

网络出版时间:2015-05-11 15:03

DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2015.06.009

网络出版地址:http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20150511.1503.009.html

黄龙山林区松栎混交林主要树种空间分布格局及其关联性

谈多多¹,李卫忠¹,王 庆¹,王广儒²

(1 西北农林科技大学 林学院,陕西 杨凌 712100;2 黄龙山林业局,陕西 黄龙 715700)

【摘要】【目的】研究黄龙山林区松栎混交林的树种组成及其胸径、树高分布特点,探究主要树种的空间分布格局及其关联性,为相关林区的可持续经营提供参考。【方法】2013-08,在陕西延安黄龙山林区选取典型的松栎混交林建立 100 m×100 m 的标准地,调查标准地内树木的坐标、树高、胸径等因子,划分径级和树高级,计算重要值;应用 $L(r)$ 函数分析该林分主要树种在不同尺度下的分布格局,应用 $L_{12}(r)$ 函数分析不同树种在空间上的关联性;最后利用方差比率法计算总体联结系数,以此分析标准地内主要树种的总体关联性。【结果】标准地内胸径大于 1 cm 的树种有 21 种,物种丰富,树木密度较大;重要值位于前 4 位的油松、辽东栎、白桦和茶条槭为主要树种;林分胸径分布为倒“J”形曲线,树高分布呈近似正态分布曲线;油松、辽东栎和白桦在 0~50 m 尺度上呈集群分布,茶条槭在 31~50 m 尺度上有随机分布的趋势;油松与辽东栎、油松与白桦、辽东栎与白桦在 0~50 m 研究尺度上为不显著的正相关,茶条槭与其他主要树种在大部分研究尺度上呈现出显著的负相关;研究区内主要树种的总体联结系数为 1.01,表明该林区树种总体上表现为弱的正相关。【结论】在保持林分结构稳定的基础上,在黄龙山林区松栎混交林内可采取一些抚育措施,使森林更好地发挥其生态作用。

【关键词】 黄龙山;松栎混交林;空间分布格局;点格局分析;种间关联性

【中图分类号】 S718.5

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2015)06-0113-08

Spatial distribution pattern and association of main tree species in mingled forest of *Pinus tabulaeformis* + *Quercus liaotungensis* in Huanglong Mountain

TAN Duo-duo¹, LI Wei-zhong¹, WANG Qing¹, WANG Guang-ru²

(1 College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2 Forestry Bureau of Huanglong, Huanglong, Shaanxi 715700, China)

Abstract: 【Objective】Composition, diameter and height distribution characteristics of main species in mingled forest of *Pinus tabulaeformis* + *Quercus liaotungensis* were investigated and the spatial distribution pattern and association were analyzed to provide reference for the sustainable management of related forests. 【Method】In August 2013, a typical *Pinus tabulaeformis* + *Quercus liaotungensis* sample plot (100 m×100 m) was selected in Huanglong Mountain, Yan'an, Shaanxi. The coordinates, height, diameter at breast height and other factors of trees were measured, diameter and height classes were classified and the important values were computed. $L_{12}(r)$ function proposed by Lotwiche and Silverman was used to analyze the

【收稿日期】 2014-07-03

【基金项目】 国家自然科学基金项目“黄土高原水土保持林可持续经营基础研究”(31170587)

【作者简介】 谈多多(1990—),男,甘肃平凉人,在读硕士,主要从事森林可持续经营与评价研究。E-mail: tanduoduo123@163.com

【通信作者】 李卫忠(1964—),男,陕西蒲城人,副教授,硕士生导师,主要从事森林可持续经营与评价及 3S 技术在资源环境中的应用研究。E-mail: Wzhli6465@163.com

spatial associations between tree species and the overall correlation coefficient was calculated to study the overall relevance in the sample plot using variance ratio method.【Result】There were 21 tree species with diameter at breast height (DBH) of greater than 1 cm, indicating abundant species and a high tree density. *P. tabuli formis*, *Q. liaotungensis*, *Betula platyphylla* and *Acer ginnala* were classified as the main tree species with top 4 important values. Tree diameter distributed as inverse “J” curve, while the tree height distributed approximately as normal curve. *P. tabuli formis*, *Q. liaotungensis* and *B. platyphylla* all presented as cluster distribution at the scale of 0—50 m, while *A. ginnala* was randomly distributed at the scale of 31—50 m. *P. tabuli formis* and *Q. liaotungensis*, *P. tabuli formis* and *B. platyphylla*, and *Q. liaotungensis* and *B. platyphylla* had insignificant positive correlation at the scale of 0—50 m while *A. ginnala* showed insignificant negative associations with others at most scales. The overall correlation coefficient was 1.01, indicating that the tree species presented an overall weak positive association.【Conclusion】On the basis of keeping a stable stand structure, some management practices can be taken to make a better use of its ecological function.

