

## 黄山松人工林林分空间结构对林下植物多样性的影响

吕康婷, 张二山, 李思颖, 靳姗姗, 周梦丽, 闫东锋

(河南农业大学 林学院, 河南 郑州 450002)

**摘要:** 【目的】探究黄山松 *Pinus taiwanensis* 人工林林分空间结构对林下植物多样性影响的主导因子, 旨在为营造健康稳定的黄山松人工林提供科学依据。【方法】以河南省大别山区黄柏山林场 40 年生黄山松人工林为研究对象, 计算林分角尺度、混交度、空间密度指数、林层指数、开敞度和 Hegyi 竞争指数等 6 个林分空间结构参数和林下草本、灌木以及更新树种植物多样性测度指标, 分别采用灰色关联度分析、Pearson 相关分析和典型相关分析方法研究了林分空间结构对林下植物多样性的影响。【结果】灰色关联度分析结果表明: 所有林分空间结构参数中, 与林下草本植物多样性灰色关联度最大的为角尺度, 而与灌木和更新植物多样性灰色关联度最大的为混交度。Pearson 相关分析结果表明: 角尺度与林下草本 Shannon 多样性指数、Margalef 丰富度指数以及灌木 Simpson 优势度指数呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ ), 混交度与草本 Pielou 均匀度指数、灌木 Shannon 多样性指数和 Margalef 丰富度指数呈显著正相关 ( $P < 0.05$ ), 而空间密度指数与林下更新树种 Margalef 丰富度指数呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ )。典型相关分析结果表明: 6 个林分空间结构参数与林下草本、灌木植物多样性指标的整体相关性强, 相关系数分别为 0.998 5 和 0.999 5, 其中角尺度和混交度对林下灌草植物多样性的影响较大。【结论】黄山松人工林林分空间结构对林下植物多样性产生较为显著的影响, 可通过调整林分水平空间结构, 优化林分竞争态势及林分垂直空间结构等方式提高黄山松人工林林下植物多样性。表 6 参 34

**关键词:** 林分空间结构; 林下植物多样性; 灰色关联度分析; Pearson 相关分析; 典型相关分析

中图分类号: S754 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2022)06-1257-10

## Effects of stand spatial structure on understory plant diversity in *Pinus taiwanensis* plantation

LÜ Kangting, ZHANG Ershan, LI Siying, JIN Shanshan, ZHOU Mengli, YAN Dongfeng

(College of Forestry, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, Henan, China)

**Abstract:** [Objective] The objective is to explore the key stand spatial structure factors that influence the understory plant diversity in *Pinus taiwanensis* plantations and provide a scientific basis for constructing healthy and stable *P. taiwanensis* plantations. [Method] Three analysis methods were used (grey correlation analysis, Pearson correlation analysis, and canonical correlation analysis) to discuss the effects of stand spatial structure on understory plant diversity in a 40-year-old *P. taiwanensis* plantation. We selected uniform angle index, mingling degree, spatial density index, storey index, opening degree index, Hegyi competition index as stand spatial structure parameters, and Simpson dominance index, Shannon diversity index, Pielou uniformity index, Margalef richness index as plant diversity indexes. [Result] Grey correlation analysis showed uniform angle index had the highest grey correlation with herb plant diversity; while mingling degree had the highest grey correlation with shrub and regeneration plant diversity. Pearson's correlation analysis indicated that uniform angle index was extremely significant positively correlated with herb Shannon diversity index, herb

收稿日期: 2022-01-21; 修回日期: 2022-06-24

基金项目: 河南省重大科技专项 (201300111400); 河南省科技攻关项目 (222102110418)

作者简介: 吕康婷 (ORCID: 0000-0003-3242-9840), 从事森林经理学研究。E-mail: kangtinglv@163.com。通信作者: 闫东锋 (ORCID: 0000-0002-8997-384X), 教授, 博士, 从事森林资源经营与管理、数量生态学研究。E-mail: yandongfeng2002@126.com

Margalef richness index, and shrub Simpson dominance index ( $P < 0.01$ ); mingling degree was significantly positively correlated with herb Pielou uniformity index, shrub Shannon diversity index and shrub Margalef richness index significantly ( $P < 0.05$ ); while spatial density index was extremely significant positively correlated with the Margalef richness index of understory regeneration tree species ( $P < 0.01$ ). Canonical correlation analysis suggested that the six stand spatial structure parameters had a strong overall canonical correlation with herb and shrub plant diversity with corresponding coefficients of 0.998 5, and 0.999 5, respectively. Especially, uniform angle index and mingling degree had a greater impact. [Conclusion] Stand spatial structure significantly impacted understory plant diversity in *P. taiwanensis* plantations. Therefore, it's a feasible way to improve understory plant diversity by adjusting stand horizontal spatial structure, optimizing stand competitive condition, and regulating stand vertical spatial structure. [Ch, 6 tab. 34 ref.]

**Key words:** stand spatial structure; understory plant diversity; grey correlation analysis; Pearson relational analysis; canonical correlation analysis

植物多样性是衡量植物群落结构稳定性和功能复杂性的重要指标之一<sup>[1-2]</sup>, 增加林下植物多样性能够提高人工林的稳定性, 促进生态系统功能的发挥<sup>[3]</sup>。林下植物在改善土壤理化性质、促进人工林养分循环、维护物种多样性等方面发挥着重要作用<sup>[4]</sup>。有关林下植物多样性的研究多集中在林龄、林分密度、平均胸径等非空间结构因子<sup>[5-7]</sup>和海拔、土壤等环境因子方面<sup>[8-9]</sup>。林分空间结构是森林经营过程中最容易调控的因子<sup>[10]</sup>, 可通过直接改变林下植物生长的微环境, 对林下植物多样性产生较大影响<sup>[11]</sup>。常见的林分空间结构参数包括角尺度、大小比数、混交度等<sup>[12]</sup>。已有研究表明: 林分空间结构对林下植物多样性具有显著影响<sup>[13-14]</sup>。黎芳等<sup>[11]</sup>对飞播马尾松 *Pinus massoniana* 林的研究中已经发现了林分空间结构各参数对林下植物多样性的影响有差异, 然而影响林下植物多样性的主导因子并不明确。在森林经营过程中, 如何采取科学合理的措施对林分空间结构进行调整, 进而增加林下植物多样性, 这对于培育健康稳定的森林生态系统具有重要价值。目前, 有关林分空间结构与林下植物多样性的研究多以栎类<sup>[14]</sup>、松类<sup>[15]</sup>等为对象, 且多集中于天然林、次生林等林分类型, 而针对人工林的相关研究较少。黄山松 *Pinus taiwanensis* 是中国特有造林树种, 具有重要的生态和经济价值。本研究以河南大别山区黄柏山林场黄山松人工林为研究对象, 采用灰色关联度分析、Pearson 相关分析和典型相关分析方法, 探讨了影响黄山松人工林林下草本、灌木和更新树种植物多样性最关键的林分空间结构因子, 以期对林分空间结构调整和健康稳定森林营造工作提供科学依据。

