

DOI: 10.5846/stxb201709141653

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. 生态学报, 2018, 38(15): - .

Zhu G Y, Xu Q G, Lü Y. Effects of stand spatial structure on species diversity of shrubs in *Quercus* spp. natural secondary forests in Hunan Province. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(15): - .

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

朱光玉, 徐奇刚, 吕 勇*

中南林业科技大学, 长沙 410004

摘要: 林分空间结构会显著影响其林下植被多样性, 为明确其影响灌木物种多样性的关键因子, 以栎类天然次生林为研究对象, 利用 Pearson 简单相关分析、多元线性逐步回归法与典型相关分析探索乔木层空间结构与林下灌木物种多样性的相关关系, 为保护林下植被多样性提供生态经营建议。以混交度、聚集指数和开敞度表达林分空间结构, 以 Margalef 指数、Pielou 指数和 Auclair&Goff 指数作为灌木物种多样性评价指标, 利用 3 种统计分析方法分析两者之间的相关关系, 研究结果表明: (1) Pearson 相关分析结果显示混交度对灌木层 Pielou 指数和 Auclair&Goff 指数影响显著 ($P < 0.05$), 其余指数均不显著; (2) 多元线性逐步回归分析结果显示林下灌木物种多样性受到多个林分空间指标的综合影响, 其中 Pielou 指数受到混交度、聚集指数和开敞度的显著影响, Auclair&Goff 指数受到混交度与开敞度的显著影响; (3) 典型相关分析结果显示, 第一对典型相关变量通过显著性检验, 典型相关系数为 0.5427, 林分空间结构与灌木层多样性指标两组变量在整体上相关性较强, 其中混交度是影响力最大的变量。因此, 欲提高栎类天然次生林下灌木物种多样性, 应选择以调整树种结构为主, 综合考虑林木空间分布格局的调整方案。

关键词: 林分空间结构; 林下灌木; 物种多样性; 典型相关分析

Effects of stand spatial structure on species diversity of shrubs in *Quercus* spp. natural secondary forests in Hunan Province

ZHU Guangyu, XU Qigang, LÜ Yong*

Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China

Abstract: It is noted that forest spatial structure significantly affects the understory species diversity. In the present study, for identifying the spatial structure factors that affect understory shrub species diversity in the *Quercus* secondary forest, Pearson's correlation analysis, step-wise multiple linear regression models, and canonical correlation analysis (CCA) were used to explore the relationships between spatial structure and shrub species diversity. The forest spatial structure was expressed by the mingling index, aggregation index, and opening degree index. Margalef index, Auclair & Goff index, and Pielou's index were used to describe shrub biodiversity. Results showed that: (1) The mingling index had significant influence on the Pielou and Auclair & Goff index of the shrub layer ($P < 0.05$) according to the Pearson's correlation analysis. In contrast, the Margalef index was not significant ($P > 0.05$). (2) Shrub species diversity was influenced by several spatial structure indices at the same time through multiple linear regression analysis. Pielou's index was affected by the mingling index, aggregation index, and opening degree index. The Auclair & Goff index was affected by the mingling index and opening degree index. (3) Given the linear combination of spatial structure indices and understory shrub diversity indices, the canonical correlation coefficient was 0.5427. Especially, the mingling index was the most important variable

基金项目: 国家自然科学基金 (31570631); 国家林业局项目 (1692016-06); 湖南省教育厅项目 (17C1664)

收稿日期: 2017-09-14; **网络出版日期:** 2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: 727065572@qq.com

affecting the shrub species diversity. Therefore, to improve the shrub species diversity of the *Quercus* secondary forests, it is necessary to focus on regulating the forest species structures, and following by forest spatial distributions.