Key words: Huanglong Mountain; *Pinus tabuli formis* + *Quercus liaotungensis* forest; spatial distribution pattern; point pattern analysis; interspecific association

森林的空间结构,表示林分中树木及其属性在空间的分布,可以反映森林群落内树种的分布情况与空间关系,是在森林的初始格局、气候、光照、微环境、竞争植物等历史和环境综合作用下形成的^[1-3]。因此,研究森林群落优势种的空间结构,对了解林区内群落的演替规律和稳定性、解释森林群落的形成与分布以及不同种群的生长更新与生命特征具有十分重要的意义^[4-5]。空间分布格局是空间结构的重要组成部分^[6],树种的空间分布格局指其在空间分布的规律性,通常可分为随机分布、均匀分布与集群分布 3 种类型^[7]。

松栎混交林是陕西省黄龙山林区典型的地带性植被之一,现存的松栎混交林是在建国后经过多次人为采伐和破坏之后,历经三四十年的恢复而形成的^[8]。黄龙山林区是陕西省五大林区之一,很多学者曾对其森林群落内不同树种的生长规律、动态变化、结构特征等进行了研究,但是利用点格局的方法对黄龙山松栎混交林的空间格局进行研究的报道很少。传统的空间格局分析法仅能在单一尺度下进行,但实际上某树种的分布格局以及不同树种之间的关联性会随着尺度的变化而变化,点格局分析法则克服了传统分析法的不足,能够分析各种尺度下种群的分布格局与不同种群之间的关系^[9-10]。本研究采用点格局空间分析方法,对黄龙山林区松栎混交林内优势树种的空间分布及关联性进行了详细分析,得出了各种种群的空间分布及不同种群间关联性随尺度变化的规律,可为该林区科学经营与管理提供依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

黄龙山林区位于陕西省北部延安市黄土高原东南部,地处黄土高原沟壑区和丘陵沟壑区交错地带的陕西省黄龙县,东临黄河,南北长 60 km,东西宽 50 km,林区各类土地面积 194 174 hm²,其中林地面积占土地总面积的 99.8%。气候属半湿润暖温带大陆性气候类型,四季分明,雨热同季。年平均气温 8.6℃,无霜期 175 d,年日照时数 2 370 h,年平均降水量 611.8 mm,研究区内的海拔高度 1 100~1 300 m,森林植被主要是暖温带落叶阔叶林^[11],主要树种有辽东栎(*Quercus liaotungensis*)、油松(*Pinus tabuli formis*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、白桦(*Betula platyphylla*)、山桃(*Amygdalus davidiana*)等,土壤以褐土为主。黄龙山林区是典型的天然次生林区和水土保持防护林区,具有重要的生态地位,是庇护陕西南部 and 渭北旱塬农牧业生产的一道天然屏障,被誉为“黄土高原一颗绿色明珠”和陕西的“一叶肺”^[12]。

1.2 研究方法

1.2.1 标准地的建立 2013-08 在林区内选择具有代表性的林地建立 100 m×100 m 的标准地,该标准地内油松和辽东栎相对密度之和超过 50%,是以幼中龄林为主的天然次生林,乔木层平均林木年龄达 30 年,郁闭度 0.80 左右,现在属于天然林保护区。样地中心位置 35°31′37″N, 109°57′06″E,海拔 1 211 m,坡度 21°,坡向北偏东 10°,中下坡。将标准

地按 20 m 的间距划分为 25 个 20 m×20 m 的调查单元,对每一个调查单元进行编号,并以每个调查单元的左下角作为坐标原点,观测每个调查单元中胸径≥1 cm 的树木的坐标、树高、胸径、冠幅等调查因子。最后将坐标换算成在整个标准地的坐标,标准地内树木的分布如图 1 所示。

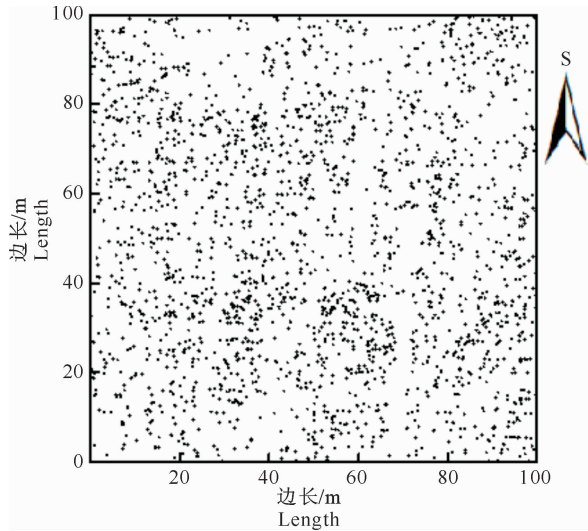


图 1 黄龙山林区松栎混交林标准地内所有树木的分布点图

Fig. 1 Distribution of all trees in the sample plot in the *Pinus tabulaeformis* + *Quercus liaotungensis* forest in Huanglong Mountain

1.2.2 标准地内树木胸径和树高的分布 对标准地内所有调查树木进行胸径和树高分布的分析。胸径(DBH)划分^[13]以 4 cm 为径阶距:2.0 cm<DBH≤5.9 cm 为 4 径阶,6.0 cm<DBH≤9.9 cm 为 8 径阶,依此类推;由于胸径小于 2 cm 的树木很少,故将其均归入 4 径阶。树高(H)级的划分^[14]以 1 m 为一个高度级:1.0 m<H≤2.0 m 为树高级 1,2.0 m<H≤3.0 m 为树高级 2,依此类推。

