

DOI:10.13275/j.cnki.lykxyj.2022.03.021

黄河故道刺槐人工林空间和大小结构特征

张岗岗^{1,2,4}, 刘伟霞¹, 王洋¹, 范定臣^{3,4*},
王晶^{3,4}, 刘艳萍^{3,4}

(1. 河南师范大学生命科学学院, 河南 新乡 453007; 2. 河南省黄河流域生态工程技术研究中心, 河南 新乡 453007; 3. 河南省林业科学研究院, 河南 郑州 450008; 4. 河南原阳黄河故道沙地生态系统国家定位观测研究站, 河南 新乡 453007)

摘要: [目的] 量化黄河故道刺槐人工林结构多样性, 为黄河故道森林结构精细调控和森林质量精准提升提供依据。[方法] 对 2 块 50 m × 100 m 黄河故道刺槐人工林固定样地进行每木定位和调查, 采用径阶-林分空间结构参数二元分布同时量化描述林木空间和大小结构特征, 并采用 α 多样性指数量化描述不同空间结构状态下林木大小多样性。[结果] 刺槐人工林林分 A 和 B 中 6~36 cm 径阶随机分布林木分别占 56.2% 和 52.2%, 且随机分布林木具有更高的大小多样性 ($H_A = 2.73$ 、 $H_B = 2.75$) 和较差的均匀性。不同优劣等级林木径阶分布基本呈正态分布, 且林木越粗壮越占竞争优势, 但林分 B 中不同优劣等级林木具有更高的大小多样性。林分 A 和 B 中分别有 85.1% 和 80.5% 的林木混交较差, 较集中分布于 8~30 cm 和 14~34 cm, 林分 B 中不同混交度等级林木具有更高的大小多样性。林分 A 中非常稀疏林木径阶分布呈右偏正态分布, 其 6~30 cm 占到 37.2%, 而林分 B 非常密集林木径阶分布呈双峰型, 其 6~8 cm 和 22~40 cm 的株数比例分别为 8.7% 和 22.5%。[结论] 黄河故道刺槐人工林不同空间结构和大小多样性较差, 需制定有效经营措施以提高森林生产力。

关键词: 刺槐人工林; 黄河故道; 多样性; 空间结构; 二元分布

中图分类号: S718.54

文献标志码: A

文章编号: 1001-1498(2022)03-0185-08

森林群落是不同物种个体共同存在的总和, 被认为是相互作用的林木个体网络系统^[1-2], 既包括邻体本身的树种和大小差异, 也包括林木之间的相互作用关系。基于最近相邻木关系的空间结构参数仅能表征林木空间关系, 并不包括林木大小复杂性。林木大小分布直观地反映了林木个体本身大小的差异, 但与邻体的空间结构多样性无关^[3], 这可能一定程度上限制了对森林结构多样性的深入理解。例如, 不同起源兴安落叶松 (*Larix gmelini* (Rupr.) Rupr.) 均可能呈随机分布, 但天然林直径分布倒 J 型, 人工林单峰型^[4]; 弱度抚育和单木择伐形成的芬兰南部云杉 (*Picea asperata* Mast.) 林空间格局均为均匀分布, 但其直径分布分别呈钟形和倒 J 形^[5]。因此, 同时量化描述林分空间和大

小结构多样性, 有助于深入理解森林结构异质性, 也有利于指导森林结构优化调整。

刺槐作为黄河故道区域水土治理的优良树种, 已形成面积大小不一、林农交错的刺槐防护林带^[6]。但由于品种老化、土地贫瘠、经营粗放等, 出现生长势减弱、枯梢或死亡现象, 迫需制定合理的改造措施。森林结构是森林经营强有力的抓手, 也是有效提升森林质量和生产力的关键, 因此, 量化描述黄河故道刺槐人工林结构多样性至关重要。以往研究偏重刺槐人工林的土壤特性^[7]、水分利用效率^[6]、生理生态特性^[8]、立地与生长互作效应^[9]等方面的研究, 而鲜有关于其结构多样性的报道。有鉴于此, 本研究以黄河故道刺槐人工林为研究对象, 采用径阶-林分空间结构参数二元分布同时量

收稿日期: 2021-12-05 修回日期: 2021-12-26

基金项目: 河南省林科院基本科研业务费项目 (2021JB02013); 博士人才科研启动课题项目 (校 20210034)

* 通讯作者: 范定臣, 正高级工程师。主要从事森林生态学研究。E-mail: 498839779@qq.com

化描述林分空间和大小结构特征, 并采用 α 多样性指数反映不同空间结构状态下林木大小多样性, 旨在为黄河故道区域森林质量精准提升奠定理论基础, 从而有效促进黄河流域生态保护和高质量发展。