Key Words: stand spatial structure; understory shrub; diversity; canonical correlation analysis

物种多样性是群落功能复杂性和稳定性的重要量度指标,是影响生态系统功能和服务发挥的关键因素之一^[1-3]。林下植被是森林生态系统的重要组成部分,它对改善土壤理化特征、提高水源涵养能力、发展更高级群落等方面具有十分重要的作用^[4-5]。乔木层作为森林生态系统的主体,其林木的空间结构特征将对林分空间异质性产生明显的影响,导致林下植被生长微环境发生变化,从而影响林下植被多样性^[6]。而森林的空间结构是森林经营过程中最有可能调控的因子^[7],因此研究森林空间结构对林下物种多样性的影响具有重要的实践指导意义。

惠刚盈指出森林结构由空间结构和非空间结构组成:林分密度、树种组成、直径分布、树高分布等为森林的非空间结构;林木的点格局及其属性的空间分布即为森林的空间结构^[8]。而现阶段众多学者对林下植被物种多样性的研究大多集中在海拔、土壤、坡度、坡向等环境因子^[9-13]与林分密度、树种组成、年龄结构等非空间结构因子^[14-17],针对林分空间结构对林下植被多样性影响的研究较少。黎芳等以 16 块典型样地为对象,运用单因素方差分析及灰色关联度分析法,分析了兴国县马尾松飞播林林分空间结构对林下植被多样性的影响^[6],灰色关联度分析法可以在很大程度上减少由于信息不对称带来的损失,并且对数据的要求较低,适用于样本容量较少的情况,但它需要对各项指标的最优值进行现行确定,存在一定程度的主观性,且林分结构相对简单,样地分布比较集中立地类型相对简单。对于复杂林分,其林分结构是如何影响林下灌木物种多样性的值得深入研究。

栎类(*Quercus* spp.)是我国亚热带地区天然林的主要林分,第八次全国森林资源清查结果显示,从优势树种来看,栎类林的面积和蓄积分别占全国森林的 10.15%和 8.76%,具有突出的研究价值。栎类是湖南的一种典型森林类型,且以天然次生林为主,其林下植被状况并不乐观,为探索有效提高林下植被物种多样性的途径,本文以湖南栎类次生林典型样地为对象,运用 Pearson 相关系数、多元线性回归分析和典型相关分析法分析林分空间结构对单个及多个物种多样性的影响,全面深入地探索林分空间结构对林下物种多样性的影响机理。为提高林栎类次生林灌木物种多样性森林经营决策提供参考与理论依据。

1 研究区概况

湖南省地处中国中南部,长江中游,108°47′—114°15′E,24°38′—30°08′N,东西宽 667 km,南北长 774 km;土地总面积约为 21.18 万 hm^2 ,其中林地面积 1300 万 hm^2 ,森林覆盖率 59.57%,活立木蓄积 5.05 亿 m^3 ;海拔 24—2099 m,大部分地区海拔高度在 100 m 至 800 m 之间。属大陆性中亚热带季风湿润气候,全省年平均气温为 16—18℃之间,年日照时数为 1300—1800 h,无霜期长达 260—310 d;年平均降水量在 1200—1700 mm 之间,雨量充沛,水热充足。土壤主要以红壤和黄壤为主,其次为紫色土和冲积土。研究区主要植被,乔木为栎类(*Quercus* spp.)、马尾松(*Pinus massoniana*)、樟树(*Cinnamomum camphora*)、鹅耳枥(*Carpinus turczaninowii*)等;灌木为山茶(*Camellia japonica*)、鹿角杜鹃(*Rhododendron latoucheae*)、箬竹(*Indocalamus tessellatus*)、细枝柃(*Eurya loquaiana*)、尖连蕊茶(*Camellia cuspidata*)等。

2 研究方法

2.1 样地设置与调查

采用典型取样法,分别在湖南龙虎山林场、芦头林场、青羊湖林场、八大公山自然保护区栎类天然次生林中设置 49 块 20 m×30 m 的样地。并在每块样地建立起的直角坐标系内,划分为 6 块 10 m×10 m 的乔木小样

方,并按照顺序进行编号,依次为1、2、3、4、5、6。对小样方内胸径大于5 cm的乔木进行每木检尺,逐株测量其胸径、树高、冠幅、坐标等因子。在样地的4个角上设置4块2 m×2 m灌木小样方和4块1 m×1 m草本小样方,对角线交点处设置1块灌木小样方和1块草本小样方,共计5块灌木小样方和5块草本小样方,调查记录植被的种类、数量、盖度等因子。样地基本情况调查因子包括样地的经纬度、海拔、坡位、坡度、坡向、土壤类型、凋落物厚度、腐殖质厚度、群落类型、林分起源、郁闭度和林龄等。部分样地调查情况如表1所示:

表1 样地的基本情况
Table 1 Basic information of the sampling plots

样地编号 Sample Plot No.	海拔 Altitude/m	坡度 Slope/(°)	坡向 Aspect/(°)	郁闭度 Canopy	林分年龄 Age	密度 Density/ (株/hm ²)	平均胸径 Average diameter/cm	平均高 Average height/m
1	983m	20°	西北坡	0.83	57	1198	19.84	12.23
2	945m	17°	东坡	0.875	24	2388	14.16	11.49
3	1000m	22°	东坡	0.83	52	2229	14.07	11.15
4	1602m	39°	西南坡	0.88	36	1433	21.48	16.18
...	...	...	...	...	...	...	...	...
46	98m	11°	西南	0.86	25	4118	9.27	11.80
47	160m	33°	西南	0.75	46	722	20.50	16.46
48	80m	35°	西	0.625	21	1106	13.56	12.96
49	200m	31°	西	0.75	21	1160	16.12	13.19

2.2 林分空间结构指数的计算

本文采用聚集指数、混交度和开敞度作为表达林分空间结构的参数^[18]。由于在计算林分平均大小比数时,林分中的每一株林木既被选择作为参照树,同时也作为其他林木的相邻木,它不能反映出林分整体的空间优势程度^[19],因此本文并未选择大小比数来表达林分空间结构。同时为避免边缘效应对林分结构的影响,设置5 m缓冲区。本研究空间结构单元数*n*取4。

聚集指数*R*用以描述林木空间分布格局,即最近邻单株聚集的平均值与随机分布下的期望平均距离之比,其公式为:

$$R = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N r_i}{\frac{1}{2} \sqrt{\frac{F}{N}}} \tag{1}$$

式中,*r_i*为第*i*株林木与其最近邻木之间的距离,*N*为样地林木株数,*F*为样地面积^[20]。

混交度*M*是表达树种空间隔离程度的指数。其被定义为在与参照树组成空间结构单元的相邻木中与参照树属于不同树种的林木所占的比例。

$$M_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n V_{ij} \tag{2}$$

式中,当参照树与相邻木非同种时,*V_{ij}* = 1,反之=0^[21]。

开敞度*B_i*:被定义为参照木*i*到最近4株相邻上层林木的水平距离与该株上层林木高度的比值之和。

$$B_i = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 \frac{D_{ij}}{H_{ij}} \tag{3}$$

式中:*D_{ij}*为参照树*i*到第*j*株相邻木的距离,*H_{ij}*为第*j*株相邻木的高度^[22]。

2.3 林下灌木物种多样性的计算

量化物种多样性的指数有很多,计算方法与表达的意义也各有不同。本研究选取以下常用的物种多样性指标^[23-25]:

丰富度指数采用 Margalef 指数:

$$D_M = (S-1)/\ln N \quad (4)$$

多样性指数采用 Auclair&Goff 指数:

$$D_{AG} = \sqrt{\sum P_i^2} \quad (5)$$

均匀度指数采用 Pielou 指数:

$$J_{si} = \frac{1 - \sum_{i=1}^S P_i^2}{1 - \frac{1}{S}} \quad (6)$$

式中: S 为群落中物种的数目。 N_i 为物种 i 的重要值, N 为样地内物种重要值的总和。 P_i 为相对重要值, $P_i = \frac{N_i}{N}$ 。

灌木层的物种多样性的重要值公式如下:

重要值 $N_i = [\text{相对多度} + \text{相对盖度} + \text{相对频度}] \times 100/3$ 。

2.4 林分空间结构与林下物种多样性相关关系分析

本研究利用 Winkelmass 与 Excel 2016 分析工具, 计算固定样地林分空间结构指数与物种多样性指数, 并基于此, 利用 R 3.4.0 分析林分空间结构与林下植被多样性的相关关系。

(1) Pearson 相关系数

采用 Pearson 相关系数判断林分空间结构指标与物种多样性指标之间的单因素相关性。计算公式:

$$r = \frac{\sum (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x - \bar{x})^2 \sum (y - \bar{y})^2}} \quad (7)$$

