期研究表明, 林分密度能够预测林冠层竞争<sup>[5]</sup>, 无论树种组成与林木年龄, 树冠发育与胸径增长对整个林分的竞争都非常敏感<sup>[6]</sup>。尽管树冠结构与林木大小密切相关, 但就混交林而言, 冠幅因受林木径阶差异的影响, 因此很难量化林分种间、种内竞争<sup>[7]</sup>, 这就说明树冠结构与林木竞争关系可能与林木大小差异有关。树冠结构的变化与林分密度有关。在分布较稠密的森林中, 外力干扰(如大风侵袭)导致冠层出现林隙, 树冠结构变的更加复杂<sup>[8]</sup>。因为风的频繁干扰, 树冠脆弱部位容易折断, 单木树冠完整性及林冠层均遭到不同程度的破坏, 冠幅、冠长和冠幅面积等因此改变。一旦完整的树冠被破坏, 树冠结构内部、树与树的挤压状态随之也被调整, 林木密集程度可能相应发生变化, 且这种变化很可能因林分密度的差异有所不同。对于未经干扰或干扰较轻的林分而言, 树冠结构变化可能由林木自疏所致。Gause 假说认为, 对同一资源产生竞争的 2 个种无法长期共存, 结果会导致 1 个种占优势, 另 1 个种则被淘汰<sup>[9]</sup>。随着树的发育, 个体对营养资源与生长空间的需求增加, 导致林木竞争更加激烈<sup>[10]</sup>, 当光热资源不足以支持所有林木生长时, 一些林木生长将减缓, 而一些林木将最终死亡<sup>[11]</sup>。表明无论林木个体还是整个林分, 树冠结构与密集度的关系都避免不了林木竞争的作用, 它们的关系很可能与林分密度有关。为此, 本研究将探究林分密度如何影响树冠结构与密集度的关系。

蒙古栎 (*Quercus mongolica* Fisch. ex Ledeb.) 林在小陇山林区北部属主要的次生混交林群落和典型的地带性顶级植被, 对维持当地生态平衡、提高环境质量和保护生物多样性具有重要的生态价值。近年来, 国内学者从优化森林结构的角度对小陇山蒙古栎林展开了大量研究, 比如森林经营措施与林分空间结构<sup>[12-14]</sup>、群落结构与稳定性<sup>[15]</sup>等, 而有关蒙古栎林树冠结构的研究相对缺乏。近期研究表明, 小陇山蒙古栎林的密集度处于中等至密集状态, 除与林木冠幅大小有关外, 可能与林分密度也有关<sup>[15]</sup>, 尚需进一步论证。基于以上背景, 本研究依托小陇山林区北部 4 个 30 m × 30 m 的蒙古栎次生混交林样地, 分析不同密度林分树冠结构特征的差异, 探究不同密度林分的林木胸径与树

冠结构的关系, 从而厘清林分密度与树冠结构及密集度的关系, 以期深入掌握蒙古栎次生混交林结构特征, 为蒙古栎林可持续经营和资源可持续利用提供更加充分的科学依据, 也为发挥山地森林的多种生态效能提供理论基础。

## 1 研究地概况与研究方法

### 1.1 研究地概况

样地位于甘肃省小陇山林业保护中心滩歌林场境内 (104°40'~104°58' E, 34°27'~34°39' N)。气候属温带大陆性气候, 受季风影响较显著, 具有冬冷无严寒、夏热无酷暑的特点。根据武山县气象站资料记载, 本地年均温 9.6 °C, 年降水量 490 mm 以上, 相对湿度 65%, 降水集中于 7—9 月, 约占全年降水量的 70%, 无霜期 140~218 d。研究样地海拔在 1 800~2 800 m, 坡度为 25°~40°, 山地垂直带谱明显, 土壤主要为棕色土, 多石砾。研究区森林覆盖率达 47.9%, 除次生树种蒙古栎、复叶槭 (*Acer negundo* L.)、椴树 (*Tilia tuan* Szyszyl.)、华山松 (*Pinus armandii* Franch.)、山杨 (*Populus davidiana* Dode) 和白桦 (*Betula platyphylla* Suk.) 外, 人工栽培树种包括青海云杉 (*Picea crassifolia* Kom.)、华北落叶松 (*Larix principis-rupprechtii* Mayr)、油松 (*Pinus tabulaeformis* Carrière) 等。

### 1.2 研究方法

1.2.1 数据采集 野外调查于 2020 年 8 月进行, 选取立地条件典型且均一性较强、人为干扰较少的林分。检尺并记录胸径 (DBH) >5 cm 的活立木, 用北斗手持导航仪 GPS (型号: G130BD) 确定每株树的坐标。用皮尺、围尺、测高仪 (型号: BERTHA DENTON-G 系列) 测定林木胸径、树高、活枝下高、冠幅 (东西与南北方向) 等林分因子, 编号及记录每株树的健康状态 (是否病害、倒伏、弯曲与直立)。按照 5 点取样法”在每个样地内取 2 m × 2 m 的小样方 5 个, 调查幼树更新、灌木种类、盖度、高度、株数、基径等 (表 1)。