1 研究方法

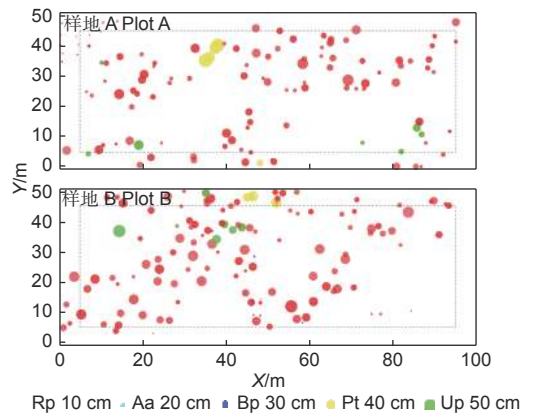
1.1 研究区概况

河南原阳黄河故道沙地生态系统国家定位观测研究站 (113° 36'~114° 15' E, 34° 55'~35° 11' N), 位于河南省新乡市原阳县福宁集镇, 地处豫北平原, 南临黄河, 属暖温带大陆性季风气候区, 四季分明, 春季干旱多风, 冬寒夏热, 秋凉春早, 年均气温 14.2℃, 年均降水量 573.4 mm, 主要集中在 7—9 月, 年日照时数 2 324.5 h, 平均相对湿度 56%, 土壤主要为两合土、风沙土、盐碱土, 植被属针阔叶混交林^[10]。1982 年河南省启动豫北黄河故道风沙区防护林工程建设, 1987 年初步形成网—带—片相结合的防护林体系, 以发挥防风固沙和减轻灾害的生态效益^[11], 其中, 刺槐人工林多采用冬春季截干植苗造林方式, 株行距 1.5 m × 1.5 m 或 1.5 m × 2.0 m^[12]。

1.2 样地设置与调查

于 2021 年 7 月选取典型地段设置 2 块 50 m × 100 m 刺槐人工林固定监测样地 (图 1), 利用 TOPCON 全站仪进行每木定位, 采用胸径围尺测

定胸径 (DBH ≥ 5 cm), 激光测高测距仪测定树高和枝下高, 皮尺测定东西南北 4 个方向冠幅。同时记录经纬度、海拔、坡度、坡位、坡向等因子。为避免边缘效应的影响, 样地四周设置 5 m 缓冲区。该刺槐人工林属过熟林, 乔木层主要是刺槐 (*Robinia pseudoacacia* L.)、毛白杨 (*Populus tomentosa* Carr.) 和臭椿 (*Ailanthus altissima* (Mill.) Swingle) (表 1), 林下主要为中华胡枝子 (*Lespedeza chinensis* G. Don)、枸杞 (*Lycium chinense* Miller)、臭草 (*Melica scabrosa* Trin.)、飞廉 (*Carduus nutans* L.) 等。



注: 圆圈大小分别代表胸径相对大小, 其颜色分别代表树种 Rp、Aa、Bp、Pt 和 Up (表 1)。

Note: Circle size represents DBH size, and their color represents tree species (i.e., Rp, Aa, Bp, Pt and Up) (Table 1).

图 1 林木位置示意图

Fig. 1 Location diagram of trees

表 1 刺槐人工林乔木概况

Table 1 Survey of the *R. pseudoacacia* plantation forest

| 树种 Species | 缩写 Abbreviation | 胸径 DBH/cm | | 树高 Height/m | | 冠幅 Crown/m | | 密度 Density/(trees·hm ⁻²) | | 断面积 Basal area/(m ² ·hm ⁻²) | |
|-----------------------------------|--------------------|--------------|------|----------------|------|---------------|-----|---|-----|---|------|
| | | A | B | A | B | A | B | A | B | A | B |
| 刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i> | Rp | 22.7 | 25.3 | 10.2 | 10.3 | 3.1 | 4.5 | 216 | 244 | 4.37 | 6.14 |
| 臭椿 <i>Ailanthus altissima</i> | Aa | 22.7 | 29.1 | 12.9 | 14.3 | 5.3 | 4.9 | 10 | 12 | 0.20 | 0.40 |
| 毛白杨 <i>Populus tomentosa</i> | Pt | 44.3 | 36.4 | 16.2 | 16.1 | 7.6 | 6.7 | 10 | 8 | 0.77 | 0.42 |
| 榆树 <i>Ulmus pumila</i> | Up | 26.4 | 45.8 | 12.9 | 15.0 | 4.0 | 8.0 | 6 | 2 | 0.16 | 0.17 |
| 构树 <i>Broussonetia papyrifera</i> | Bp | — | 7.4 | — | 4.2 | — | 3.7 | — | 10 | — | 0.02 |

1.3 数据分析与处理

以 5.0 cm 为起测胸径, 采用上限排外法以 2 cm 为间距划分若干径阶, 作为林木大小基本单元。基于最近相邻木空间关系的林分空间结构指标能够准确地描述林分中林木结构多样性特征^[13], 因

此, 本研究利用 R 语言 ForSAS 程序包计算混交度 (M_i)、大小比数 (U_i)、角尺度 (W_i) 和密集度 (C_i), 其具体取值和生物学意义见参考文献^[3]。其次, 采用径阶-空间结构参数二元分布 (即 DBH- W 、DBH- U 、DBH- M 、DBH- C 二元分布)^[3] 同时