(2) 多元线性回归分析法

由于林下物种多样性可能会受到林分空间结构各个指标的综合作用, 因此, 本研究采用多元逐步回归法筛选出对物种多样性影响最大的关键指标, 分别以每个灌木物种多样性指标为因变量, 林分空间结构指标为自变量进行线性逐步回归, 利用回归统计效果检验指标 (AIC, P, R^2) 选择最优模型, 不仅可以揭示多个自变量对因变量的影响, 还可以用回归方程进行预测和控制^[26]。

(3) 典型相关分析

为探究空间结构指标和林下灌木多样性指标两组变量整体之间的相关性, 在本文研究中, 使用典型相关分析 (Canonical Correlation Analysis) 构建综合指标, 提取相关性最大的线性组合并得到相应的典型相关系数, 以此来判断两组变量之间的相关性^[26]。选取两组变量, 一组变量为混交度 M 、聚集指数 R 和开敞度 B , 代表林分空间结构的各个方面, 一组变量为 Margalef 指数、Pielou 指数和 Auclair&Goff 指数代表林下灌木物种多样性的各个方面。在此基础上, 利用主成份分析的思想, 分别在两组变量中选取若干有代表性的综合变量 u_i 和 v_i , 使每一个综合变量都是原变量的线性组合, 即:

$$\begin{cases} u_i = a_{i1}M - a_{i2}R - a_{i3}B \\ v_i = b_{i1}Margalef + b_{i2}Pielou + b_{i3}Auclair \end{cases} \quad (8)$$

在线性组合 u_i 和 v_i 的方差为 1 的约束条件下, 使它们的相关系数 λ 达到最大。据此求出典型载荷 a_{ij} 和 b_{ij} , 并得到典型相关变量 u_i 和 v_i 及其相关系数 λ , 进而揭示两组变量之间的关系

本研究的典型变量相关系数 λ 的显著性检验为 Bartlett² 检验:

检验假设 $H_0: \lambda r = 0$

检验第 r 个典型相关系数的显著性时, 作统计量:

$$Q_r = - \left[n - r - \frac{1}{2}(p + q + 1) \right] \ln_r - {}^2 [(p - r + 1) (q - r + 1)] \tag{9}$$

其中 $\Lambda_r = \prod_{i=r}^p (1 - \frac{2}{i})$

Q_r 近似服从 χ^2 分布,自由度为 $(p-r+1)(q-r+1)$, p 与 q 分别代表两组变量的变量个数。若在给定的显著性水平 α 下, Q 大于等于临界值,则拒绝原假设 H_0 ,至少可以认为第 r 对典型变量具有相关性,相关系数为 λ_r ,且为显著^[27]。

3 结果与分析

3.1 各项指标的计算结果与分异特征

由 49 块样地的林分空间结构指标与林下灌木物种多样性指标统计信息可以看出,湖南栎类天然次生林各个样地间混交度、开敞度和林下灌木丰富度的变化较大,变异系数 CV 分别为 40.82%、30.2%和 46.42% (表 2)。

表 2 49 块样地林分空间结构与林下物种多样性指数的统计信息
Table 2 Shrub diversity and forest spatial structure statistics of 49 sampling plots

各项指标 Index	平均值(变化范围) Mean (range)	标准偏差 standard deviation	变异系数 coefficients of variation/%
林木混交度 M Mingling index	0.5202(0.1032—0.8875)	0.2123	40.818
聚集指数 R Aggregation index	0.8739(0.6446—1.0631)	0.1008	11.536
开敞度 B Opening degree index	0.2414(0.0947—0.4508)	0.0729	30.208
Margalef	0.8429(0.3001—1.8204)	0.3912	46.423
Pielou	0.9722(0.4975—1.8744)	0.3084	31.724
Auclair&Goff	0.6751(0.3553—0.8667)	0.1428	21.154

3.2 林分空间结构与灌木物种多样性的单因子相关分析

对典型样地计算所得的空间结构指数(混交度、聚集指数、开敞度)和林下灌木的物种多样性指数的计算结果进行 Pearson 相关性检验,所得结果如下:

表 3 空间结构指数-林下灌木多样性的 Pearson 相关系数
Table 3 Pearson correlation coefficients of forest special structure and Shrub diversity

空间结构指标 Forest spatial index	Margalef	P	Pielou	P	Auclair&Goff	P
林木混交度 M Mingling index	0.2174	0.8330	0.3041 *	0.0336 *	-0.4347 *	0.0018 *
聚集指数 R Aggregation index	-0.0167	0.9203	0.0939	0.5209	-0.0011	0.9941
开敞度 B Opening degree index	0.0309	0.8330	-0.1521	0.2969	0.1782	0.2372

* :在 0.05 水平上显著相关;** 在 0.01 水平上显著相关

表 3 结果显示,Margalef 指数与 3 个空间结构指标无显著相关关系。Pielou 指数与混交度呈显著相关($P<0.05$),相关系数为 0.3041,与其余指标无显著相关关系。Auclair&Goff 指数也只与混交度呈显著相关,相关系数为-0.4347,与其余指标无显著关系。由于 Auclair&Goff 多样性指数是一个逆向指标,因此,林下灌木的多样性与混交度是正相关,会随着林分混交度的提高而提高。

3.3 多元逐步回归分析结果

由于林分空间结构各个指标会综合作用于林下灌木物种多样性,因此在单因素分析的基础上,以灌木物种多样性指标为因变量,林分空间结构指标为自变量,采用多元线性逐步回归法建立逐步回归方程,筛选出影响林下灌木物种多样性的关键指标。如表 4 所示,多元线性逐步回归结果如下:(1) Margalef 指数的多元逐步

回归方程拟合效果不佳,无法通过显著性检验。(2)Pielou 指数的回归方程通过显著性检验($P<0.05$),模型选择了混交度,聚集指数和开敞度加入方程,说明其主要受到乔木层树种空间隔离程度,林木分布格局和林下光照条件的影响。(3)在 Auclair&Goff 指数方面,选择了混交度,开敞度加入回归方程。2 个指数都选择了多个空间结构指数作为主要影响因子且都受到混交度的影响。2 个回归模型的决定系数 R^2 均不高,分别为 0.1631 和 0.2328,说明被筛选进入方程的林分空间结构仅能解释灌木物种多样性的部分变异,物种多样性指数会受到除林分空间结构外其他因素的影响。

表 4 灌木物种多样性多元逐步回归方程

Table 4 The optimal multiple linear regression models with stepwise of shrub diversity and forest spatial structure

物种多样性 Species diversity	逐步回归方程 Multiple linear regression models with step-wise	P	R^2	AIC
Margalef	不显著	—	—	—
Pielou	$Pielou = 0.4842M + 0.6665R - 1.1485B + 0.4152$	0.04397	0.1631	-117
Auclair&Goff	$Auclair = -0.30425M + 0.41125B + 0.73417$	0.00226	0.2328	-198.71

3.4 林分空间结构与灌木物种多样性的典型相关分析

典型相关分析能够将林分空间结构和物种多样性单一指标之间的联系扩展到两组变量之间的相互依赖关系,为探究两组变量整体上的相关性,运用 R 3.4.0 对林分空间结构与灌木物种多样性的典型相关分析结果如下:

由表 5 可知,经检验,在 $\alpha=0.05$ 的水平上,第一组典型变量通过了典型相关系数检验,且其典型相关系数为 0.5427,说明林分空间结构指标与林下灌木物种多样性指标在整体上具有较高的相关性。

从表 6 可得出第一对典型变量的线性组合是:

$$\begin{cases} u_1 = -0.1378M + 0.0003R + 0.0557B \\ v_1 = 0.0255Margalef + 0.1659Pielou + 0.2840Auclair \end{cases}$$

在第一对典型变量 u_1 , v_1 中, u_1 为栎类天然林林分空间结构指标的线性组合,其中混交度 M 、开敞度 B 的载荷较大,分别为 -0.1378, 0.0557, 说明在对林下灌木物种多样性的影响力上,乔木层林木的混交程度和林分透光度占主导地位。 v_1 是林下灌木物种多样性指标的线性组合,其中具有较大载荷的变量是 Pielou 指数和 Auclair&Goff 指数,说明林下灌木的多样性指数与均匀度指数对乔木层林分空间结构指数较为敏感。将原始数据带入第一对典型变量中,可得到典型变量 u_1 、 v_1 的得分,根据每一块样地的得分值画出得分散点图。