1.2.2 树冠结构的表达 采用冠幅 (CD)、冠长 (CL)、冠长率 (CR)、冠形率 (CS)、树冠面积 (CPA) 和树冠体积 (CVOL) 等 6 种指标表征树冠结构, 其中, 冠幅为树冠在东西与南北方向冠宽的均值; 冠长为树高与活枝下高之差; 冠长率为冠长与树高之比; 冠形率为冠长与冠幅之比; 树

表 1 样地概况

Table 1 Details of sample plot in different densities

样地 Sample plot	林分类型 Forest type	林分密度/(株·hm <sup>-2</sup> ) Stand density	平均胸径/cm Mean DBH	平均树高/m Mean height	蓄积量/m <sup>3</sup> Stand volume	胸高断面面积/m <sup>2</sup> Basal area
I	蒙古栎-白桦混交林	1 675	10.3	7.2	51.67	0.092
II	蒙古栎-白桦混交林	1 413	10.9	7.4	45.78	0.103
III	蒙古栎-白桦混交林	1 300	10.9	7.7	42.56	0.103
IV	蒙古栎-白桦混交林	1 125	9.0	7.0	26.11	0.071

冠面积与树冠体积分别由冠幅和树冠投影计算得到。

1.2.3 密集度与竞争强度的判定 利用重要值法<sup>[16]</sup>确定蒙古栎林的优势树种。依据惠刚盈

等<sup>[4,14]</sup>对密集度(C)的表述与取值,从林木个体与林分2种尺度进行密集度分析,同时采用 Hegyi 指数<sup>[13]</sup>判别蒙古栎林个体与林分的竞争强度(表2)。

表 2 密集度与竞争强度

Table 2 Formula of crowding and competition

指标 Indicator	尺度 Scale	表达式 Formula	意义 Explanation
密集度 Crowding	林木个体	$C_i = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 y_{ij}$	式中,参照树 <i>i</i> 与相邻木 <i>j</i> 的树冠投影重叠时, $y_{ij}=1$ ;否则, $y_{ij}=0$ ;并包含5种取值与状态:0表示很稀疏;0.25表示稀疏;0.5表示中等密集;0.75表示较密集;1表示很密集,数值越大,说明树冠连接越密,树冠相互重叠挤压的程度也越高。
	林分	$\bar{C} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_i$	式中, $C_i$ 表示林木个体的密集程度, $n$ 为全林分株数。
竞争强度 Competition	林木个体	$Cl_i = \sum_{j=1}^m \frac{d_j}{d_i \cdot L_{ij}}$	式中, $Cl_i$ 为林木 <i>i</i> 的竞争强度, $L_{ij}$ 为林木 <i>i</i> 到相邻木 <i>j</i> 的距离, $d_i$ 为对象木 <i>i</i> 的胸径, $d_j$ 为相邻木 <i>j</i> 的胸径, $n$ 为竞争木株数。
	林分	$Cl = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Cl_i$	表示林分竞争强度, $Cl_i$ 为林木个体 <i>i</i> 的竞争强度, $N$ 为林分内林木总株数。

1.2.4 数据分析 利用 Office 软件进行数据预处理,分别利用森林结构分析专业软件 Winklemass 与 R studio 计算密集度与竞争指数。采用最小显著性差异法(LSD)对树冠结构特征进行多重比较,采用 Pearson 相关系数评价树冠结构特征与林木胸径大小的相关性。采用结构方程模型(SEM)分析林分密度、树冠结构和密集度的关系,显著性水平均采用  $P=0.05$ ,其中,依据拟合指数,包括不显著( $p>0.05$ )卡方检验( $\chi^2$ ),  $SRMR<0.08$ ,  $GFI>0.95$ ,  $CHI>0.95$ ,以及最小的 AIC 值选取最优的结构方程模型<sup>[17]</sup>。数据分析主要在 R studio 中完成,利用 Origin9.4 绘图。为避免边缘效应造成的误差,在样地周围设 1.5 m 的缓冲区域。