## 1 研究区概况

研究区位于河南省信阳市商城县黄柏山林场九峰尖林区 (31°23'~31°35'N, 115°13'~115°20'E), 属北亚热带向南暖温带过渡地带。研究区主要乔木种为黄山松、杉木 *Cunninghamia lanceolata* 等; 主要灌木种为山胡椒 *Lindera glauca*、盐肤木 *Rhus chinensis*、油茶 *Camellia oleifera* 等; 主要草本植物为中华鳞毛蕨 *Dryopteris chinensis*、荩草 *Arthraxon hispidus*、悬铃叶苧麻 *Boehmeria tricuspis* 等; 主要更新树种为黄山松、麻栎 *Quercus acutissima* 等。

## 2 研究方法

### 2.1 样地设置与野外调查

2020年11月, 在研究区选取生长条件基本一致, 林分年龄为40~50 a的黄山松人工林地块, 利用典型取样法共设置30个20 m×30 m的方形样地, 并按照相邻网格法分割为6个10 m×10 m的乔木层调查小样方, 对每个小样方内乔木(胸径≥5 cm)的树种名称、坐标、胸径、树高等基本测树因子进行记录。其中, 乔木坐标由POSTEX林地定位仪测量。此外, 在每个样地的西北角、东南角和中心共设置3个1 m×1 m小样方用于调查草本植物, 在西北角和东南角共设置2个2 m×2 m小样方用于调查灌木, 并将小样方内的乔木树种(0.2 m<幼苗高度<1.0 m; 幼树高度≥1.0 m且胸径<5 cm)记为更新树种, 按

照先灌木幼树后草本幼苗的顺序对小样方内灌草、更新树种进行调查，记录物种名称、数量和盖度等因子以及海拔、坡向和坡度等样地基本调查因子。根据样地所在小班经营历史，除 5 a 进行 1 次以清理枯死木、伐除劣质木为主要措施的抚育间伐之外，没有其他采伐活动。基本情况见表 1。

表 1 样地基本概况

Table 1 Basic information of the sampling plots

样地号	海拔/m	坡度/(°)	坡向	郁闭度	株密度/(株·hm <sup>-2</sup> )	平均胸径/cm	平均树高/m
1	845.4	13	西	0.72	767	21.9	10.9
2	834.5	17	西北	0.70	567	22.7	11.5
3	841.4	0		0.65	400	26.4	12.1
4	902.9	23	西南	0.80	1 234	15.9	9.8
5	886.9	35	东南	0.74	1 217	17.2	9.4
6	853.8	17	西	0.75	1 000	18.0	9.8
7	901.2	25	东北	0.71	1 017	18.2	10.4
8	939.8	18	东北	0.70	834	18.6	9.9
9	944.3	18	北	0.72	717	18.6	10.0
10	881.3	22	东北	0.75	967	21.1	10.6
11	912.7	30	北	0.76	1 084	16.2	10.8
12	909.2	18	东南	0.80	1 034	19.6	11.5
13	839.0	26	西北	0.75	1 034	20.1	11.2
14	839.0	32	南	0.72	1 100	17.7	10.1
15	817.4	20	东北	0.76	917	18.9	10.3
16	820.1	26	西南	0.85	1 584	17.9	10.4
17	829.4	10	西北	0.86	1 450	16.8	9.7
18	778.3	20	西	0.82	884	18.1	10.1
19	862.2	23	西北	0.80	1 400	16.5	10.1
20	824.0	31	西北	0.90	1 167	18.9	10.6
21	790.1	17	西	0.76	734	19.9	10.5
22	831.4	25	西北	0.67	433	21.6	12.3
23	840.9	28	西	0.52	333	24.6	12.8
24	756.2	35	西北	0.52	500	26.6	12.1
25	776.4	17	西	0.78	500	25.3	13.0
26	813.5	34	南	0.75	517	20.2	10.7
27	823.2	20	东北	0.83	617	20.4	10.9
28	792.7	27	西北	0.82	1 067	20.7	12.2
29	794.2	31	西北	0.85	917	21.9	13.2
30	782.4	23	西	0.86	1 417	20.0	10.9

## 2.2 林分空间结构参数计算

以 4 株木法确定林分空间结构单元，选用角尺度、混交度、空间密度指数、林层指数、开敞度和 Hegyi 竞争指数等 6 个林分空间结构参数来反映整个林分空间结构特征。角尺度表示林木的水平空间分布格局<sup>[16]</sup>，取值范围为 [0.475, 0.517] 时，林分空间分布格局为随机分布，当角尺度 < 0.475 时为均匀分布，当角尺度 > 0.517 时为团状分布；混交度用于分析树种间相互隔离程度<sup>[17]</sup>，混交度取值划分为 0.00, (0.00, 0.25], (0.25, 0.50], (0.50, 0.75] 和 (0.75, 1.00] 共 5 个区间，分别表示林分内林木间的零度混交、弱度混交、中度混交、强度混交以及极强度混交；空间密度指数用来描述林木空间分布密度状况<sup>[18]</sup>，取值在 [0.00, 0.50], (0.50, 0.75], (0.75, 1.00] 区间内，分别表示林木之间为均匀分布、随机分布和聚集分布；林层指数代表林分垂直方向上林层结构的复杂程度<sup>[19]</sup>，取值区间为 (0, 1]，其值越大，说明林分