由图 1 可得, u_1 和 v_1 的得分散点近乎分布于一条直线上,两者之间呈现较明显的线性关系,这说明典型相关分析能够较好地说明林分空间结构和林下灌木多样性之间的相关关系,林分空间结构指标与林下灌木物种多样性指标在整体上的相关性显著。

4 结论与讨论

4.1 讨论

研究结果显示栎类天然次生林的混交度是影响其林下灌木物种多样性的主要因素。如图 2 所示,混交度

表 5 典型相关系数及其检验

Table 5 The canonical correlation coefficients and its statistical tests

组号 Group number	典型相关系数 Canonical correlation coefficient	P
1	0.5427	0.0264
2	0.2677	0.5166
3	0.0194	0.8991

表 6 三对典型相关变量的载荷

Table 6 The loads of three canonical correlation variables

林分空间结构变量的典型载荷 The loads of forestry special structure variables			
	第 1 组	第 2 组	第 3 组
林木混交度 M Mingling index	-0.1378	0.0003	0.0457
聚集指数 R Aggregation index	0.0003	-0.1547	0.0384
开敞度 B Opening degree index	0.0557	0.0982	0.1133
灌木物种多样性的典型载荷 The loads of shrub diversity variables			
Margalef	0.0255	-0.0032	0.1460
Pielou	0.1659	-0.3266	-0.0290
Auclair&Goff	0.2840	-0.2368	0.0276

与 Pielou 指数、Auclair&Goff 指数都呈现明显的线性关系,随着混交度的增大, Pielou 指数相应增大, Auclair&Goff 指数相应减小,说明林分乔木层的混交程度越大,其林下灌木的物种均匀度与多样性程度都会随之增大(Auclair&Goff 指数是一个逆向指标),这与黎芳等^[6]的研究结果一致,可能是由于在混交林中,林分混交度的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,为林下灌木的生长释放了营养空间。多元线性逐步回归结果与典型相关分析结果显示聚集指数也是影响林下灌木物种多样性的关键指标,上层林木的空间格局分布的不同会影响其枯落物与林下光斑位置,导致林下灌木均匀度也随之改变,聚集指数越大表明林木分布越均匀,相应地,其林下灌木的均匀度指数也就越高。研究结果也显示开敞度作为表达林下光照条件的指标,开敞度越大,林下光照条件越好,但其林下灌木的均匀度与多样性却反而相

应减小了,这可能是由于在调查的样地中,开敞度高的样地,其乔木层林木的树高均不高,而树高是表现样地立地条件优劣的关键因子,也就意味着相应样地的立地因子如:海拔、坡向、土壤厚度、枯枝落叶厚度等可能并不有利于其林下灌木的生长。同时,2 个多元线性回归模型的决定系数 R^2 均不高,这也表明了林分空间结构指标只能解释其林下灌木物种多样性的部分变异,其他影响因子如林分非空间结构以及生境因子对林下灌木的生长也起着至关重要的作用。因此在以后的研究中,可以综合考虑环境因子,林分空间结构与非空间结构因子,选择更加显著的特征来提高模型的拟合效果,以期更深入地认清影响林下物种多样性的关键因子。

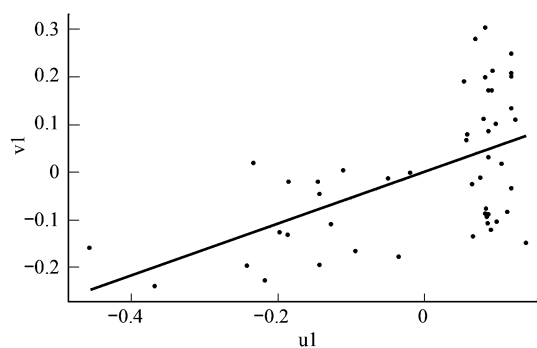


图 1 空间结构与林下灌木多样性典型相关得分图

Fig.1 The score of canonical correlation between spatial structure and shrub diversity

u1: 林分空间结构指标线性组合得分值 The score of linear combination of spatial structure indices ;v1 林下灌木物种多样性指标线性组合得分值 The score of linear combination of understory shrub diversity indices