1.2.3 树种重要值等参数的计算 相对密度(相对多度)=某树种的个体数/全部树种的个体数×100%;相对频度=某树种的频度值/全部树种的频度值×100%;相对显著度=某树种的胸高断面积/全部树种的胸高断面积×100%;重要值=(相对密度+相对频度+相对显著度)/3^[15]。

1.2.4 树种的空间格局与空间关系分析 将植物个体视为二维空间的点,以其坐标为基本的分析数据构成树种分布图,便可进行点格局分析。应用 Ripley 的 $L(r)$ 函数^[16]分析树种的分布,该函数能分析不同尺度下种群的分布格局,方差稳定,同时用权重系数消除边缘效应,是目前应用比较广泛的分析

空间格局的方法^[17]。在 Ripley 的研究基础上, Lotwiche 和 Silverman^[18]提出了新的 $L_{12}(r)$ 函数进行多元点格局分析,可以用来阐释 2 个不同种群在各尺度上的相互关联性。利用 Monte-Carlo 拟合检验计算上、下包迹线,本研究将空间尺度定为 50 m (样地边长的一半),置信水平设置为 99%,检验次数为 10 000 次。当 $L(r)$ 小于下包迹线时,种群为均匀分布,在上、下包迹线之间时为随机分布,大于上包迹线时为集群分布。

1.2.5 树种间的总体关联性 对整个研究样地内树种的总体关联性通过计算总体联结系数 VR 来进一步分析。应用 Schluter 的方差比率法^[19-20]计算 VR,公式如下:

$$VR = S_T^2 / \sigma_T^2$$
$$S_T^2 = \frac{\sum_{j=1}^n (T_j - t)^2}{N}, t = (T_1 + T_2 + \dots + T_n) / N;$$
$$\sigma_T^2 = \sum_{i=1}^S P_i (1 - P_i), P_i = n_i / N.$$

式中: T_j 是 j 样方内出现的树种数, t 是样方树种的平均值, N 为样地内样方总数(25), n_i 是某树种 i 出现的样方数, S 是总树种数。利用上式可以计算出总体联结系数 VR,原假设为所有树种相互独立,对应 VR 的期望值为 1,当 $VR < 1$ 时表示种间为负相关(或负联结),当 $VR > 1$ 时表示种间为正相关(或正联结)。应用 W 统计量($W = VR \cdot N$)来检验 VR 值偏离 1 的显著性,当 W 满足 $\chi_{0.05,N}^2 < W < \chi_{0.95,N}^2$ 时,表示 W 以 90% 的概率落入给定的区间,则接受原假设,即种间关联不显著。

1.2.6 数据处理 采用 Excel 2007、Origin 8.0 和 ADE-4 软件来计算相关数据并作图。

2 结果与分析

2.1 松栎混交林群落的树种组成

陕西省黄龙山林区研究样地的树种组成情况见表 1。由表 1 可以看出,样地内共有 21 个树种,平均胸径 9.9 cm,物种丰富。重要值位于前 4 的树种是油松、辽东栎、白桦和茶条槭。这 4 个树种的重要值之和为 73.53%,相对密度之和为 84.80%,相对显著度之和则达到了 90.14%。21 个树种中针叶树种只有油松,其相对密度为 33.04%,其余的阔叶树为 66.96%,针阔叶树的株数比约为 3.3 : 6.7,胸高断面积之比约为 3.1 : 6.9。林分中的阔叶树种主要是辽东栎和白桦,二者的重要值之和达到了 40.15%。

表 1 黄龙山林区松栎混交林标准地内树种的组成特征

Table 1 Composition of tree species in the sample plot in *Pinus tabuli formis* + *Quercus liaotungensis* forest in Huanglong Mountain