在垂直方向上的成层性就越复杂；开敞度用于描述林分的开阔程度<sup>[20]</sup>，取值划分为(0.00, 0.20]，(0.20, 0.30]，(0.30, 0.4]，(0.40, 0.50]和(0.50, +∞)，分别表示林分状态为严重不足、不足、基本充足、充足以及很充足。Hegyi 竞争指数反映了林木受近邻木的竞争强烈程度<sup>[21]</sup>，取值在[0, 6)，[6, 12)，[12, 18)，[18, ∞)区间，分别表示弱度、低度、中度、强度4个竞争等级。

根据上述林分空间结构参数变异系数值大小，将变异系数≤10%，>10%~<100%，≥100%划分为弱度、中等和强度变异性<sup>[22]</sup>。

### 2.3 植物多样性指数的计算

选用物种 Simpson 优势度指数 ( $D_s$ )、Shannon 多样性指数 ( $H$ )、Pielou 均匀度指数 ( $J$ ) 以及 Margalef 丰富度指数 ( $M_a$ )<sup>[23]</sup> 来描述林下草本、灌木和更新树种植物多样性水平。

### 2.4 灰色关联度分析

采用标准化的方法消除指标数值的量纲。将影响林下植物多样性的林分空间结构参数(角尺度、混交度、空间密度指数、林层指数、开敞度和竞争指数)作为子序列( $X_i$ ),  $i=1, 2, 3, 4, \dots, n$ ; 分别将林下草本、灌木和更新树种植物多样性指标( $D_s$ 、 $H$ 、 $J$ 、 $M_a$ )作为母序列( $X_0$ ), 且  $X_0=[X_0(1), X_0(2), \dots, X_0(k)]$ ,  $X_i=[X_i(1), X_i(2), \dots, X_i(k)]$ 。以此分析林分空间结构参数与林下植物多样性指标的关联程度。子序列与母序列在某一时刻的紧密程度可用关联系数表示<sup>[24]</sup>。通常将因子重要性同等看待, 来计算等权关联度( $r_i$ )。

### 2.5 数据处理

采用 Winkelmass、Excel 2019 计算样地林分空间结构参数, R-4.1.0 中的 Vegan 包计算植物多样性指数。采用 DPS 计算林分空间结构与林下植物多样性的灰色关联度; 采用 SPSS 25.0 计算 Pearson 相关系数; 采用 R-4.1.0 计算检验林分空间结构参数分别与林下草本、灌木、更新树种植物多样性指标之间最优线性组合的典型载荷以及典型相关系数。

## 3 结果与分析

### 3.1 黄山松人工林林分空间结构特征

从表 2 可知: 该黄山松人工林林分空间结构参数均属于中等变异, 其中竞争指数 ( $C_1$ ) 和开敞度 ( $K$ ) 的变异程度较大, 变异系数分别为 39.7% 和 31.3%。还可看出, 研究区林分角尺度 ( $W$ ) 均值为 0.48, 属于理想的随机分布状态; 林分混交度 ( $M$ ) 均值是 0.67, 说明该林分处于强度混交; 林分空间密度指数 ( $D$ ) 均值为 0.47, 表明林木空间分布密度为均匀分布; 林层指数 ( $S$ ) 为 0.14~0.60, 且均值小于 0.50, 说明林分在垂直方向上的成层性相对简单; 开敞度均值为 0.32, 表明林分生长空间基本充足; Hegyi 竞争指数为 0.46~4.89, 说明林分处于弱度竞争状态。

### 3.2 黄山松人工林林下植物多样性特征

由表 3 可以看出: 研究区草本、灌木和更新树种的 Margalef 丰富度指数 ( $M_a$ ) 分别为 0.51~1.52、0.35~1.86、0.48~2.28, 这 3 个指数在林下植物中变化较大, 变异系数分别为 31.8%、44.9% 和 33.6%。

### 3.3 黄山松人工林林分空间结构对林下植物多样性的影响

3.3.1 林分空间结构对林下草本植物多样性的影响 由表 4 可知: 林分角尺度 ( $W$ ) 与草本植物多样性指数  $H$ 、 $M_a$  灰色关联程度最大, 林分混交度与草本植物多样性指数  $D_s$ 、 $J$  关联度最大, 说明林分水平空间结构因子 ( $W$ 、 $M$ ) 是影响研究区林下草本植物多样性的主要因子, 且  $W$  的关联度系数大于  $M$ 。从 Pearson 相关性结果可知:  $W$ 、竞争指数 ( $C_1$ ) 与草本植物多样性指数  $H$ 、 $M_a$  呈极显著正相关 ( $P<0.01$ ), 空间密度指数 ( $D$ ) 与草本植物多样性指数  $H$ 、 $M_a$  存在显著正相关 ( $P<0.05$ ), 其中  $W$  显著性最大;  $M$  与草本植物多样性指数  $J$  呈显著正相关 ( $P<0.05$ ), 林层指数 ( $S$ ) 与草本植物多样性指数  $H$ 、 $J$ 、 $M_a$  相关系

表 2 黄山松人工林林分空间结构参数

Table 2 Spatial structure parameter of <i>P. taiwanensis</i> plantation stand						
林分空间结构参数	均值±标准误	中位数	最大值	最小值	标准差	变异系数/%
$W$	0.48±0.01	0.48	0.56	0.36	0.05	10.4
$M$	0.67±0.02	0.75	0.84	0.55	0.08	11.9
$D$	0.47±0.04	0.48	0.66	0.25	0.11	23.4
$S$	0.41±0.01	0.40	0.60	0.14	0.08	19.1
$K$	0.32±0.02	0.28	0.66	0.20	0.10	31.3
$C_1$	2.85±0.21	3.11	4.89	0.46	1.13	39.7