## 2 结果分析

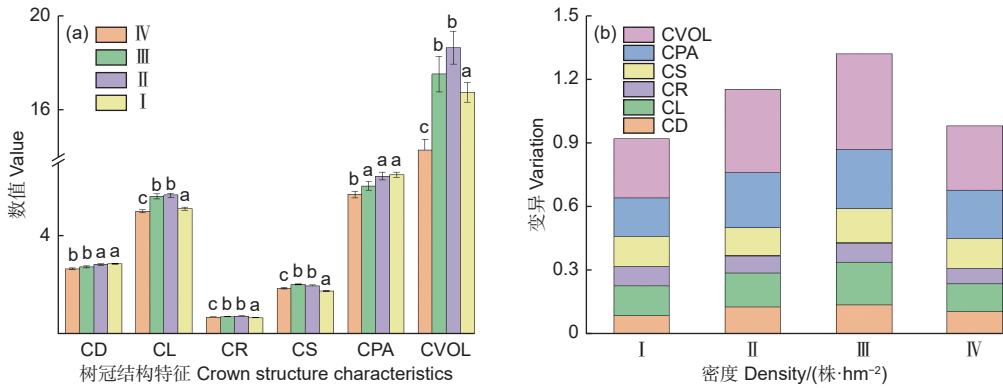
### 2.1 树冠结构的差异

蒙古栎林中,冠幅与树冠面积随着林分密度的递增而递增,冠长与树冠体积的变化趋势相似,并

随林分密度的变化呈单峰型,虽然冠长率与冠形率也呈单峰型,但其变化趋势相对平缓,说明不同密度林分的树冠结构特征存在差异(图1a)。分析样地间、样地内树冠结构的变异(图1b),结果表明树冠体积的变异最强,变异程度介于 28%~45%;其次为树冠面积与冠长,分别为 18%~28%与 13%~20%;而冠幅、冠长和冠长率的变异相对较弱,分别介于 9%~14%、7%~9%和 13%~16%。总体上,蒙古栎林树冠结构的变异未与林分密度保持一致性,而是随着林分密度增大呈现出“先增后减”的单峰型特点。

### 2.2 胸径与树冠结构的关系

如图2所示,样地 I 中林木胸径与树冠结构特征的相关性均显著,胸径与树冠体积的相关性最强( $r=0.823$ ,  $P<0.01$ ),而与冠形率( $r=0.188$ ,  $P<0.05$ )和冠长率( $r=0.216$ ,  $P<0.05$ )的相关性较弱。样地 II 中树冠面积( $r=0.68$ ,  $P<0.01$ )、冠幅( $r=0.67$ ,  $P<0.01$ )分别与胸径的相关性最强,其次为树冠体积( $r=0.65$ ,  $P<0.01$ )。与样地 II 相



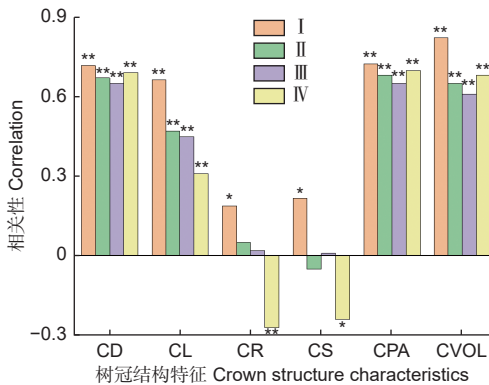
注: 误差线上方的小写字母 (a/b/c) 表示显著性。

Note: The letters on the error bars indicates a significance among crown structural characteristics.

图 1 树冠结构的差异

Fig. 1 Difference of crown structural characteristic in different stands

似, 样地 III 中冠幅、树冠面积分别与胸径的相关性最强 ( $P < 0.01$ ), 其次为树冠体积 ( $P < 0.01$ ), 但 2 个样地的冠形率、冠长率与胸径无显著相关性。样地 IV 中树冠面积、冠幅、树冠体积分别与胸径的相关性最强 ( $P < 0.01$ ), 而冠形率、冠长率与胸径的相关性较弱 ( $P < 0.05$ )。总体上, 随林分密度的递减, 冠幅、树冠面积、树冠体积分别与胸径的相关性趋势近似于“L”型, 而冠长—胸径的相关性随林分密度的递减逐渐减弱, 林分密度的改变对冠长率—胸径、冠形率—胸径相关性的影响不大。



\*: 表示 0.05 水平的显著性, \*\*: 表示 0.01 水平的显著性。

\*: The significant relationship at the 0.05 level, \*\*: The significant relationship at the 0.01 level.