树种 Species	株数/ (株·hm ⁻²) Number	胸径/cm DBH		胸高断面面积/ (×10 ⁻² m ² · hm ⁻²) Basal area at breast height	相对 密度/% Relative density	相对 频度/% Relative frequency	相对 显著度/% Relative significant degree	重要值/% Important value
		平均值 Average	标准差 SD					
油松 <i>Pinus tabuli formis</i>	815	9.8	5.2	791.33	33.04	11.42	31.02	25.16
辽东栎 <i>Quercus liaotungensis</i>	551	10.2	7.5	695.13	22.33	11.42	27.25	20.33
白桦 <i>Betula platyphylla</i>	492	12.6	5.1	717.29	19.94	11.42	28.11	19.82
茶条槭 <i>Acer ginnala</i>	234	6.4	3.3	96.00	9.49	11.42	3.76	8.22
野山楂 <i>Crataegus cuneata</i>	88	6.5	3.2	36.25	3.57	10.96	1.42	5.32
漆树 <i>Toxicodendron vernici fluum</i>	76	7.5	4.1	43.84	3.08	8.68	1.71	4.49
小叶杨 <i>Populus simonii</i>	70	11.5	4.0	81.28	2.84	7.31	3.19	4.44
杜梨 <i>Pyrus betuli folia</i>	52	9.7	5.3	49.49	2.11	9.59	1.94	4.55
华北丁香 <i>Syringa oblata</i>	38	6.5	3.1	15.37	1.54	4.57	0.60	2.24
山桃 <i>Amygdalus davidiana</i>	12	6.7	2.4	4.71	0.49	2.28	0.18	0.98
山核桃 <i>Carya cathayensis</i>	10	10.7	9.7	15.66	0.41	1.83	0.61	0.95
牛奶子 <i>Elaeagnus umbellata</i>	8	4.1	0.6	1.06	0.32	1.37	0.04	0.58
红桦 <i>Betula albosinensis</i>	6	4.8	2.0	1.24	0.24	1.83	0.05	0.71
株木 <i>Swida macrophylla</i>	3	3.6	0.1	0.31	0.12	1.37	0.01	0.50
六道木 <i>Abelia bi flora</i>	2	3.6	0.3	0.21	0.08	0.91	0.01	0.33
海棠 <i>Malus spectabilis</i>	2	5.4	3.0	0.52	0.08	0.46	0.02	0.19
稠李 <i>Padus racemosa</i>	2	4.4	0.6	0.30	0.08	0.91	0.01	0.34
高山柳 <i>Salix cupularis</i>	2	4.4	0.3	0.31	0.08	0.91	0.01	0.34
冻绿 <i>Rhamnus utilis</i>	2	5.9	1.4	0.56	0.08	0.46	0.02	0.19
灯台树 <i>Bothrocaryum controversum</i>	1	5.7	0	0.25	0.04	0.46	0.01	0.17
金银木 <i>Lonicera maackii</i>	1	4.0	0	0.13	0.04	0.46	0.01	0.17
合计 Total	2 467	9.9	5.8	2 551.27	100.00	100.00	100.00	100.00

2.2 松栎混交林内林木胸径和树高的分布

图 2 是样地内所有林木的胸径(DBH)和树高(H)分布图。由图 2 可知,该林分的胸径分布范围为 2~50 cm,总体上近似为倒“J”形分布。其中 8 径阶(6.0~9.9 cm)的树木个体数最多,占总株数的 32.06%,然后随着直径的增加,树木个体数急剧减

少。该林分的树高分布范围为 1~20 m,近似于正态分布,其中高度在 7~8 m 的个体数最多,占总数的 14.23%。以上结果说明该林分以幼、中龄林木为主,成、过熟林木很少,主要树种在胸径、树高上的分布规律与其他树种相似。

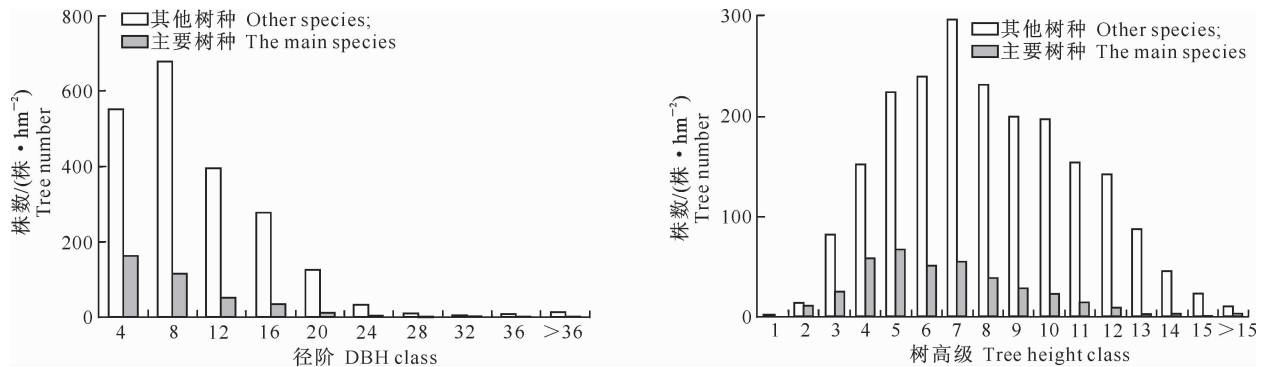


图 2 黄龙山林区松栎混交林标准地内林木的胸径、树高分布
“主要树种”包括油松、辽东栎、白桦、茶条槭,余为“其他树种”

Fig.2 Distribution of diameter and height of all trees in the sample plot in *Pinus tabuli formis* + *Quercus liaotungensis* forest in Huanglong Mountain
“The main species” include *Pinus tabuli formis*, *Quercus liaotungensis*, *Betula platyphylla*, and *Acer ginnala*, while the others are “Other species”