表 3 黄山松人工林林下植物多样性

Table 3 Understory plant diversity in *P. taiwanensis* plantation

林下植物	多样性指数	均值±标准误	中位数	最大值	最小值	标准差	变异系数/%
草本	$D_s$	0.63±0.03	0.64	0.83	0.21	0.17	27.0
	$H$	1.23±0.07	1.24	1.89	0.44	0.39	31.7
	$J$	0.80±0.02	0.83	0.99	0.40	0.16	19.4
	$M_a$	0.85±0.05	0.79	1.52	0.51	0.27	31.8
灌木	$D_s$	0.50±0.02	0.50	0.78	0.20	0.12	24.0
	$H$	0.79±0.05	0.69	1.56	0.35	0.26	32.9
	$J$	0.88±0.02	0.92	1.00	0.50	0.18	20.5
	$M_a$	0.89±0.07	0.87	1.86	0.35	0.40	44.9
更新树种	$D_s$	0.67±0.02	0.69	0.82	0.44	0.10	14.9
	$H$	1.26±0.06	1.28	1.82	0.64	0.31	24.6
	$J$	0.92±0.01	0.92	1.00	0.77	0.05	5.4
	$M_a$	1.46±0.09	1.54	2.28	0.48	0.49	33.6

表 4 林分空间结构与林下草本植物多样性的灰色关联度 (排序) 和 Pearson 相关系数

Table 4 Grey correlation degree (order) and Pearson correlation coefficient between stand spatial structure and understory herb plant diversity

林分空间结构参数	林下草本植物多样性指标				
	$D_s$	$H$	$J$	$M_a$	
灰色关联度分析	$W$	0.708 5(4)	0.840 6(1)	0.660 3(6)	0.848 6(1)
	$M$	0.733 6(1)	0.657 4(4)	0.751 1(1)	0.660 3(4)
	$D$	0.709 9(3)	0.701 5(2)	0.695 5(4)	0.687 7(2)
	$S$	0.699 7(5)	0.629 6(5)	0.728 6(2)	0.616 6(5)
	$K$	0.688 1(6)	0.595 4(6)	0.683 9(5)	0.582 9(6)
	$C_1$	0.732 0(2)	0.677 4(3)	0.716 5(3)	0.666 3(3)
	Pearson 相关分析	$W$	0.104	0.937**	-0.098
$M$		0.252	0.357	0.393*	0.355
$D$		0.122	0.403*	0.122	0.382*
$S$		0.200	0.199	0.017	0.193
$K$		-0.032	0.215	0.326	0.195
$C_1$		0.146	0.546**	0.072	0.524**

说明：\*\*、\*分别表示显著相关水平  $P < 0.01$ 、 $P < 0.05$ ；括号中数字是排序号

数均最小，且不显著 ( $P > 0.05$ )。

典型相关性结果选用  $\alpha$  在 0.05 的水平上检验后得到的最佳变量。根据研究区林分空间结构参数与林下草本植物多样性指标的计算可知，其最优变量  $U_1$  和  $V_1$  的典型相关系数为 0.998 5，得出典型变量的线性组合为：

$$\begin{cases} U_1 = 0.172 7W + 0.059 5M - 0.012 0D + 0.001 4S + 0.000 9K + 0.010 1C_1 \\ V_1 = -0.006 1D_s + 0.053 0H - 0.003 3J + 0.134 8M_a \end{cases}。$$

其中： $U_1$  是林下草本植物多样性指标对应的林分空间结构参数的线性组合。由上述线性组合可知：混交度 ( $M$ ) 和角尺度 ( $W$ ) 的载荷均较大，开敞度 ( $K$ ) 和林层指数 ( $S$ ) 的载荷均较小，分别为 0.059 5、0.172 7 和 0.000 9、0.001 4，说明乔木层林木的林分水平空间结构 ( $M$ 、 $W$ ) 在对林下草本植物多样性的影响力上占主导地位，林分垂直空间结构 ( $K$ 、 $S$ ) 对林下灌木植物多样性的影响最小。 $V_1$  是林下草本植物多样性指标的线性组合，其中变量  $M_a$  的载荷较大，说明对林分空间结构参数较为敏感的是草本的丰富度指数。

3.3.2 林分空间结构对林下灌木植物多样性的影响 由表 5 可知：林分混交度 ( $M$ ) 与灌木植物多样性指

数  $J$ 、 $M_a$  灰色关联度最大, 林分角尺度 ( $W$ ) 与灌木植物多样性指数  $D_s$  关联度最大, 林分空间密度指数 ( $D$ ) 与灌木植物多样性指数  $H$  关联度最大, 说明林分水平空间结构因子 ( $M$ 、 $W$ 、 $D$ ) 是影响研究区林下灌木植物多样性的主要因子。Pearson 相关分析结果显示: 角尺度、竞争指数与灌木植物多样性指数  $D_s$  存在极显著正相关 ( $P < 0.01$ ), 空间密度指数与  $D_s$  呈显著正相关 ( $P < 0.05$ ),  $W$  与  $D_s$  相关性最大;  $M$  与灌木植物多样性指数  $H$ 、 $J$ 、 $M_a$  相关系数最大, 且  $M$  与  $H$ 、 $M_a$  呈显著正相关 ( $P < 0.05$ )。  $K$  与  $J$ 、 $M_a$  相关系数最小, 且均不显著 ( $P > 0.05$ )。

表 5 林分空间结构与林下灌木植物多样性的灰色关联度 (排序) 和 Pearson 相关系数

Table 5 Grey correlation degree (order) and Pearson correlation coefficient between stand spatial structure and understory shrub plant diversity