图 2 树冠特征与胸径的相关性

Fig. 2 Correlation between crown structural characteristics and DBH

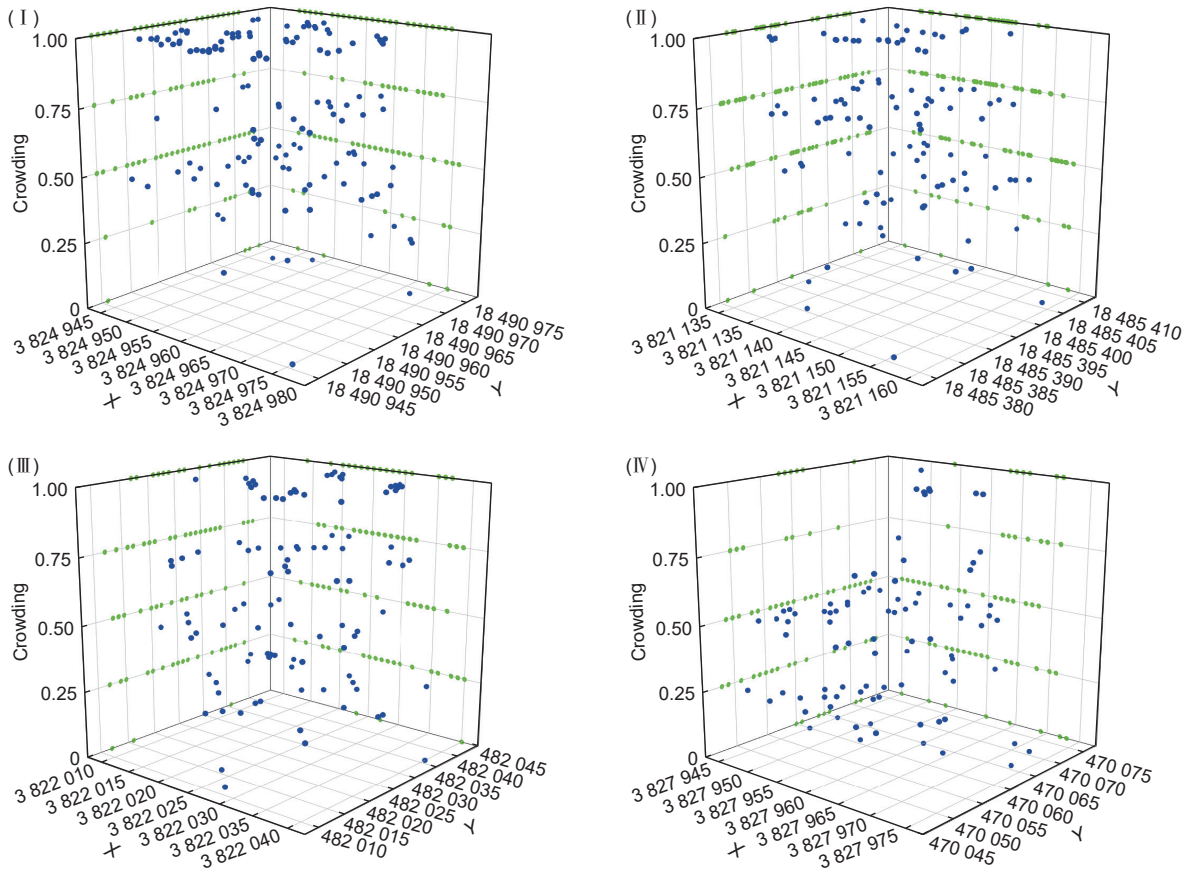
### 2.3 个体与林分的密集程度

蒙古栎林中, 4.5% 的林木处于很稀疏状态, 15.9% 为稀疏, 28.8% 为中等密集, 20.9% 为较

密集, 29.7% 为很密集, 林分密集程度处于中等密集至很密集状态。具体而言 (图 3), 样地 I 与样地 III 中最大相对频率分别为 45.2%、27.8% 的林木属于很密集, 而样地 II 和 IV 中最大相对频率分别为 32.7%、40.6% 的林木属于较密集与中等密集。分析优势树种的密集程度可知 (表 3), 其最大值为 0.909, 最小值为 0.292, 包括稀疏、中等密集、较密集和很密集 4 种状态, 但多数优势树种处于中等密集、较密集、很密集状态。就各样地优势树种的密集程度而言, 样地 I 中蒙古栎、华山松和椴树的值最大, 且至少 54.1% 的林木达到很密集, 尽管处于很密集的白桦较少, 但其中也有 46.2% 达到中等密集。样地 II 中 34.1% 的蒙古栎达到较密集, 40% 的白桦很密集, 而华山松与椴树分别均匀分布于中等密集至很密集状态。样地 III 中 35% 的白桦与 57.1% 的椴树达到了很密集, 而此时多数蒙古栎和华山松处于稀疏与较密集状态。样地 IV 的优势树处于很稀疏至中等密集状态, 其中蒙古栎 31.2%、华山松 50%、白桦 41.7% 以及椴树 50% 分别为稀疏、很稀疏、稀疏和中等密集, 说明优势树种对蒙古栎林密集程度起重要作用。

### 2.4 树冠结构与密集度的关系

最优结构方程模型表明 (图 4, 表 4), 林分密度对树冠结构与密集度关系的影响包含两种路径: 一方面, 林分密度通过林木竞争间接影响了树冠结构 ( $p < 0.05$ ), 通过树冠结构的介导作用从而间接影响密集度 ( $p < 0.05$ ); 另一方面, 林分密度通过林木竞争先间接影响林木胸径 ( $p < 0.001$ ),



注：蓝色表示不同密集状态的林木，绿色表示落在 XZ 与 YZ 轴的投影。

Note: The blue dots indicates trees of different crowding levels, and the green dots presents a projection of the black dots on XZ and YZ axes, respectively.