2.3 松栎混交林内主要树种的空间分布格局

对于重要值位于前 4 位的油松、辽东栎、白桦和

茶条槭进行空间点格局分析,结果见图 3。

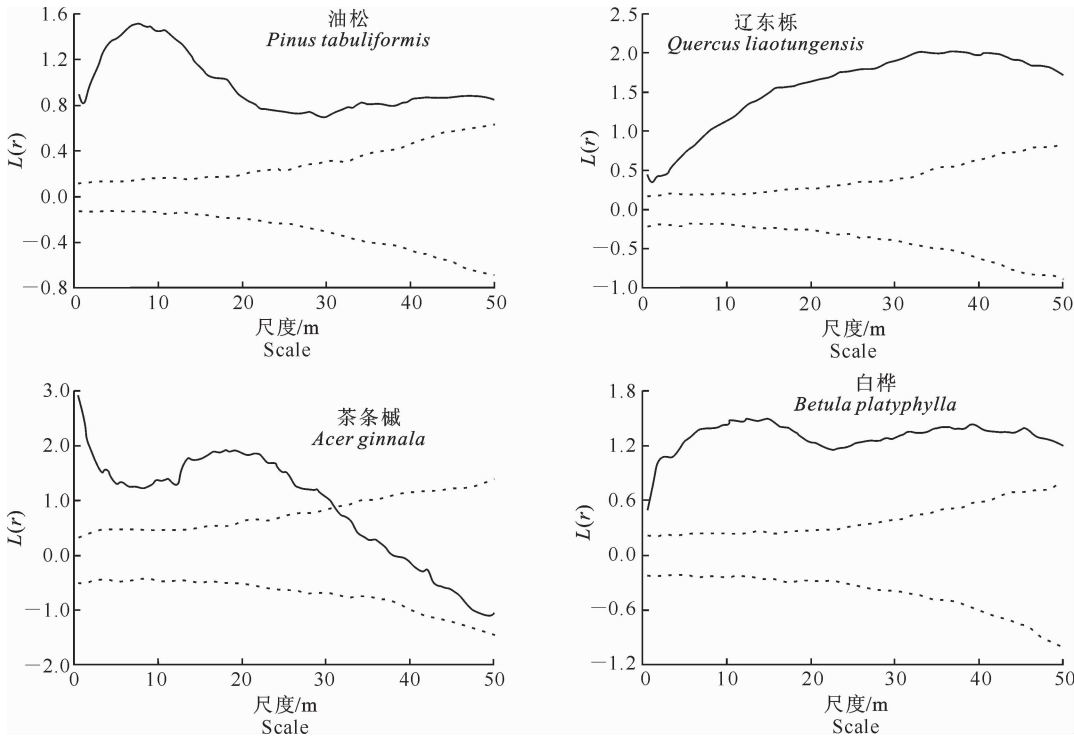


图 3 黄龙山林区松栎混交林内主要树种的空间分布格局

——, 实测值; ·····, 包迹线

Fig. 3 Spatial distribution of main tree species in the sample plot in *Pinus tabulaeformis* + *Quercus liaotungensis* forest in Huanglong Mountain

——, Measured value; ·····, Envelope

由图 3 可以看出,油松、辽东栎和白桦在整个研究尺度上均呈现出显著的集群分布,茶条槭在小尺度上呈现集群分布,而在中尺度和大尺度上为随机分布,并有朝均匀分布发展的趋势。油松种群的聚集程度在 1~8 m 处急剧增大,当 $r=8$ m 时,聚集程度最大,此时 $L(r)=1.52$,之后随着尺度的增加,聚集程度逐渐下降。辽东栎种群在大部分尺度范围内聚集程度都在缓慢增加,并在 $r=33$ m 时,聚集程度达到最大,此时 $L(r)=2.02$,然后聚集程度缓慢变小,朝着随机分布的趋势变化。茶条槭在 0~31 m 尺度上呈现集群分布,在 31 m 之后则为随机分布,同时在 19 m 尺度之后聚集程度持续减小。白桦种群刚开始时聚集程度急剧增加,在 $r=15$ m 时达到最大,此时 $L(r)=1.50$,之后又缓慢下降,但变化较小。辽东栎在大多数尺度上聚集程度高于油松和白桦。

2.4 松栎混交林内主要树种间的空间关联性

从图 4 可以看出,在主要树种的空间关系中,只有油松与茶条槭在 2~3 m 尺度上、辽东栎与茶条槭

在 9~29 m 尺度上以及茶条槭与白桦在 27~49 m 尺度上呈显著负相关,在其他研究尺度上各树种间相关性均不显著。同时在绝大部分研究尺度上,茶条槭与其他树种呈现出负相关关系。油松与辽东栎、油松与白桦、辽东栎与白桦在所有研究尺度上均是正相关,但相关性都不显著。

2.5 松栎混交林内主要树种的总体关联性

采用方差比率法计算主要树种的总体联结系数,得到 $VR=1.01>1$,说明研究区内的主要树种种群间均为正相关关系,另外,用统计量 W 来检验 VR 偏离 1 的显著性,经计算 $W=25.30$,而 95% 的 χ^2 分布的上下限区间为 (14.61, 37.65), W 值在此区间内,说明研究区内植物种群总体上表现为弱的正相关,且关联性不显著。这与前文的树种空间分布格局分析结果相同,因为重要值位于前列的油松与辽东栎、油松与白桦、辽东栎与白桦在大部分尺度上都表现出正相关关系,且正相关不显著,导致整体上表现为弱的正相关。茶条槭由于相对数量较少,对总体关联性的影响不大。