林分空间结构参数	林下灌木植物多样性指标				
	$D_s$	$H$	$J$	$M_a$	
灰色关联度分析	$W$	0.861 1(1)	0.721 9(5)	0.871 5(4)	0.848 6(5)
	$M$	0.663 3(4)	0.733 0(3)	0.659 2(1)	0.660 3(1)
	$D$	0.695 6(2)	0.753 0(1)	0.694 6(3)	0.687 7(3)
	$S$	0.627 2(5)	0.732 2(4)	0.621 4(5)	0.616 6(4)
	$K$	0.597 6(6)	0.709 6(6)	0.595 0(6)	0.582 9(6)
	$C_1$	0.675 2(3)	0.751 9(2)	0.672 0(2)	0.666 3(2)
	Pearson 相关分析	$W$	0.952**	0.136	0.104
$M$		0.337	0.375*	0.252	0.442*
$D$		0.397*	0.302	0.122	0.189
$S$		0.182	0.226	0.200	0.233
$K$		0.202	0.136	-0.032	0.090
$C_1$		0.525**	0.308	0.146	0.190

说明: \*\*、\* 分别表示显著相关水平  $P < 0.01$ 、 $P < 0.05$ ; 括号中数字是排序号

根据研究区林分空间结构参数与林下灌木植物多样性指标的计算可知其最优变量间  $U_2$  和  $V_2$  的典型相关系数为 0.999 5, 得出典型变量的线性组合为:

$$\begin{cases} U_2 = 0.175 8W + 0.056 4M - 0.007 9D + 0.000 5S + 0.001 7K + 0.003 5C_1 \\ V_2 = 0.187 1D_s - 0.007 7H - 0.005 8J - 0.007 1M_a \end{cases}$$

其中:  $U_2$  是林下灌木植物多样性指标对应的林分空间结构参数的线性组合。由上述线性组合可知: 其角尺度 ( $W$ )、混交度 ( $M$ ) 的载荷均较大, 林层指数 ( $S$ )、开敞度 ( $K$ ) 的载荷均较小, 其值分别为 0.175 8、0.056 4 和 0.000 5、0.001 7, 说明乔木层林木的林分水平空间结构 ( $W$ 、 $M$ ) 在对林下灌木植物多样性的影响力上占主导地位, 林分垂直空间结构 ( $S$ 、 $K$ ) 对其影响最小。  $V_2$  是林下灌木植物多样性指标的线性组合, 其中  $D_s$  的载荷较大, 说明林下灌木优势度指数对林分空间结构参数较为敏感。

3.3.3 林分空间结构对更新树种植物多样性的影响 由表 6 可知: 林分混交度 ( $M$ ) 与更新树种植物多样性指数  $D_s$  和  $H$  关联度最大, 林分空间密度指数 ( $D$ ) 与更新树种植物多样性指数  $J$ 、 $M_a$  关联度最大, 且  $M$  的关联度大于  $D$ , 说明林分水平空间结构因子 ( $M$ 、 $D$ ) 是影响研究区林下更新树种植物多样性的主要因子。  $D$  与更新树种植物多样性指数  $M_a$  的 Pearson 相关性最大, 呈极显著相关 ( $P < 0.01$ ), 混交度与更新树种植物多样性指数  $D_s$ 、 $H$  相关系数最大,  $K$  与  $D_s$ 、 $H$  相关系数最小, 且均不显著 ( $P > 0.05$ )。

根据研究区林分空间结构参数与林下更新树种植物多样性指标的计算可得其最大典型相关系数为 0.681 6, 但未通过典型相关系数检验, 得出典型变量的线性组合为:

$$\begin{cases} U_3 = -0.137 4W + 0.015 2M + 0.157 3D - 0.048 7S - 0.113 0K + 0.122 4C_1 \\ V_3 = -0.178 2D_s - 0.035 6H - 0.078 5J - 0.308 3M_a \end{cases}$$

其中:  $U_3$  是林下更新树种植物多样性指标对应的林分空间结构参数的线性组合,  $V_3$  是林下更新树种植物多样性指标的线性组合。

表 6 林分空间结构与林下更新树种植物多样性的灰色关联度 (排序) 和 Pearson 相关系数

Table 6 Grey correlation degree (order) and Pearson correlation coefficient between stand spatial structure and understory regeneration plant diversity

林分空间结构参数		林下更新树种植物多样性指标			
		$D_s$	$H$	$J$	$M_a$
灰色关联度分析	$W$	0.708 5(4)	0.717 5(4)	0.687 5(5)	0.630 8(6)
	$M$	0.733 6(1)	0.744 7(1)	0.694 1(3)	0.657 2(5)
	$D$	0.709 9(3)	0.722 6(3)	0.730 1(1)	0.689 0(1)
	$S$	0.699 7(5)	0.710 5(5)	0.715 3(2)	0.668 5(3)
	$K$	0.688 1(6)	0.700 0(6)	0.692 2(4)	0.667 3(4)
	$C_1$	0.732 0(2)	0.739 6(2)	0.674 8(6)	0.674 4(2)
Pearson 相关分析	$W$	0.104	0.104	-0.021	-0.021
	$M$	0.252	0.245	0.012	0.117
	$D$	0.122	0.099	-0.085	0.491**
	$S$	0.200	0.191	0.251	0.006
	$K$	-0.032	-0.051	-0.221	0.208
	$C_1$	0.146	0.134	-0.261	0.266

说明：\*\*、\*分别表示显著相关水平 $P<0.01$ 、 $P<0.05$ ；括号中数字是排序号

## 4 讨论

### 4.1 林分空间结构对林下草本植物多样性的影响

本研究发现：林分水平空间结构因子角尺度、混交度与草本植物多样性的灰色关联度最大，其中角尺度关联度大于混交度。与曹小玉等<sup>[25]</sup>结论相似，即角尺度和混交度是影响天然次生林林下草本物种多样性的主要空间结构因子；但刘红民等<sup>[24]</sup>研究结论不尽相同，认为混交度是影响林下草本多样性的最大关键因子，这可能是由于本研究区域立地质量、林分类型等不同所导致。Pearson 相关分析结果显示：角尺度与林下草本植物多样性指数  $H$ 、 $M_a$  相关性最大，呈极显著正相关 ( $P<0.01$ )，混交度与林下草本植物多样性指数  $J$  存在显著相关 ( $P<0.05$ )，表明随着角尺度和混交度的增大能够提高林下草本多样性。典型相关结果表明：林分水平空间结构 (混交度、角尺度) 在对林下草本植物多样性的影响力上占主导地位。这说明角尺度是影响林下草本植物多样性的主导因子，角尺度表征林分水平分布格局，增大角尺度可能影响了乔木冠层和林冠间隙的分布，进而影响到土壤的温度和水分，促进了研究区内土壤的养分循环过程<sup>[26]</sup>，从而提高了草本植物多样性。