图 3 林木个体的密集程度

Fig. 3 Crowding of individual trees in different stand densities

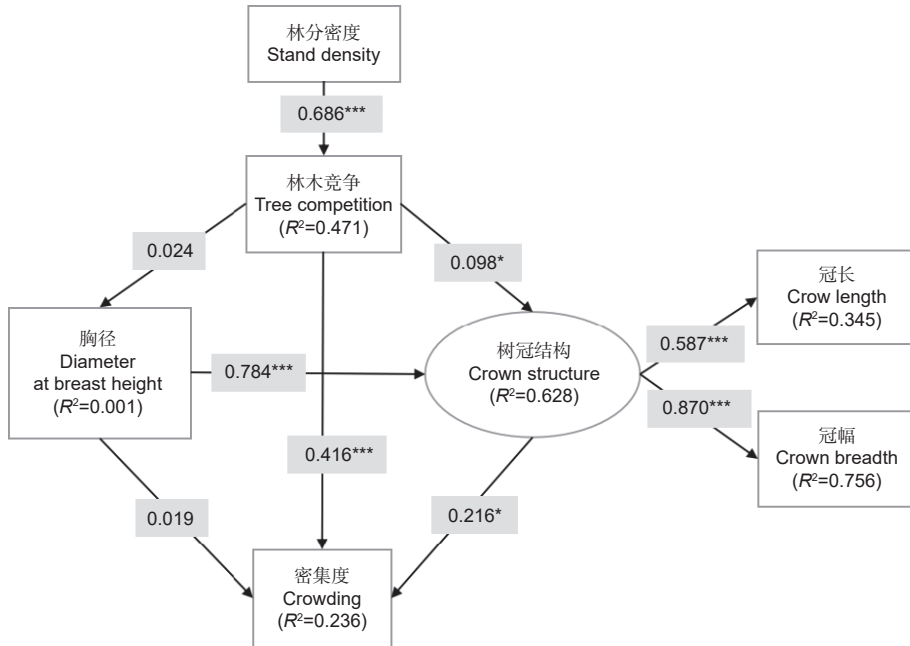
表 3 优势树种的密集程度

Table 3 Crowding of dominant tree species in different densities

样地 Sample plot	优势树 Dominant trees	相对频率 Relative frequency					密集度值 Value
		很稀疏 Thinly scattered	稀疏 Scattered	中等密集 Medium	较密集 Intensive	很密集 Extremely intensive	
I	蒙古栎 <i>Quercus mongolica</i>	0.000	0.059	0.235	0.059	0.647	0.824
	华山松 <i>Pinus armandii</i>	0.000	0.000	0.090	0.183	0.727	0.909
	白桦 <i>Betula platyphylla</i>	0.000	0.307	0.462	0.076	0.155	0.520
	椴树 <i>Tilia tuan</i>	0.000	0.043	0.333	0.083	0.541	0.781
II	蒙古栎 <i>Quercus mongolica</i>	0.073	0.173	0.292	0.341	0.121	0.566
	华山松 <i>Pinus armandii</i>	0.000	0.250	0.250	0.250	0.250	0.625
	白桦 <i>Betula platyphylla</i>	0.000	0.000	0.266	0.333	0.400	0.783
	椴树 <i>Tilia tuan</i>	0.000	0.000	0.333	0.333	0.333	0.749
III	蒙古栎 <i>Quercus mongolica</i>	0.055	0.368	0.236	0.263	0.078	0.538
	华山松 <i>Pinus armandii</i>	0.000	0.250	0.125	0.500	0.125	0.500
	白桦 <i>Betula platyphylla</i>	0.000	0.200	0.250	0.200	0.350	0.675
	椴树 <i>Tilia tuan</i>	0.000	0.000	0.142	0.285	0.571	0.713
IV	蒙古栎 <i>Quercus mongolica</i>	0.000	0.312	0.251	0.187	0.250	0.594
	华山松 <i>Pinus armandii</i>	0.500	0.000	0.333	0.167	0.000	0.292
	白桦 <i>Betula platyphylla</i>	0.083	0.417	0.333	0.084	0.083	0.417
	椴树 <i>Tilia tuan</i>	0.167	0.167	0.500	0.083	0.083	0.437

再通过林木胸径的介导作用影响树冠结构, 进而对密集度产生影响 ( $p < 0.05$ ); 其中, 就树冠结构特征而言, 冠幅与冠长的显著作用不可忽视 ( $p < 0.001$ )。尽管如此, 但林分密度直接通过林木竞争也可间接影响密集度 ( $p < 0.001$ )。另外, 林分密度通过影响林木竞争与胸径大小进而对密集度产生间接影响, 但此影响并不显著 ( $p > 0.05$ )。进一

步判定蒙古栎林的林分密度、林木胸径与树冠结构对密集度的联合影响可知, 林分密度能解释林木竞争 47.1% 的变异, 林木竞争解释了胸径 0.1% 的变异, 林木胸径与竞争共同解释了树冠结构 62.8% 的变异, 林木竞争、胸径大小与树冠结构共同解释了密集度 23.6% 的变异。



\*: 表示 0.05 水平的显著性, \*\*\*: 表示 0.001 水平的显著性。

\*: The significant relationship at the 0.05 level, \*\*\*: The significant relationship at the 0.001 level.

图 4 林分密度、林木竞争、树冠结构和密集度的最优结构方程模型

Fig. 4 The best-fit SEM of stand density, tree competition, crown structure and crowding

表 4 林分密度、林木竞争、树冠结构对密集度的直接与间接影响

Table 4 Direct and indirect effect of stand density, tree competition, crown structure on crowding

响应变量 Response variable	解释变量 Explanatory variable	影响 Effect	Beta	P 值 P Value
林木竞争 Tree competition	林分密度 Stand density	直接 Direct	-0.686	<0.001
胸径 DBH	林木竞争 Tree competition	直接 Direct	0.024	0.612
树冠结构 Crown structure	林木竞争 Tree competition	直接 Direct	0.098	<0.05
密集度 Crowding	林木竞争 Tree competition	直接 Direct	0.416	<0.001
树冠结构 Crown structure	胸径 DBH	直接 Direct	0.784	<0.001
密集度 Crowding	胸径 DBH	直接 Direct	-0.019	0.827
密集度 Crowding	树冠结构 Crown structure	直接 Direct	0.219	<0.05
胸径 DBH	林分密度 Stand density	间接 Indirect	-0.017	—
树冠结构 Crown structure	林分密度 Stand density	间接 Indirect	-0.08	—
密集度 Crowding	林分密度 Stand density	间接 Indirect	-0.303	—