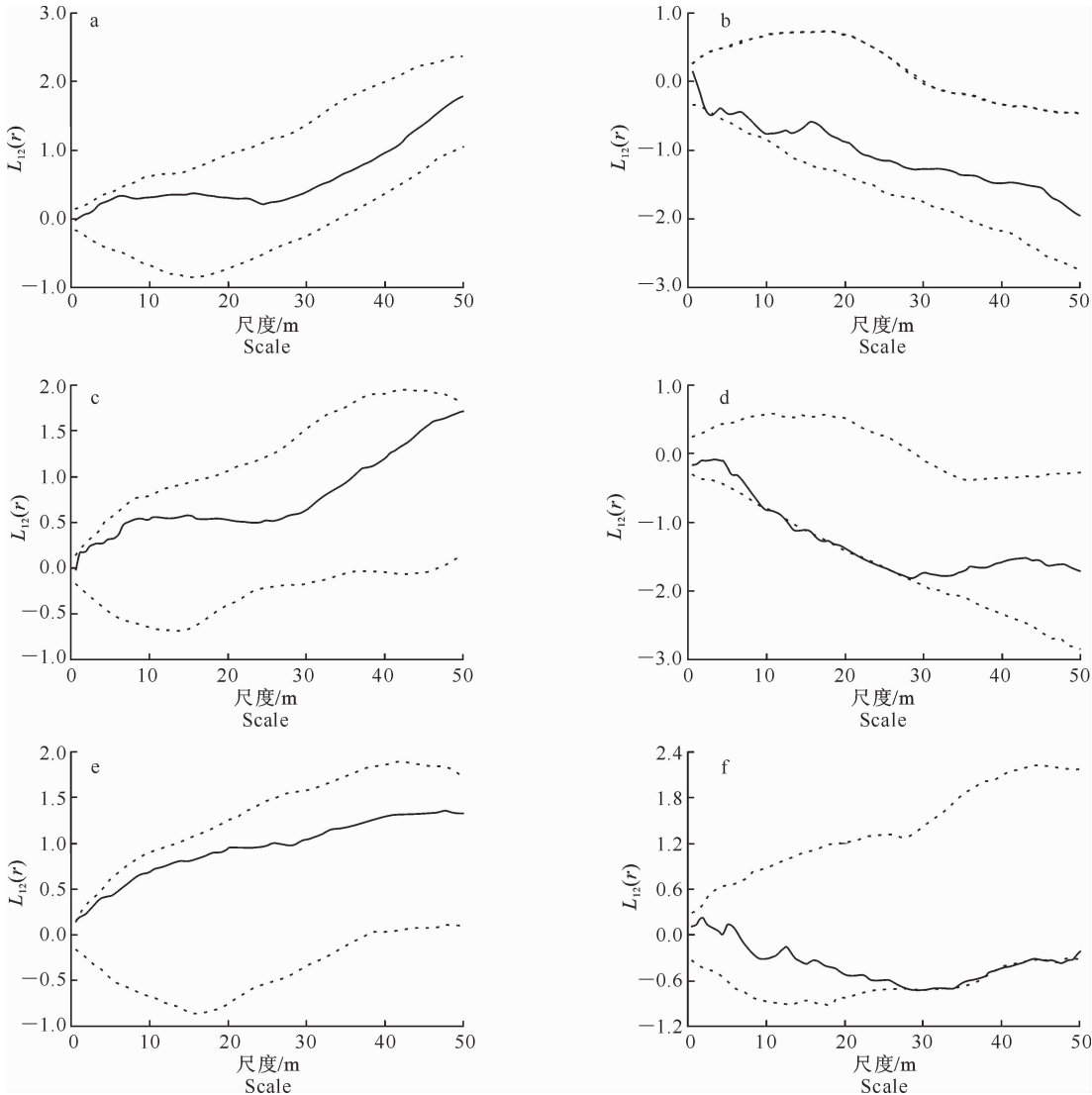


图 4 黄龙山林区松栎混交林内主要树种的空间关系分析
a. 油松-辽东栎;b. 油松-茶条槭;c. 油松-白桦;d. 辽东栎-茶条槭;e. 辽东栎-白桦;f. 茶条槭-白桦;
——. 实测值; ······. 包迹线

Fig. 4 Interspecific association analysis of main tree species in the sample plot in *Pinus tabuli formis* + *Quercus liaotungensis* forest in Huanglong Mountain

a. *Pinus tabuli formis*-*Quercus liaotungensis*; b. *Pinus tabuli formis*-*Acer ginnala*; c. *Pinus tabuli formis*-*Betula platyphylla*;
d. *Quercus liaotungensis*-*Acer ginnala*; e. *Quercus liaotungensis*-*Betula platyphylla*; f. *Acer ginnala*-*Betula platyphylla*;
——. Measured value; ······. Envelope