### 4.2 林分空间结构对林下灌木植物多样性的影响

林分水平空间结构因子混交度、角尺度和空间密度指数与灌木植物多样性的灰色关联度最大，其中混交度的关联程度大于角尺度和空间密度指数。Pearson 相关分析结果显示：角尺度与灌木植物多样性指数  $D_s$  相关系数为 0.952，呈极显著正相关 ( $P<0.01$ )，混交度与灌木植物多样性指数  $H$ 、 $J$ 、 $M_a$  相关性最大，混交度与  $H$ 、 $M_a$  呈显著正相关 ( $P<0.05$ )。这说明混交度是影响林下灌木植物多样性的主导因子，树种隔离程度越大，林下灌木植物多样性程度也越大，这与朱光玉等<sup>[14]</sup>研究结果一致。典型相关结果也表明：林分水平空间结构因子 (角尺度、混交度) 对林下灌木植物多样性的影响最大。混交度表征林分水平空间结构，混交度会对林内生境条件造成影响<sup>[27]</sup>，增大混交度影响了乔木层各树种间的相互作用，这种相互作用为林下灌木生长释放了营养空间，提高了营养资源的利用水平<sup>[28]</sup>，从而增加了林下灌木植物多样性。

### 4.3 林分空间结构对林下更新树种植物多样性的影响

林分水平空间结构因子混交度、空间密度指数是影响林下更新树种植物多样性的主要因子，但混交度的灰色关联度大于林分空间密度指数，说明混交度是影响林下更新树种植物多样性主导因子。Pearson 相关结果也表明，更新树种植物多样性指数  $M_a$  与空间密度指数的相关系数为 0.491，存在极显著相关 ( $P<0.01$ )，更新树种植物多样性指数  $D_s$ 、 $H$  与混交度相关系数最大。上述发现与董莉莉等<sup>[29]</sup>研究发现混交度对更新树种植物多样性有显著影响一致，说明在改善树种隔离的同时，要优化林木空间分

布密度, 这能够提升林下更新树种的更新潜力, 有利于增加林下更新树种植物多样性<sup>[30]</sup>。

此外, 本研究发现: 林分垂直空间结构因子开敞度、林层指数对林下草本、灌木、更新树种植物多样性灰色关联程度较小, 且与林下植物多样性指数均无显著相关。典型相关分析结果也显示: 林分垂直空间结构因子林层指数、开敞度对林下草本和灌木植物多样性的影响程度最小。这与张亚昊等<sup>[31]</sup>发现开敞度对物种多样性无显著相关的结果存在相似性, 可能是本研究区林层结构较为简单, 林下植物对枯枝落叶分布以及光斑分布并不敏感。

林下植被发育与林分特征密切相关, 其中林分郁闭度、林分密度、林冠结构等是影响林下植被的重要因素。已有大量研究表明: 林分密度、郁闭度、林冠结构与林下物种多样性存在密切关系。如王媚臻等<sup>[32]</sup>研究发现: 随林分密度降低, 灌木层多样性指数呈先增后减的单峰变化, 草本层多样性指数呈先增后减再增再减的双峰变化; 赵燕波等<sup>[33]</sup>研究发现: 随郁闭度减小, 林下植物多样性指数都呈增大趋势, 但更小郁闭度可能会导致林下多样性相对减小, 不利于林地地力维持。综合而言, 林分密度和郁闭度过大或过小, 均不利于林下植物的生长。林冠结构也会影响林下草本层的结构和多样性, 不同林冠梯度下的林下植被物种组成因林下光照强弱而不同<sup>[34]</sup>。但本研究仅讨论了6个林分空间结构参数对林下植物多样性的影响, 不够全面。今后可以尝试引入林分密度、郁闭度等林分特征因子进一步探讨。

## 5 结论

林分空间结构与林下草本、灌木、更新树种植物多样性之间存在密切联系。林分水平空间结构对林下植物多样性影响最大, 竞争因子次之, 林分垂直空间结构最小。其中, 角尺度是影响林下草本植物多样性的关键因子, 混交度是影响林下灌木和更新树种植物多样性的关键因子。在今后的造林经营中, 可通过调控林分水平空间分布格局, 改善林木的竞争态势和垂直空间分布格局等方式以达到提高林下植物多样性的目的, 促使黄山松人工林朝着健康稳定的森林生态系统方向发展。