量化描述林分空间和大小结构异质性信息, 并采用 R 语言 *vegan* 程序包计算 Shannon-Weaver 多样性指数 (H)、Pielou 均匀度指数 (J)、Simpson 指数 (D)、物种累计数 (S), 分别描述不同空间分布格局、优势程度、混交状况和密集程度下径阶大小分布多样性, 即不同空间结构状态下林木大小分布多样性。

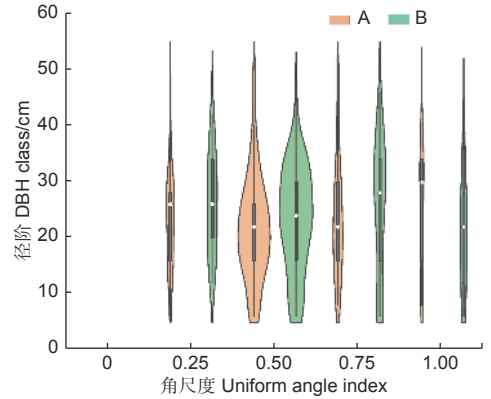
2 结果与分析

2.1 角尺度-径阶二元分布

黄河故道刺槐人工林林分 A 和 B 分别有 59.5% 和 54.4% 的林木呈随机分布, 其次是均匀分布和聚集分布林木, 再者是很不均匀林木。林分 A 和 B 中随机分布林木呈中间大两头小 (图 2), 其中 6~36 cm 径阶的随机分布林木分别占各林分总株数的 56.2% 和 52.2%, 说明随机分布林木径阶分布相对集中, 而其余分布格局林木基本呈细长型, 表示其在各径阶分布相对分散。林分 B 中随机分布和聚集分布林木的中位数均大于林分 A, 而其很聚集分布林木则明显小于林分 A, 说明林分 B 中随机分布和聚集分布林木更趋于粗壮, 而林分 A 中很聚集分布林木更趋于粗壮。

2.2 不同分布格局林木大小多样性

刺槐人工林林分 A 和 B 中随机分布林木径阶的 Shannon-Weaver 多样性指数分别为 2.73 和 2.75 (表 2), 其 Simpson 多样性指数均为 0.93, 明显高于其它分布格局林木, 而 Pielou 均匀度指数仅为 0.93, 说明随机分布林木大小多样性较高而均匀性较差。林分 A 不同分布格局林木的 Shannon-Weaver 多样性指数和 Simpson 多样性指数取值相对较大, 而其仅聚集分布林木的均匀度取值也相对较大, 说明林分 A 中不同分布格局林木的大小多样性较高而聚集分布格局下的均匀性较好, 林分



注: 中间的黑色粗条表示四分位数范围, 从其延伸的细黑线代表 95% 置信区间, 白点为中位数, 密度图宽代表频率, 尾部平的截断代表分别径阶的最大值和最小值, 下同。

Note: The thick black bar in the middle represents the quartile range, the thin black line extending from it represents the 95% confidence interval, and the white dot represents the median, the width of the density plot represents the frequency, and the flat truncations of the tail represents the maximum and minimum values of the DBH class. The same below.

图 2 角尺度-径阶联合分布

Fig. 2 W-DBH class joint distribution

B 中均匀分布格局下林木均匀性略高于林分 A。

2.3 大小比数-径阶二元分布

黄河故道刺槐人工林林分 A 和 B 中亚优势木株数比例分别为 13.2% 和 13.8%, 其余等级林木略大于 20.0%。林分 A 和 B 中不同优劣等级林木径阶分布基本呈中间大两头小 (图 3), 其径阶集中分布范围分别为 26~50、22~34、16~32、12~26 和 6~22 cm, 且随着大小比数等级的增大, 其中位数和集中分布范围呈递减趋势, 二者呈显著的线性负相关, 意味着林分中林木大小比数等级越小, 林木越趋于粗壮而在林分中越占竞争优势。林分 A 不同大小比数等级林木径阶分布的中位数和集中分布范围基本小于林分 B, 意味着林分 B 不同优劣等级林木比林分 A 更为粗壮。

表 2 不同分布格局林木大小多样性

Table 2 Tree size diversity in different distribution patterns

| W | Shannon-Weaver多样性指数 Shannon-Weaver diversity index | | Simpson多样性指数 Simpson diversity index | | 物种累计数 Species accumulative number | | Pielou均匀度指数 Pielou evenness index | |
|------|---|------|---|------|--------------------------------------|----|--------------------------------------|------|
| | A | B | A | B | A | B | A | B |
| | 0.00 | 0.00 | 0.00 | NA | 0.00 | 1 | 0 | 0.00 |
| 0.25 | 2.14 | 2.37 | 0.93 | 0.95 | 10 | 12 | 0.86 | 0.90 |
| 0.50 | 2.73 | 2.75 | 0.93 | 0.93 | 19 | 19 | 0.93 | 0.93 |
| 0.75 | 2.49 | 2.54 | 0.97 | 0.96 | 13 | 14 | 0.91 | 0.91 |
| 1.00 | 1.68 | 2.30 | 0.94 | 0.96 | 6 | 11 | 0.79 | 0.89 |