### 3 讨论

树冠结构的变化体现了林木适应不同生境的生态策略,是林木在环境驱动下兼容个体特征、树种特征、群落特征、资源权衡等多种因素的综合表征。树冠垂直与横向扩展可衍生多种林木特征与功能,这些特征能替代性的指示林木生长,以维持森林正常的功能,如冠幅能预测树木长势<sup>[1]</sup>。Hemery<sup>[18]</sup>认为,冠幅、树冠面积与林木胸径大小有关,其在蒙古栎林中得到了进一步证实。万志兵<sup>[19]</sup>等认为檫树人工林中胸径与树冠体积、冠长能达到显著相关,该结论在蒙古栎次生林中亦成立;不仅如此,蒙古栎林的林木冠长率、冠形率与林木胸径也存在显著相关。林木胸径与树冠结构的这种密切关系可能是林木为适应环境,长期进化形成的生长对策,因为林木生存空间一旦扩大后,目标树主要将同化物质向侧枝分配促进了树冠生长,目的是为获取更多的光热资源。Gonzalez-Benecke<sup>[20]</sup>等认为立地条件(气候、土壤)影响林木胸径与树冠结构的关系。然而,本研究由于调查样地相邻,立地环境基本一致,因此胸径与树冠结构的相关性并未受立地条件的影响;反而,林分密度对胸径与树冠结构的关系有影响,这与Brumelis<sup>[21]</sup>等在云杉林的研究结果基本一致。林分密度反映了林木占据空间资源和获取光照条件的能力,本研究发现,蒙古栎林树冠结构与林木胸径的关系在不同密度林分间的差异较大,尤其随着林分密度增大,冠长与胸径的相关性越强。这可能是林木在树冠水平空间严重受限时采取的向上生长的生态对策,林木通过变粗、延伸冠长促使树冠上下不同部位的枝条获取更多的光照资源<sup>[3]</sup>。

树冠结构对林分拥挤条件的变化非常敏感,能反映林木在同一林分的竞争状况<sup>[22]</sup>,树冠结构越复杂,不同冠层的林木可通过树冠间隙获得越多光资源,形成单位面积上更加密集树冠<sup>[23]</sup>,表明树冠结构与密集度之间存在相互影响的关系。本研究,林分密度不仅通过林木竞争间接影响密集度,还通过林木竞争—树冠结构的共同介导作用间接影响密集度。究其原因可能是:一方面,林分密度过大加剧了林木竞争,进而引发自疏,一旦自疏发生后,长势良好的林木优先利用扩大的生长空间伸枝展叶获取营养资源,与一些弱势木及幼树在空间上形成

复层林,最终冠层挤压条件因林分密度的调整而改变,从而影响了密集度。调查发现,蒙古栎林内林隙现象较严重且呈斑块状分布,林隙中间及其边缘木树冠形态、胸径长势差异较大,尽管林隙内幼树更新较好,但个别优势树种,如蒙古栎、华山松、白桦与椴树等处于林上层,林隙内与其边缘木的密集度差异较大。另一方面,也可能与蒙古栎林不同树种的生长特性有关。研究认为,具有不同生长潜力的树种占据不同的冠层位置,通过延伸不同高度的树枝和叶片,共同促进了物种共存<sup>[24]</sup>。由于资源互补效应,蒙古栎林不同树种间的生态位差异导致了林木对光热资源更加充分的利用,使林木之间的竞争作用减少,从而导致树冠结构对密集度的直接影响。另外,优势树种蒙古栎、华山松、白桦和椴树对林分密集度起了关键性作用,因此树冠结构的这种直接影响很可能与优势树种有关。本研究,林分密度并未通过林木竞争—胸径的共同作用显著影响密集度,而是通过林木竞争—胸径—树冠结构对密集度产生显著影响,其中,胸径对树冠结构有极显著影响,且林木竞争与胸径对树冠结构变异的解释度最高。这与石小龙等<sup>[25]</sup>、龙时胜<sup>[26]</sup>等在人工油松林、青冈栎次生林中的发现一致,即林木胸径与冠幅呈线性关系,林木越粗,其冠幅也越大,且随着林木径阶越大,林木树冠变大的同时,树冠的影响半径也在增大。这可能是由于随着林木生长发育,其对空间资源的需求越强,林木通过扩大树冠(延展冠幅横向生长,增加冠长向上生长)的策略提高光合能力的同时也要依靠增大胸径来提高树干的支撑能力。