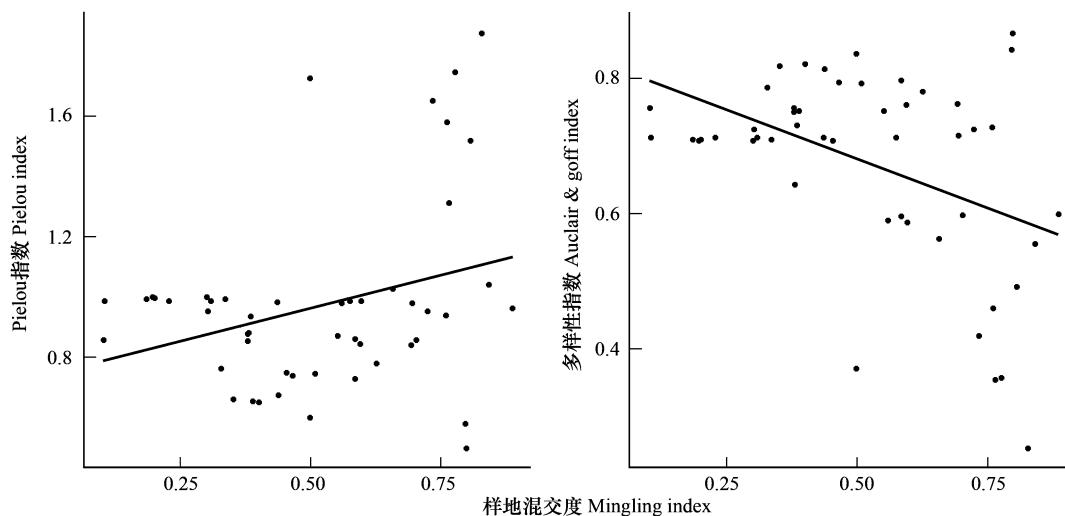


图 2 混交度对林下灌木物种多样性的影响

Fig.2 Effects of Mingling Index on Shrub diversity

研究表明, Pearson 相关分析,多元线性逐步回归分析和典型相关分析能够全面直观地表现出林分空间结构指标与林下灌木物种多样性之间的单因素相关性以及在整体上的综合影响,但 3 种统计方法均建立在变量之间为线性关系的假设上,尚未探究变量之间的非线性关系,若试图更深层次地探究林分空间结构与林下植被物种多样性之间的相关性,可以尝试建立非线性回归模型或选择机器学习算法进行进一步的研究。另外,在典型相关分析中,如若变量个数与样本含量比例不合适,变量个数比例偏大,样本容量不够,必然会影响典

型相关系数的显著性,因此如果选择典型相关分析来研究林分结构与林下物种多样性之间的相关性,解释变量的数量受到了限制并且研究的外业调查成本将成为难以回避的问题。

4.2 结论

对于栎类次生林而言,乔木层林分空间结构中的混交程度和林木分布状况是影响林下灌木物种多样性的主要因子,其中混交度的影响最大;乔木层林木混交程度越高,其林下灌木物种的均匀度指数与多样性指数越大;乔木层林木分布状况越均匀,其林下灌木的均匀度指数越高。因此,欲提高栎类天然次生林下灌木物种多样性,应选择以调整树种结构为主,综合考虑林木空间分布格局的调整方案。

参考文献(References):