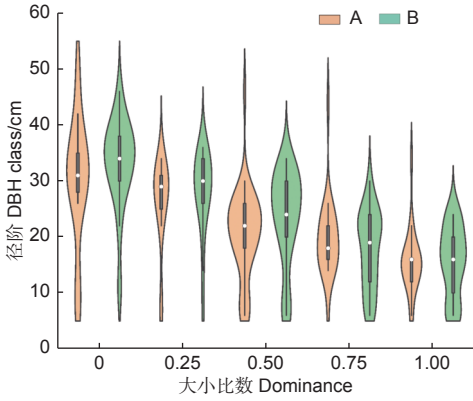


图 3 大小比数-径阶联合分布

Fig. 3 U-DBH class joint distribution

表 3 不同优势度林木大小多样性

Table 3 Tree size diversity in different dominance degree

| U | Shannon-Weaver多样性指数 Shannon-Weaver diversity index | | Simpson多样性指数 Simpson diversity index | | 物种累计数 Species accumulative number | | Pielou均匀度指数 Pielou evenness index | |
|------|---|------|---|------|--------------------------------------|----|--------------------------------------|------|
| | A | B | A | B | A | B | A | B |
| 0.00 | 2.28 | 2.36 | 0.92 | 0.95 | 12 | 12 | 0.88 | 0.90 |
| 0.25 | 2.05 | 2.16 | 0.93 | 0.94 | 9 | 10 | 0.85 | 0.87 |
| 0.50 | 2.25 | 2.23 | 0.94 | 0.93 | 11 | 11 | 0.88 | 0.88 |
| 0.75 | 2.09 | 2.23 | 0.95 | 0.93 | 9 | 11 | 0.87 | 0.88 |
| 1.00 | 1.72 | 2.08 | 0.88 | 0.95 | 7 | 9 | 0.78 | 0.86 |

2.5 混交度-径阶二元分布

刺槐人工林林分 A 和 B 中零度混交林木株数比例分别为 68.6% 和 60.9%，其次是弱度混交，分别为 16.5% 和 19.6%，仅有 5% 左右的林木周围为其它树种伴生，说明林分中大多数林木与同种伴生，整体混交较差。林分 B 中零度混交林木径阶中位数和集中分布范围分别为 24 cm 和 14~34 cm (图 4)，而林分 A 分别为 20 cm 和 8~30 cm，因此，林分 A 零度混交林木相对较细，而林分 B 则相对粗壮，林分 A 中弱度混交和中度混交林木径阶分布呈细长型，说明其分布较分散，而林分 B 相对集中，林分 A 和 B 中混交良好林木 ($M_i = 0.75、1.00$) 径阶分布基本呈细长型，无明显差异。

2.6 不同混交度林木大小多样性

刺槐人工林林分 A 不同混交度等级林木径阶分布的 Shannon-Weaver 多样性指数和 Simpson 多样性指数均小于林分 B (表 4)，意味着林分 B 中不同混交度等级林木具有更高的大小多样性，

2.4 不同优势度林木大小多样性

刺槐人工林林分 A 不同优势等级林木径阶分布的 Shannon-Weaver 多样性指数和 Simpson 多样性指数均小于林分 B (表 3)，意味着林分 B 中不同优势等级林木具有更高的大小多样性。林分 A 中中庸和劣势等级林木的 Pielou 均匀度指数分别为 0.94 和 0.95，略大于林分 B，但其余等级 Pielou 均匀度指数均小于林分 B，因此，林分 A 中中庸和劣势等级林木的均匀性更好，林分 B 中优势、亚优势和绝对劣势等级林木大小均匀性更好。

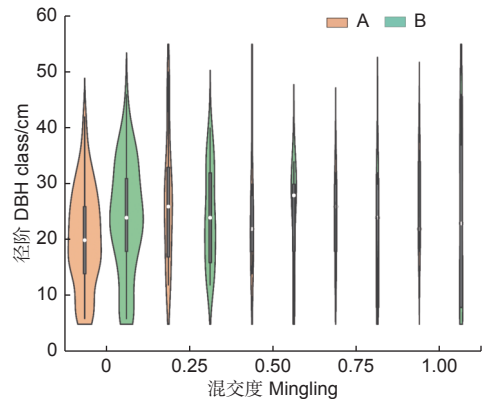


图 4 混交度-径阶联合分布

Fig. 4 M-DBH class joint distribution

而林分 A 相对较低。林分 B 不同混交度等级的 Pielou 均匀度指数分别为 0.91、0.94、0.92、0.97 和 0.93，均小于林分 A，说明林分 A 不同混交等级林木具有更好的大小均匀性，而林分 B 相对较差。