树冠结构的变异能保证林木更能适应林分拥挤状态<sup>[27]</sup>。蒙古栎林的树冠体积、树冠面积、冠幅与冠长的变异较强,其中,冠幅与冠长对构建树冠结构与密集度的路径关系(结构方程模型)起了主要作用,林分密度影响蒙古栎林树冠结构的变异。Vieilledent<sup>[28]</sup>等认为,树冠结构的强度变异导致了光照条件随时间的高度异质性,反过来,光照不够或采光不均匀又影响树冠生长,表明树冠结构的变异可能还与林地光环境有关。本研究,蒙古栎林的密集度处于中等密集至很密集状态,其中,处于很密集状态的林木比例最大(29.7%),这意味着林分内树冠连接很密,树冠相互重叠过高,可能一定

尺度内密集连接的树冠降低了林木对光热资源的利用强度,从而限制了林木生长且降低了林下更新。然而,关于光环境驱动树冠结构变异的机理尚需深入研究,尤其树冠体积、冠幅与冠长应作为树冠结构的重要指标加以关注。此外,树冠生长过程中林冠层过于拥挤会直接导致树体损伤,应采用疏伐扩大生长空间的方式来预防<sup>[29]</sup>。

## 4 结论

森林的密度效应一直是森林经营关注的问题,以小陇山蒙古栎次生混交林为研究对象,采用单因素方差分析、相关性分析和最优结构方程模型,探究了蒙古栎林树冠结构与密集度的关系。研究发现,不同密度蒙古栎林的树冠结构有差异,且树冠结构特征与林木胸径大小有关,林分密度影响了蒙古栎林树冠结构与密集度的关系。要实现蒙古栎林可持续经营,不仅要考虑林木胸径大小,更要关注树冠结构特征,通过调整林分密度可优化树冠结构,改善林冠层挤压状况,以促进森林更新与增加物种多样性。然而,本研究仍存在不足之处,如研究样地较少,林分类型单一,以至于设置的林分密度梯度较少,导致无法深入分析树冠结构与密集度的关系。今后的研究应选择补充不同立地条件的样地,并考虑加入环境要素(海拔、水分、土壤等),以充分揭示蒙古栎林结构中的密度效应问题,为小陇山蒙古栎林的合理经营提供科学依据。

## 参考文献:

- [1] Hans P. Tree growth as affected by stem and crown structure[J]. *Trees*, 2021, 35: 947-960.
- [2] Fotis A T, Morin T H, Fahey R T, et al. Forest structure in space and time: biotic and abiotic determinants of canopy complexity and their effects on net primary productivity[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 250: 181-191.
- [3] 章志都,徐程扬,蔡宝军,等.林分密度对山桃树冠结构的影响研究[J]. *北京林业大学学报*, 2009, 31(6): 187-192.
- [4] 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.
- [5] Krajicek J E, Brinkman K A, Gingrich S F. Crown competition-A measure of density[J]. *Forest Science*, 1961, 35-42.
- [6] Hans P, Peter B, Enno U, et al. Crown size and growing space requirement of common tree species in urban centres, parks, and forests[J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2015, 14: 466-479.
- [7] Qin Y P, He X, Lei X D, et al. Tree size inequality and competition effects on nonlinear mixed effects crown width model for natural spruce-fir-broadleaf mixed forest in northeast China[J]. *Forest Ecology and Management*, 2022, 518: 120291.
- [8] Sillett S C, Antoine M E, Campbell-Spickler J. Manipulating tree crown structure to promote old-growth characteristics in second-growth redwood forest canopies[J]. *Forest Ecology and Management*, 2018, 417: 77-89.
- [9] Yachi S, Loreau M. Does complementary resource use enhance ecosystem functioning? A model of light competition in plant communities[J]. *Ecology Letters*, 2007, 10(1): 54-62.
- [10] Vospernik S, Sterba H. Do competition-density rule and self-thinning rule agree?[J]. *Annals of Forest Science*, 2015, 72: 379-390.
- [11] Burkhardt H E, Tomé M. *Modeling Forest Trees and Stands*[M]. Berlin, Germany: Springer, 2012.
- [12] 万盼,刘文楨,刘瑞红,等.结构化经营对栎松混交林林分空间结构及稳定性的影响[J]. *林业科学*, 2020, 56(4): 35-45.
- [13] 马映栋,张宋智,王鹏,等.不同采伐强度对小陇山辽东栎天然林空间结构的影响[J]. *西北林学院学报*, 2014, 30(6): 1-5.
- [14] 惠刚盈,赵中华,胡艳波,等.结构化森林经营理论与实践[M].北京:科学出版社,2020.
- [15] 蒋孟多,马映栋,蒋睿,等.小陇山蒙古栎林群落结构与稳定性评价[J]. *林业资源管理*, 2022(4): 36-44.
- [16] 张金屯. *数量生态学*[M].北京:科学出版社,2018.
- [17] Liu L, Zeng F P, Song T Q, et al. Stand structure and abiotic factors modulate karst forest biomass in Southwest China[J]. *Forests*, 2020, 11: 443.
- [18] Hemery G E, Savill P S, Pryor S N. Applications of the crown diameter and stem diameter relationship for different species of broadleaved trees[J]. *Forest Ecology and Management*, 2005, 215: 285-294.
- [19] 万志兵,李秀芹,刘成功,等.不同发育阶段檫木人工林树高、胸径与树冠结构关系的动态关系分析[J]. *基因组学与应用生物学*, 2017, 36(1): 331-339.
- [20] Gonzalez-Benecke C A, Gezan S A, Samuelson L J, et al. Estimating *Pinus palustris* tree diameter and stem volume from tree height, crown area and stand-level parameters[J]. *Journal of Forestry Research*, 2014, 25(1): 43-52.
- [21] Brumelis G, Dauškane I, Elferts D, et al. Estimates of tree canopy closure and basal area as proxies for tree crown volume at a stand scale[J]. *Forests*, 2020, 11: 1180.
- [22] Thorpe H C, Astrup R, Trowbridge A, et al. Competition and tree crowns: a neighborhood analysis of three boreal tree species[J]. *Forest Ecology and Management*, 2010, 259: 1586-1596.
- [23] Rissanen K, Martin-Guay M O, Riopel-Bouvier A S, et al. Light interception in experimental forests affected by tree diversity and structural complexity of dominant canopy[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, 278: 107655.
- [24] Toigo M, Perot T, Courbaud B, et al. Difference in shade tolerance drives the mixture effect on oak productivity[J]. *Journal of Ecology*, 2018, 106: 1073-1082.
- [25] 石小龙,杜彦昌,王鹏,等.小陇山油松人工林林冠指标相关性