- [1] 雷相东, 张会儒, 李冬兰, 梁毓照. 东北过伐林区四种森林类型的物种多样性比较研究. 生态学杂志, 2003, 22(5): 47-50.
- [2] 郝建锋, 王德艺, 李艳, 姚小兰, 张逸博, 詹美春, 齐锦秋. 人为干扰对川西金凤山楠木次生林群落结构和物种多样性的影响. 生态学报, 2014, 34(23): 6930-6942.
- [3] 马克平. 生物多样性与生态系统功能的实验研究. 生物多样性, 2013, 21(3): 247-248.
- [4] 何艺玲, 傅懋毅. 人工林林下植被的研究现状. 林业科学研究, 2002, 15(6): 727-733.
- [5] 褚建民, 卢琦, 崔向慧, 王利兵. 人工林林下植被多样性研究进展. 世界林业研究, 2007, 20(3): 9-13.
- [6] 黎芳, 潘萍, 宁金魁, 赖国桢, 欧阳勋志, 徐辉, 郭丽玲, 吴自荣, 易祖滨. 飞播马尾松林林分空间结构对林下植被多样性的影响. 东北林业大学学报, 2016, 44(11): 31-35, 40-40.
- [7] 张会儒, 唐守正, 雷相东. 东北天然林可持续经营技术研究. 北京: 中国林业出版社, 2011.
- [8] 惠刚盈. 基于相邻木关系的林分空间结构参数应用研究. 北京林业大学学报, 2013, 35(4): 1-8.
- [9] 马克平, 黄建辉, 于顺利, 陈灵芝. 北京东灵山地区植物群落多样性的研究 II 丰富度、均匀度和物种多样性指数. 生态学报, 1995, 15(3): 268-277.
- [10] 常学礼, 邹建国. 科尔沁沙地沙漠化过程中的物种多样性. 应用生态学报, 1997, 8(2): 151-156.
- [11] 唐志尧, 方精云. 植物物种多样性的垂直分布格局. 生物多样性, 2004, 12(1): 20-28.
- [12] 贺金生, 陈伟烈. 陆地植物群落物种多样性的梯度变化特征. 生态学报, 1997, 17(1): 91-99.
- [13] 黄建辉, 高贤明, 马克平, 陈灵芝. 地带性森林群落物种多样性的比较研究. 生态学报, 1997, 17(6): 611-618.
- [14] 成向荣, 徐金良, 刘佳, 虞木奎. 间伐对杉木人工林林下植被多样性及其营养元素现存量影响. 生态环境学报, 2014, 23(1): 30-34.
- [15] 代青格乐, 赵国平, 王新星, 邓继峰, 丁国栋, 赵媛媛, 毛振华. 林分密度对毛乌素沙地樟子松人工林林分结构和林下植被的影响. 水土保持通报, 2015, 35(6): 86-91.
- [16] 王辉, 贺康宁, 胡兴波, 王伟伟, 王晓, 李杨. 高寒区不同树种配置对林下植被物种多样性的影响. 水土保持研究, 2012, 19(3): 147-150.
- [17] 王飞, 张秋良, 马秀枝, 郭旭. 不同发育阶段兴安落叶松林下植被多样性特征. 沈阳农业大学学报, 2013, 44(6): 771-775.
- [18] 汤孟平. 森林空间结构研究现状与发展趋势. 林业科学, 2010, 46(1): 117-122.
- [19] 赵中华, 惠刚盈, 胡艳波, 李远发, 王宏翔. 基于大小比数的林分空间优势度表达方法及其应用. 北京林业大学学报, 2014, 36(1): 78-82.
- [20] Clark P J, Evans F C. Distance to nearest neighbor as a measure of spatial relationships in populations. Ecology, 1954, 35(4): 445-453.
- [21] Von Gadow K, Bredenkamp B. Forest Management. Pretoria: Academica, 1992.
- [22] 沈海龙, 丛健, 张鹏, 张群, 范少辉, 杨文化, 刘世荣. 开敞度调控对次生林林冠下红松径高生长量和地上生物量的影响. 应用生态学报, 2011, 22(11): 2781-2791.
- [23] DeJong T M. A comparison of three diversity indices based on their components of richness and evenness. Oikos, 1975, 26(2): 222-227.
- [24] Auclair A N, Goff F G. Diversity relations of upland forests in the western Great Lakes area. The American Naturalist, 1971, 105(946): 499-528.
- [25] Peet R K. The measurement of species diversity. Annual Review of Ecology and Systematics, 1974, 5: 285-307.
- [26] 王斌会. 多元统计分析及R语言建模. 广州: 暨南大学出版社, 2016: 65-66.
- [27] 傅德印, 黄健. 典型相关分析中的统计检验问题. 统计研究, 2008, 25(7): 110-112.