2.7 密集度-径阶二元分布

黄河故道刺槐人工林林分 A 和 B 中非常稀疏林木株数比例分别为 38.0% 和 13.8%，而非常密

表4 不同混交状况林木大小多样性

Table 4 Tree size diversity in different mingling degree

| M | Shannon-Weaver多样性指数 Shannon-Weaver diversity index | | Simpson多样性指数 Simpson diversity index | | 物种累计数 Species accumulative number | | Pielou均匀度指数 Pielou evenness index | |
|------|---|------|---|------|--------------------------------------|----|--------------------------------------|------|
| | A | B | A | B | A | B | A | B |
| 0.00 | 2.65 | 2.69 | 0.93 | 0.91 | 17 | 19 | 0.91 | 0.92 |
| 0.25 | 2.36 | 2.42 | 0.95 | 0.94 | 12 | 13 | 0.92 | 0.93 |
| 0.50 | 1.91 | 2.03 | 0.98 | 0.92 | 7 | 9 | 0.83 | 0.84 |
| 0.75 | 1.61 | 1.56 | 1.00 | 0.97 | 5 | 5 | 0.78 | 0.80 |
| 1.00 | 1.33 | 1.67 | 0.96 | 0.93 | 4 | 6 | 0.72 | 0.78 |

集林木株数比例分别为 13.2% 和 34.8%，其余等级均接近 16.0%，说明林分 A 中非常稀疏林木最常见，而林分 B 中非常密集林木最常见。刺槐人工林林分 B 中非常密集林木径阶分布呈双峰型（图 5），分别集中分布在 6~8 cm 和 22~40 cm，株数比例分别为 8.7% 和 22.5%，其余径阶则相对较少，而林分 A 非常密集等级林木径阶分布呈细长钟形。林分 A 中非常稀疏林木径阶分布呈右偏正态分布，即只有一个主要的集中分布范围，为 6~30 cm，其林木株数比例为 37.2%，其余等级

林木分布则较为相似，其径阶分布基本呈正态分布，即呈中间大两头小，只有一个主要分布范围。而林分 B 径阶分布明显呈双峰型。随着密集度等级的增大，刺槐人工林径阶集中分布基本呈增大趋势，即粗壮林木树冠较大，更有可能与周围相邻木之间存在树冠重叠或竞争，而细矮林木趋于相对稀疏。

2.8 不同密集度林木大小多样性

刺槐人工林林分 A 中度密集和非常密集林木径阶分布的 Shannon-Weaver 多样性指数分别为 2.32 和 2.34（表 5），其小于林分 B，其余等级林木 Shannon-Weaver 多样性指数则相对较大，林分 A 和 B 不同密集度等级径阶分布的 Simpson 多样性指数接近。刺槐人工林林分 A 密集和非常密集林木的 Pielou 均匀度指数分别为 0.95 和 0.98，略高于林分 B，而其余等级低于林分 B。

3 讨论

3.1 径阶-空间结构参数二元分布

径阶-角尺度、径阶-大小比数、径阶-混交度、径阶-密集度 4 个二元联合分布借助频率表达优势同时量化描述了林分空间和大小结构异质性，既实

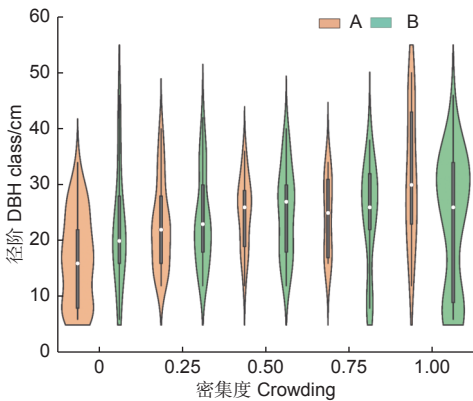


图5 密集度-径阶联合分布

Fig. 5 C-DBH class joint distribution

表5 不同密集度林木大小多样性

Table 5 Tree size diversity in different crowding degree

| C | Shannon-Weaver多样性指数 Shannon-Weaver diversity index | | Simpson多样性指数 Simpson diversity index | | 物种累计数 Species accumulative number | | Pielou均匀度指数 Pielou evenness index | |
|------|---|------|---|------|--------------------------------------|----|--------------------------------------|------|
| | A | B | A | B | A | B | A | B |
| 0.00 | 2.41 | 2.29 | 0.94 | 0.95 | 13 | 11 | 0.90 | 0.89 |
| 0.25 | 2.23 | 2.22 | 0.90 | 0.93 | 12 | 11 | 0.87 | 0.88 |
| 0.50 | 2.32 | 2.39 | 0.93 | 0.93 | 12 | 13 | 0.89 | 0.89 |
| 0.75 | 2.09 | 2.05 | 0.95 | 0.93 | 9 | 9 | 0.86 | 0.86 |
| 1.00 | 2.34 | 2.48 | 0.98 | 0.89 | 11 | 16 | 0.90 | 0.90 |