3 结论与讨论

从黄龙山林区松栎混交林的总体结构来看,该林分物种多样性丰富,群落的结构较为稳定,但是不同树种的分布差异较大。油松、辽东栎和白桦对维持该松栎混交林的结构、功能和稳定性发挥着巨大的作用。松栎混交林虽然是黄龙山林区典型的地带性群落,但整个样地内林木以小径木为主,表明其是尚未达到演替顶级阶段的森林群落^[21]。林分的径级结构分布为倒“J”型,这与孟宪宇等学者^[22]的研

究结果一致,即天然林的直径分布在不受人为干扰时应该呈近似的倒“J”型或者标准的倒“J”型分布;但是当异龄林林冠层次不整齐时,会成为不规则山状曲线。该林分的树高分布则为近似的正态分布,说明该松栎混交林总体上生长状况良好。

本研究结果表明,油松、辽东栎和白桦在全部研究尺度上表现出显著的集群分布性,并在大尺度上有朝随机分布发展的趋势。集群分布是最常见的物种分布形式,与种群的繁殖特点、种内和种间竞争等有关^[23-25]。林区的主要树种从聚集向随机变化,并

有逐渐均匀化的趋势,这是种群自我调节的机理之一,有利于更好地利用环境资源,同时与种群进行自我稀疏有关^[26]。由本研究调查结果可知,辽东栎小径木较多,更新幼树多散生于母树周围,因此呈集群分布,结构稳定,这与卢彦昌等^[27]、薛智德等^[28]的研究结果一致。郭其强等^[29]研究发现,黄龙山林区的白桦林同样是物种组成丰富、天然更新良好的种群,是在顶级群落遭破坏后恢复演替过程中的次生先锋群落,而这与其集群分布的特征是紧密相关的。

本研究结果表明,油松与辽东栎、油松与白桦、辽东栎与白桦在整个研究尺度上表现出正相关性,说明这 3 个树种之间竞争性较弱,在空间上有一定的依赖性。而茶条槭与其他主要树种在大部分研究尺度上表现出负相关性,在某些尺度上甚至是显著负相关,这说明茶条槭与其他主要树种之间竞争激烈。王玮玲等^[30]研究发现,茶条槭成熟植株结实量很大,会产生大量幼苗,林分上层郁闭度高时,属于喜光树种的茶条槭会引发激烈的种间和种内竞争。同时,种间关联性有一定的传递性,即在某尺度上,若油松与辽东栎为正相关,油松与白桦为正相关,则可推知辽东栎与白桦也为正相关,当相关显著时,则结果更为准确。

松栎混交林作为黄龙山林区重要的地带性植被,研究其种群格局对于保持森林结构的稳定、最大限度地发挥其生态功能有重要意义,本研究只是从水平分布格局及物种关联性方面进行了空间结构的相关研究,之后应该结合垂直结构从整体上对林分进行更深入的探究。而油松和辽东栎是黄龙山林区 2 种重要的乡土树种,其组成的松栎混交林能很好地完成更新^[31]。在实际生产中,在保持林分结构稳定的基础上,应采取一些合理的抚育措施,例如疏伐一些过于集中的茶条槭,缓解种间和种内竞争,同时可以通过改善部分环境因子,促使松栎混交林向健康与可持续经营的方向发展。

[参考文献]

- [1] 郭忠玲,马元丹,郑金萍,等. 长白山落叶阔叶混交林的物种多样性、种群空间分布格局及种间关联性研究 [J]. 应用生态学报, 2004, 15(11): 2013-2018.
- Guo Z L, Ma Y D, Zheng J P, et al. Biodiversity of tree species, their populations' spatial distribution pattern and interspecific association in mixed deciduous broadleaved forest in Changbai Mountains [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(11): 2013-2018. (in Chinese)
- [2] Pavel G, Mari M, Dietrich S. Correct testing of mark independ-