- 研究[J]. 西北林学院学报, 2018, 33 ( 3 ): 67-73.
- [26] 龙时胜, 曾思齐, 肖化顺, 等. 基于Hegyi改进模型的青冈栎次生林竞争分析[J]. 林业资源管理, 2018 ( 1 ): 50-56.
- [27] Pretzsch H, Dieler J. Evidence of variant intra- and interspecific scaling of tree crown structure and relevance for allometric theory[J]. *Oecologia*, 2012, 169: 637-649.
- [28] Vieilledent G, Courbaud B, Kunstler G, *et al.* Individual variability in tree allometry determines light resource allocation in forest ecosystems: a hierarchical Bayesian approach[J]. *Oecologia*, 2010, 163: 759-773.
- [29] Fichtner A, Sturm K, Rickert C, *et al.* Crown size-growth relationships of European beech (*Fagus sylvatica* L. ) are driven by the interplay of disturbance intensity and inter-specific competition[J]. *Forest Ecology and Management*, 2013, 302: 178-184.

## Relationships between Crown Structure and Crowding in *Quercus mongolica* Forest of Xiaolong Mountains under Different Stand Densities

JIANG Meng-duo<sup>1,4</sup>, MA Ying-dong<sup>2</sup>, JIANG Rui<sup>3</sup>, LI Ping-ying<sup>1</sup>, BAO Yong-ping<sup>4</sup>

(1. Key Laboratory of Secondary Forest Cultivation in Gansu Province, Tianshui 741020, Gansu, China; 2. College of Ecology and Environment, Xinjiang University, Urumqi 830000, Xinjiang, China; 3. College of Geography and Environmental Sciences, Northwest Normal University, Lanzhou 730000, Gansu, China; 4. Tange Forest Farm, Xiaolongshan Forestry Protection Center in Gansu Province, Tianshui 741314, Gansu, China)

**Abstract:** [Objective] This study explores the relationships between stand density, crown structure and crowding, in order to deeply clarify the structural characteristics of *Quercus mongolica* secondary forest for providing sufficient scientific basis for sustainable forest management in the future. [Method] In August 2020, typical plots with similar site conditions and different stand densities were selected from the secondary mixed forest of *Quercus mongolicus* in Xiaolong Mountains to analyze the relationship between crown structure and crowding under different stand densities by using Pearson correlation analysis and structural equation model. [Result] There were differences in the crown structure characteristics of *Quercus mongolicus* forest with different stand densities. The variation in crown volume was the strongest, followed by crown length and crown area. The variation in crown width, crown length ratio and crown shape ratio was the weakest. The variation trend in crown structure characteristics showed a unimodal distribution with changes in stand density. With the decrease of stand density, the correlation trends of crown width, crown area and crown volume with DBH were similar to "L" pattern, while the correlation between crown length and DBH were consistent with the change in stand density, and the effects of stand density on the correlation between crown length rate, crown shape rate and DBH was not significant. The crowding of the *Quercus mongolica* forest ranged from medium dense to very dense, but the crowding in different density stands was different. The dominant species of *Quercus mongolica*, *Betula platyphylla*, *Pinus armandii* and *Tilia tuan* dominated the crowding. The influence of stand density on the relationship between crown structure and crowding in *Quercus mongolicus* forest could be divided into two ways: forest competition - indirect effects mediated by crown structure; The indirect impact mediated by forest competition, diameter at breast height, and crown structure. [Conclusion] The crown structures of *Quercus mongolica* forest vary with different stand densities. Crown structure is related to the DBH. The relationship between crown structure and crowding of *Quercus mongolicus* forest is finally affected by stand density. In order to achieve sustainable management of the *Quercus mongolicus* secondary forest, we should not only consider the DBH, but also pay attention to the characteristics of the crown structure. By adjusting stand density, we can optimize the crown structure and improve the crowding state to promote forest regeneration and increase species diversity.

**Keywords:** crown structure; crowding; stand density; Xiaolong Mountains