现了距离依赖和距离无关指标联合需求,又提供了比林分空间结构参数一元分布(即角尺度一元分布等)或径阶分布更详细的结构异质性信息。本研究得出黄河故道刺槐人工林林分 A 和 B 中 6~36 cm 径阶随机分布林木株数比例分别占到 56.2% 和 52.2%,林木越趋于粗壮而在林分中越占竞争优势,林分 A 和 B 中零度混交林木株数比例分别为 68.6% 和 60.9%,混交均较差,林分 A 以非常稀疏林木为主,且其径阶分布呈右偏正态分布,而林分 B 以非常密集林木为主,且其径阶分布呈双峰型。北京密云刺槐人工林混交较差($M = 0.190$),呈聚集分布,林分中零度混交和弱度混交林木比例高达 0.853,角尺度一元分布呈单峰状,说明林分以随机分布为主^[14]。黄土高原刺槐人工林不同胸径大小比数等级林木比例较为接近,林分内 48.0% 的林木处于随机分布,但整体属于均匀分布^[15]。由此可见,林分空间结构参数均值和一元分布可以较好地量化描述林分整体或单方面的空间结构特征^[16],但不涉及林木大小分化。杨晓毅^[17]对黄土高原沟壑区不同林龄人工刺槐林研究表明,幼龄林径阶分布多为左偏且呈高峰态,中龄林和成熟林则多为趋于右偏且呈低峰态,由此可见,偏度、峰度等仅能描述林木大小分布特征,但无法反映林木空间结构。森林群落是不同个体共生的综合,是邻体互作在小尺度上变异的综合结果^[2],因此,兼顾林分空间和大小结构的林分空间结构参数-径阶二元分布,弥补了传统森林空间和非空间量化描述方法的不足^[3],能更为全面地解译森林结构异质性信息。

3.2 不同空间结构状态下的林木大小多样性

α 多样性指数可有效量化描述黄河故道刺槐人工林不同空间结构状态下林木大小结构多样性,本研究表明林分 A 和 B 中随机分布林木大小多样性均较高但均匀性较差,林分 A 中不同混交度等级林木具有更高的大小均匀性,而林分 B 不同混交度等级和不同优势度林木则具有更高的大小多样性。林木由于遗传性和所处的具体立地条件等因素的不同,会使林木的大小(直径、树高、树冠等)产生某些差异,这些差异将会稳定地遵循一定的规律^[18]。因此,许多研究者采用 Shannon-Weaver 多样性指数、Simpson 多样性指数等描述林木大小丰富度,利用断面积 Gini 系数和直径离散程度的变异系数分析林木大小不一致性或采用偏度、峰度

等描述直径分布特征^[13,19-21]。例如,采用基于直径分布和基于直径大小分化的 Shannon-Weaver 多样性指数和 Simpson 多样性指数研究表明,油松落叶松人工混交林多样性高于侧柏人工纯林^[20],白皮松人工林林木大小的 Shannon-Weaver 多样性指数和 Simpson 多样性指数分别为 0.792 和 0.489,明显高于毛竹人工纯林^[19]。这些研究偏重强调林木大小结构属性相对丰富程度或均匀性,而与林木位置无关。本研究在系统论述黄河故道刺槐人工林林木大小和空间结构的基础上,进一步采用 Shannon-Weaver 指数、Simpson 指数和 Pielou 均匀度等量化描述不同空间结构状态下的林木大小结构多样性,有效丰富和完善了森林结构多样性量化方法。

3.3 结构多样性信息在实践中应用

径阶-林分空间结构参数二元分布可有效比较和评判不同起源、不同林龄或不同类型森林结构差异,优于之前研究中所采用的单变量分布或均值,如角尺度一元分布、 q 值或径阶直方分布图^[21]。其次,径阶-林分空间结构参数二元分布同时提供了林分空间和大小结构两方面的结构信息,这对于林分结构重建和可视化至关重要。Pommerening & Stoyan^[22]从最近相邻木统计分析中重建了空间点格局,这实现了林分结构重建的第一步,即林木在水平区域上的合理排列^[23]。天然林中 50% 以上林木呈随机分布^[24],可构建近自然人工林营造模式^[25],即随机造林模式。本研究所采用的二元分布可提供不同空间和大小结构异质性信息,有助于实现森林属性的有条件交换,使林分结构重建和可视化更趋近于天然林的结构特征,从而有效提升森林质量和生产力。现代森林生态系统经营策略的基础是提高林分结构的多样性,以达到可持续的目的^[19],基于最近相邻木的空间关系的结构参数使得空间结构的精细调整成为可能^[26],且便于探讨采伐木选择优先性^[27]、阐释采伐木空间结构特征^[28]、控制林分采伐强度^[3],并探讨不同森林经营方式对林分生长的影响^[29-30],而林分的及时更新与采伐方式是实现森林可持续利用的关键^[31],以径阶的株数频率计算的林木直径大小多样性更能反映林分幼树更新的差异^[32]。本研究不仅借助二元分布给出林木空间和大小结构特征,而且采用 α 多样性指数刻画了不同空间结构状态下的林木大小多样性,这在森林经营实践中具有重要的实用性和可操作性。例如,为促进黄河故道刺槐人工林趋于混交良好、随机分