## 6 参考文献

- [1] 张柳桦, 齐锦秋, 李婷婷, 等. 林分密度对天津文峰山马尾松人工林林下物种多样性和生物量的影响[J]. 生态学报, 2019, **39**(15): 5709 – 5717.  
ZHANG Liuhua, QI Jinqiu, LI Tingting, *et al.* Effects of stand density on understory plant diversity and biomass in a *Pinus massoniana* plantation in Wenfeng Mountain, Xinjin County [J]. *Acta Ecol Sin*, 2019, **39**(15): 5709 – 5717.
- [2] VAHDATI F B, MEHRVARZ S S, NAQINEZHAD A, *et al.* How plant diversity features change across ecological species groups? A case study of a temperate deciduous forest in northern Iran [J]. *Biodiversitas*, 2014, **15**(1): 31 – 38.
- [3] 车盈, 金光泽. 物种多样性和系统发育多样性对阔叶红松林生产力的影响[J]. 应用生态学报, 2019, **30**(7): 2241 – 2248.  
CHE Ying, JIN Guangze. Effects of species diversity and phylogenetic diversity on productivity of a mixed broad-leaved-Korean pine forest [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2019, **30**(7): 2241 – 2248.
- [4] 褚建民, 卢琦, 崔向慧, 等. 人工林林下植被多样性研究进展[J]. 世界林业研究, 2007, **20**(3): 9 – 13.  
CHU Jianmin, LU Qi, CUI Xianghui, *et al.* Review on species diversity of undergrowth vegetation in plantation ecosystem [J]. *World For Res*, 2007, **20**(3): 9 – 13.
- [5] 崔宁洁, 陈小红, 刘洋, 等. 不同林龄马尾松人工林林下灌木和草本多样性[J]. 生态学报, 2014, **34**(15): 4313 – 4323.  
CUI Ningjie, CHEN Xiaohong, LIU Yang, *et al.* Shrub and herb diversity at different ages of *Pinus massoniana* plantation [J]. *Acta Ecol Sin*, 2014, **34**(15): 4313 – 4323.
- [6] 舒韦维, 卢立华, 李华, 等. 林分密度对杉木人工林林下植被和土壤性质的影响[J]. 生态学报, 2021, **41**(11): 4521 – 4530.  
SHU Weiwei, LU Lihua, LI Hua, *et al.* Effects of stand density on understory vegetation and soil properties of *Cunninghamia lanceolata* plantation [J]. *Acta Ecol Sin*, 2021, **41**(11): 4521 – 4530.
- [7] 朱媛君, 杨晓晖, 时忠杰, 等. 林分因子对张北杨树人工林林下草本层物种多样性的影响[J]. 生态学杂志, 2018, **37**(10): 2869 – 2879.  
ZHU Yuanjun, YANG Xiaohui, SHI Zhongjie, *et al.* The influence of stand factors on species diversity of herb layer in Zhangbei poplar plantations [J]. *Chin J Ecol*, 2018, **37**(10): 2869 – 2879.



- [8] 李梦佳, 何中声, 江蓝, 等. 戴云山物种多样性与系统发育多样性海拔梯度分布格局及驱动因子[J]. 生态学报, 2021, **41**(3): 1148 – 1157.  
LI Mengjia, HE Zhongsheng, JIANG Lan, *et al.* Distribution pattern and driving factors of species diversity and phylogenetic diversity along altitudinal gradient on the south slope of Daiyun Mountain [J]. *Acta Ecol Sin*, 2021, **41**(3): 1148 – 1157.
- [9] 李婷婷, 唐永彬, 周润惠, 等. 云顶山不同人工林林下植物多样性及其与土壤理化性质的关系[J]. 生态学报, 2021, **41**(3): 1168 – 1177.  
LI Tingting, TANG Yongbin, ZHOU Runhui, *et al.* Understory plant diversity and its relationship with soil physicochemical properties in different plantations in Yunding Mountain [J]. *Acta Ecol Sin*, 2021, **41**(3): 1168 – 1177.
- [10] WU Lichao, LIU Jie, TAKASHIMA A, *et al.* Effect of selective logging on stand structure and tree species diversity in a subtropical evergreen broad-leaved forest [J]. *Ann For Sci*, 2013, **70**(5): 535 – 543.
- [11] 黎芳, 潘萍, 宁金魁, 等. 飞播马尾松林林分空间结构对林下植被多样性的影响[J]. 东北林业大学学报, 2016, **44**(11): 31 – 35,40.  
LI Fang, PAN Ping, NING Jinkui, *et al.* Effects of stand spatial structure on understory vegetation diversity of aerial seeding *Pinus massoniana* plantations [J]. *J Northeast For Univ*, 2016, **44**(11): 31 – 35,40.
- [12] HUI Gangying, ZHANG Gangang, ZHAO Zhonghua, *et al.* Methods of forest structure research: a review [J]. *Curr For Rep*, 2019, **5**(3): 142 – 154.
- [13] 曹小玉, 李际平, 赵文菲, 等. 基于结构方程模型分析林分空间结构对草本物种多样性的影响[J]. 生态学报, 2020, **40**(24): 9164 – 9173.  
CAO Xiaoyu, LI Jiping, ZHAO Wenfei, *et al.* Effects of stand spatial structure on herbaceous species diversity in forests based on structural equation modeling [J]. *Acta Ecol Sin*, 2020, **40**(24): 9164 – 9173.
- [14] 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.  
ZHU Guangyu, XU Qigang, LÜ Yong. Effects of stand spatial structure on species diversity of shrubs in *Quercus* spp. natural secondary forests in Hunan Province [J]. *Acta Ecol Sin*, 2018, **38**(15): 5404 – 5412.
- [15] 胡文杰, 潘磊, 雷静品, 等. 三峡库区马尾松 (*Pinus massoniana*) 林分结构特征对灌木层物种多样性的影响[J]. 生态环境学报, 2019, **28**(7): 1332 – 1340.  
HU Wenjie, PAN Lei, LEI Jingpin, *et al.* Effects of forest stand structure characteristics on shrub species diversity in *Pinus massoniana* forest in Three Gorges reservoir area [J]. *Ecol Environ Sci*, 2019, **28**(7): 1332 – 1340.
- [16] 惠刚盈, 李丽, 赵中华, 等. 林木空间分布格局分析方法[J]. 生态学报, 2007, **27**(11): 4717 – 4728.  
HUI Gangying, LI Li, ZHAO Zhonghua, *et al.* The comparison of methods in analysis of the tree spatial distribution pattern [J]. *Acta Ecol Sin*, 2007, **27**(11): 4717 – 4728.
- [17] 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.  
HUI Gangying, HU Yanbo. Measuring in species spatial isolation in mixed forests [J]. *For Res*, 2001, **14**(1): 23 – 27.
- [18] 李际平, 刘素青. 亚热带天然混交林森林生态系统经营的决策模型[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2008, **32**(5): 110 – 114.  
LI Jiping, LIU Suqing. Decision model of forest ecosystem in subtropical nature mixed forest [J]. *J Nanjing For Univ Nat Sci Ed*, 2008, **32**(5): 110 – 114.
- [19] 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(3): 81 – 84.  
LÜ Yong, ZANG Hao, WAN Xianjun, *et al.* Storey structure study of *Cyclobalanopsis myrsinaefolia* mixed stand based on storey index [J]. *For Resour Manage*, 2012(3): 81 – 84.
- [20] 汪平, 贾黎明, 魏松坡, 等. 基于 Voronoi 图的侧柏游憩林空间结构分析[J]. 北京林业大学学报, 2013, **35**(2): 39 – 44.  
WANG Ping, JIA Liming, WEI Songpo, *et al.* Analysis of stand spatial structure of *Platycladus orientalis* recreational forest based on Voronoi diagram method [J]. *J Beijing For Univ*, 2013, **35**(2): 39 – 44.
- [21] HEGYI F. A simulation model for managing jack-pine stands[G]// FRIES J. *Growth Models for Tree and Stand Simulation*. Stockholm: Royal College of Forestry, 1974: 74 – 90.
- [22] 闫东锋, 贺文, 杨喜田. 栓皮栎人工林灌木层植物多样性的空间分布及其与光环境的关系[J]. 应用生态学报, 2020, **31**(11): 3605 – 3613.