布且较为稀疏,则需根据W-M-C三元分布^[16]将林分中很密集地同种聚集分布林木作为首选择伐木,同时需根据本研究所采用的径阶-林分空间结构参数二元分布(图2~图5)确定不同空间结构状态下的不同大小备选林木,采取选择性伐除空间和大小结构多样性较差林木,同时人工补植异种幼苗幼树,以使刺槐适当地与异种且不同粗细林木随机伴生。这种采伐木筛选优先性兼顾了林木空间和大小结构,不仅有助于精细调控优化森林结构,也有助于控制采伐强度,以精准提升黄河故道区域森林质量。

4 结论

黄河故道刺槐人工林中50.0%以上为随机分布林木,且其具有更高的大小多样性($H_A=2.73$ 、 $H_B=2.75$),不同优劣等级林木径阶分布基本呈正态分布,且林木越粗壮越占竞争优势,80.0%以上林木混交较差,林分A中非常稀疏林木径阶分布呈右偏正态分布,其6~30 cm径阶林木占到37.2%,而林分B非常密集林木径阶分布呈双峰型,且其不同优劣等级或混交度等级林木具有更高的大小多样性。因此,黄河故道刺槐人工林不同空间结构和大小多样性较差,迫需制定科学经营措施以提高森林质量。

参考文献:

- [1] Michalet R, Chen S Y, An L Z, et al. Communities: are they groups of hidden interactions?[J]. *Journal of Vegetation Science*, 2015, 26: 207-218.
- [2] Fichtner A, Härdtle W, Bruelheide H, et al. Neighbourhood interactions drive overyielding in mixed-species tree communities[J]. *Nature Communication*, 2018, 9: 1144.
- [3] 张岗岗. 天然林结构解译及林分状态综合评价[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2020.
- [4] 王宝, 张秋良, 王立明. 不同起源兴安落叶松林结构特征的比较[J]. *东北林业大学学报*, 2013, 41(2): 18-21.
- [5] Zenner E K, Lähde E, Laiho O. Contrasting the temporal dynamics of stand structure in even- and uneven-sized *Picea abies* dominated stands[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2011, 41: 289-299.
- [6] 陈金平, 兰再平, 杨慎骄, 等. 黄河故道不同灌水方式刺槐人工林幼树水分利用效率和生长特性[J]. *生态学报*, 2015, 35(8): 2529-2536.
- [7] 薛保健, 耿兵, 王华田, 等. 黄河故道刺槐与杨树混交林土壤特性的调查分析[J]. *安徽农学通报*, 2013, 19(6): 104-107.
- [8] Mao P L, Zhang Y J, Cao B H, et al. Effects of salt stress on eco-physiological characteristics in *Robinia pseudoacacia* based on salt-soil rhizosphere[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 568: 118-123.
- [9] 李思博. 河南三地刺槐与立地的互作效应及材性比较研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2019.
- [10] 张国祯, 郭宏忠, 陈平平, 等. 黄河故道风沙化土地成因及综合整治模式[J]. *水土保持学报*, 2002, 16(5): 64-68.
- [11] 赵强, 张光海, 崔灵霞, 等. 河南新乡黄河故道沙区生态防护林及林下经济的初步观察[C]//中国治沙暨沙业学会. 中国首届沙产业高峰论坛论文集. 银川: 中国沙产业高峰论坛, 2008: 305-307.
- [12] 刘达清, 李定航, 阎玉信. 新乡地区黄河故道防护林总体设计及初步效益研究报告[J]. *中南林业调查规划*, 1988(4): 38-41.
- [13] 赵中华, 惠刚盈. 林分结构多样性研究进展[J]. *林业科学*, 2020, 56(9): 143-152.
- [14] 刘彦, 余新晓, 岳永杰, 等. 北京密云水库集水区刺槐人工林空间结构分析[J]. *北京林业大学学报*, 2009, 31(5): 25-29.
- [15] 倪静, 宋西德, 张永, 等. 永寿县刺槐人工林空间结构研究[J]. *西北林学院学报*, 2010, 25(3): 24-27.
- [16] 张岗岗, 刘瑞红, 惠刚盈, 等. 林分空间结构参数N元分布及其诠释——以小陇山锐齿栎天然混交林为例[J]. *北京林业大学学报*, 2019, 41(4): 21-31.
- [17] 杨晓毅. 黄土高原沟壑区人工刺槐林林分结构及林下植物多样性研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2011.
- [18] 孟宪宇. 测树学(第3版)[M]. 北京: 中国林业出版社, 2005.
- [19] 娄明华, 白超, 惠刚盈, 等. 7个林木大小多样性指数表达能力比较[J]. *生物多样性*, 2019, 27(4): 449-456.
- [20] 白超, 惠刚盈. 林木直径大小多样性量化测度指数的比较研究[J]. *林业科学研究*, 2016, 29(3): 340-347.
- [21] 雷相东, 唐守正. 林分结构多样性指标研究综述[J]. *林业科学*, 2002, 38(3): 140-146.
- [22] Pommerening A, Stoyan D. Reconstructing spatial tree point patterns from nearest neighbour summary statistics measured in small subwindows[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2008, 38(5): 1110-1122.
- [23] Lewandowski A, Gadov K V. A method for reproducing uneven-aged forest stands[J]. *Allgemeine Forst und Jagdzeitung*, 1977, 168: 170-174.
- [24] Zhang G Q, Hui G Y, Zhao Z H, et al. Composition of basal area in natural forests based on the uniform angle index[J]. *Ecological Informatics*, 2018, 45: 1-8.
- [25] Zhang G Q, Hui G Y, Hu Y B, et al. Designing near-natural planting patterns for plantation forests in China[J]. *Forest Ecosystems*, 2019, 6: 28.
- [26] 惠刚盈, 胡艳波, 刘瑞红. 森林观察研究中的林分空间优势度分析方法[J]. *温带林业研究*, 2019, 2(1): 1-6.
- [27] Li Y F, Hui G Y, Wang H X, et al. Selection priority for harvested trees according to stand structural indices[J]. *iForest Biogeosciences and Forestry*, 2017, 10(3): 561-566.

- [28] Li Y F, Ye S M, Hui G Y, *et al.* Spatial structure of timber harvested according to structure-based forest management[J]. *Forest Ecology and Management*, 2014, 322(3): 106-116.
- [29] 万 盼. 经营方式对甘肃小陇山锐齿栎天然林分质量的影响[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2018.
- [30] 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.
- [31] 黄清麟. 浅谈德国的“近自然森林经营”[J]. *世界林业研究*, 2005, 18 (3): 73-77.
- [32] Valbuena R, Packalen P, Marti s, *et al.* Diversity and equitability ordering profiles applied to study forest structure[J]. *Forest Ecology and Management*, 2012, 276: 185-195.

Space and Size Structure Characteristics of *Robinia pseudoacacia* Plantations in the Ancient Yellow River Course

ZHANG Gang-gang^{1,2,4}, LIU Wei-xia¹, WANG Yang¹, FAN Ding-chen^{3,4},
WANG Jing^{3,4}, LIU Yan-ping^{3,4}

(1. College of Life Sciences, Henan Normal University, Xinxiang 453007, He'nan, China; 2. Engineering Technology Research Center of Yellow River Basin Ecology in Henan Province, Xinxiang 453007, He'nan, China; 3. Henan Academy of Forestry, Zhengzhou 450008, He'nan, China; 4. The Yellow River Original Course National Observation and Research Station of Sandy Ecosystem in Yuanyang County of He'nan Province, Xinxiang 453007, Henan, China)

Abstract: [Objective] To accurately regulate forest structure, and effectively improve the forest quality, the structural diversities of *Robinia pseudoacacia* plantations in the Ancient Yellow River Course were explored, which will be helpful for ecological protection and high-quality development of the Yellow River Basin. [Method] Two 50 m × 100 m permanent plots (A and B) were established in *R. pseudoacacia* plantations in the Ancient Yellow River Course, and all the trees in the two plots were located and investigated. The bivariate distributions of DBH class and spatial parameter were used to quantitatively describe the space and size structure diversity, and the α diversity indices were used to quantify the tree size structure diversity under different spatial structures. [Result] The randomly distributed trees in plots A and B with 6~36 cm DBH class in the *R. pseudoacacia* plantations accounted for 56.2% and 52.2%, and the size diversity of randomly distributed trees in both stands were higher ($H_A=2.73$ 、 $H_B=2.75$) than others, but their uniformity were poorer. The DBH class distribution of different dominance degree trees were close to normal distribution. However, trees in plot B of different dominance degrees had higher size diversity. 85.1% and 80.5% of the trees were poorly mixed in plots A and B, and they were more concentrated at 8~30 cm and 14~34 cm, respectively. The trees with different mingling values in plot B had higher size diversity. The DBH class distribution of trees in spare sub-area in plot A was right-skewed normal distribution, accounting for 37.2% of the trees with 6~30 cm DBH class, while that of trees in dense sub-area in plot B was bimodal, and the proportion of trees with 6~8 cm and 22~40 cm in plot B were 8.7% and 22.5%, respectively. [Conclusion] The space and size structure diversities of *R. pseudoacacia* plantation were poor, and it is urgent to make effective management measures to improve forest productivity.

Keywords: *Robinia pseudoacacia* plantations; Ancient Yellow River Course; diversity; spatial structure; bivariate distribution

(责任编辑: 彭南轩)