- YAN Dongfeng, HE Wen, YANG Xitian. Spatial distribution of plant diversity in shrub layer of *Quercus variabilis* plantation and its relationship with light environment [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2020, **31**(11): 3605 – 3613.
- [23] SINGH M, SINGH M P. Assessment of plant diversity indices of Gomati riparian corridors in District Jaunpur, India[J]. *Ecoprint Int J Ecol*, 2013, **20**: 71 – 76.
- [24] 刘红民,董莉莉,高英旭,等. 辽东山区典型次生林空间结构对草本物种多样性的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2020, **51**(6): 670 – 679.
- LIU Hongmin, DONG Lili, GAO Yingxu, *et al.* Effects of spatial structure on herbaceous diversity of typical secondary forests in Mountainous Area of Eastern Liaoning [J]. *J Shenyang Agric Univ*, 2020, **51**(6): 670 – 679.
- [25] 曹小玉,李际平,委霞. 亚热带典型林分空间结构与林下草本物种多样性的差异特征分析及其关联度[J]. 草业科学, 2019, **36**(10): 2466 – 2475.
- CAO Xiaoyu, LI Jiping, WEI Xia. Analysis of the difference and correlation between the spatial structure and understory herbaceous species diversity of typical subtropical forests [J]. *Pratacul Sci*, 2019, **36**(10): 2466 – 2475.
- [26] PRESCOTT C E. The influence of the forest canopy on nutrient cycling [J]. *Tree Physiol*, 2002, **22**(15/16): 1193 – 1200.
- [27] 邓宏兼,李卫忠,曹铸,等. 基于不同取样尺度的油松针阔混交林物种多样性[J]. 浙江农林大学学报, 2015, **32**(1): 67 – 75.
- DENG Hongjian, LI Weizhong, CAO Zhu, *et al.* Species diversity based on sample size in a *Pinus tabulaeformis* mixed forest [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2015, **32**(1): 67 – 75.
- [28] 董雪婷,张静,张志东,等. 树种相互作用、林分密度和树木大小对华北落叶松生产力的影响[J]. 应用生态学报, 2021, **32**(8): 2722 – 2728.
- DONG Xueting, ZHANG Jing, ZHANG Zhidong, *et al.* Effects of tree species interaction, stand density, and tree size on the productivity of *Larix principis-rupprechtii* [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2021, **32**(8): 2722 – 2728.
- [29] 董莉莉,刘红民,赵济川,等. 林分结构对辽东山区蒙古栎林天然更新的影响[J]. 林业科学研究, 2021, **34**(5): 104 – 110.
- DONG Lili, LIU Hongmin, ZHAO Jichuan, *et al.* Effects of stand structure on natural regeneration of *Quercus mongolica* forest in mountainous area of eastern Liaoning Province [J]. *For Res*, 2021, **34**(5): 104 – 110.
- [30] 康希睿,李晓刚,张涵丹,等. 不同混交措施下杉木人工林群落稳定性特征[J]. 生态学杂志, 2020, **39**(9): 2912 – 2920.
- KANG Xirui, LI Xiaogang, ZHANG Handan, *et al.* Community stability characteristics of *Cunninghamia lanceolata* plantations with different mixing measures [J]. *Chin J Ecol*, 2020, **39**(9): 2912 – 2920.
- [31] 张亚昊,佃袁勇,黄光体,等. 不同演替阶段马尾松林林分空间结构对物种多样性的影响[J]. 生态学杂志, 2021, **40**(8): 2357 – 2365.
- ZHANG Yahao, DIAN Yuanyong, HUANG Guangti, *et al.* Effects of spatial structure on species diversity in *Pinus massoniana* plantation of different succession degress [J]. *Chin J Ecol*, 2021, **40**(8): 2357 – 2365.
- [32] 王媚臻,毕浩杰,金锁,等. 林分密度对云顶山柏木人工林林下物种多样性和土壤理化性质的影响[J]. 生态学报, 2019, **39**(3): 981 – 988.
- WANG Meizhen, BI Haojie, JIN Suo, *et al.* Effects of stand density on understory species diversity and soil physicochemical properties of a *Cupressus funebris* plantation in Yunding Mountain [J]. *Acta Ecol Sin*, 2019, **39**(3): 981 – 988.
- [33] 赵燕波,张丹桔,张健,等. 不同郁闭度马尾松人工林林下植物多样性[J]. 应用与环境生物学报, 2016, **22**(6): 1048 – 1054.
- ZHAO Yanbo, ZHANG Danju, ZHANG Jian, *et al.* Understory vegetation diversity of *Pinus massoniana* plantations with various canopy density [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2016, **22**(6): 1048 – 1054.
- [34] 徐庆华,杨进良,黄练忠,等. 次生常绿阔叶林群落林冠结构对林下植被的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2019, **36**(6): 1151 – 1157.
- XU Qinghua, YANG Jinliang, HUANG Lianzhong, *et al.* Influence of canopy structure on understory vegetation of secondary evergreen broadleaf forest communities [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2019, **36**(6): 1151 – 1157.