- ence for marked point patterns [J]. Ecological Modelling, 2011, 222: 3888-3894.
- [3] Alicia L, Sonia C, Fernando M. Intertype mark correlation function: A new tool for analysis of species interactions [J]. Ecological Modelling, 2011, 222: 580-587.
- [4] 余新晓,岳永杰,王小平,等. 森林生态系统结构及空间格局 [M]. 北京: 科学出版社, 2010: 1-4.
- Yu X X, Yue Y J, Wang X P, et al. Forest ecosystem structure and spatial pattern [M]. Beijing: Science Press, 2010: 1-4. (in Chinese)
- [5] Pavel G, Aila S. Modelling the spatial structure of forest stands by multivariate point processes with hierarchical interactions [J]. Ecological Modelling, 2009, 220: 1232-1240.
- [6] Fernando M, Agustín R, Ignacio B, et al. Characterization of the spatial structure of the canopy in *Pinus silvestris* L. stands in Central Spain from hemispherical photographs [J]. Forest Ecology and Management, 2008, 255: 580-590.
- [7] 张金屯. 数量生态学 [M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- Zhang J T. Quantitative ecology [M]. Beijing: Science Press, 2004. (in Chinese)
- [8] 罗瑞平. 黄龙山林区天然油松针阔混交林结构与更新特征的研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2006.
- Luo R P. Study on the characters of structure and regeneration in natural *Pinus tabulaeformis* stand of Huanglong Forest Region [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2006. (in Chinese)
- [9] 侯红亚,王立海. 小兴安岭阔叶红松林物种组成及主要种群的空间分布格局 [J]. 应用生态学报, 2013, 24(11): 3043-3049.
- Hou H Y, Wang L H. Species composition and main populations spatial distribution pattern in Korean pine broadleaved forest in Xiaoxing'an Mountains of Northeast China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(11): 3043-3049. (in Chinese)
- [10] 杜志,亢新刚,包昱君,等. 长白山云冷杉林不同演替阶段的树种空间分布格局及其关联性 [J]. 北京林业大学学报, 2012, 34(2): 14-19.
- Du Z, Kang X G, Bao Y J, et al. Spatial distribution patterns and associations of tree species during different succession stages in spruce-fir forests of Changbai Mountains, northeastern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2012, 34(2): 14-19. (in Chinese)
- [11] 鲁渊平,杜继稳,梁生俊,等. 陕北气候变化与生态植被变迁 [J]. 生态学杂志, 2005, 24(1): 53-57.
- Lu Y P, Du J W, Liang S J, et al. Climate and vegetation change in the north of Shaanxi Province [J]. Chinese Journal of Ecology, 2005, 24(1): 53-57. (in Chinese)
- [12] 蒋平平. 基于 RS 的黄龙山林区森林景观格局变化研究: 以黄龙山林业局蔡家川林场为例 [D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2008.
- Jiang P P. Study on forest landscape spatial pattern and temporal dynamics in Loess Plateau based on RS: A case study for Caijiachuan Forest Farm of Huanglong Mountain Forestry

Bureau [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2008. (in Chinese)

[13] 龚直文, 亢新刚, 顾 丽, 等. 长白山过伐云冷杉恢复林主要树种径阶生长与枯损模拟 [J]. 林业科学研究, 2010, 23(3): 362-367.

Gong Z W, Kang X G, Gu L, et al. Growth and mortality of size-class model for Spruce-Fir mixed forests in over-cutting forest area of Changbai Mountains, Northeast China [J]. Forest Research, 2010, 23(3): 362-367. (in Chinese)

[14] 刘淑燕, 岳永杰, 余新晓, 等. 北京山区刺槐林种群的空间点格局 [J]. 东北林业大学学报, 2010, 38(4): 33-36.

Liu S Y, Yue Y J, Yu X X, et al. Spatial pattern of *Robinia pseudoacacia* plantation population in mountainous area of Beijing [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2010, 38(4): 33-36. (in Chinese)

[15] 薛建辉, 任青山, 阮宏华, 等. 森林生态学 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2010: 129-134.

Xue J H, Ren Q S, Ruan H H, et al. Forest ecology [M]. Beijing: Chinese Forestry Press, 2010: 129-134. (in Chinese)

[16] Ripley B D. Modelling spatial patterns (with discussion) [J]. Journal of Royal Statistical Society, 1977(2): 172-212.

[17] 龚直文, 顾 丽, 亢新刚, 等. 长白山森林次生演替过程中林木空间格局研究 [J]. 北京林业大学学报, 2010, 32(2): 92-99.

Gong Z W, Gu L, Kang X G, et al. Spatial pattern of forests during secondary succession in Changbai Mountain, Northeastern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2010, 32(2): 92-99. (in Chinese)

[18] Lotwisch H W, Silverman B W. Methods for analysing spatial processes of several types of points [J]. Journal of Royal Statistical Society; Series B, 1982, 44: 406-413.

[19] 房 飞, 胡玉昆, 张 伟, 等. 高寒草原植物群落种间关系的数量分析 [J]. 生态学报, 2013, 32(6): 1898-1907.

Fang F, Hu Y K, Zhang W, et al. Numerical analysis of interspecific relationships in Alpine steppe community in Bayanbulak [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 32(6): 1898-1907. (in Chinese)

[20] 张 瑾, 陈文业, 张继强, 等. 甘肃敦煌西湖荒漠-湿地生态系统优势植物种群分布格局及种间关联性 [J]. 中国沙漠, 2013, 33(2): 349-357.

Zhang J, Chen W Y, Zhang J Q, et al. Spatial distribution pattern and interspecific association of the dominant populations in wetland ecological system enclosed by extremely dry desert region in Dunhuang Xihu, Gansu, China [J]. Journal of Desert Research, 2013, 33(2): 349-357. (in Chinese)

[21] 王乃江. 陕西黄土高原黄龙林区森林经营及恢复机理研究 [D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2008.

Wang N J. Management and rehabilitation mechanism of natural forest in Huanglong Region on Loess Plateau [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2008. (in Chinese)

[22] 孟宪宇, 余光辉, 李凤日, 等. 测树学 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2011: 78-80.

Meng X Y, Yu G H, Li F R, et al. Forest measurement [M]. Beijing: Chinese Forestry Press, 2011: 78-80. (in Chinese)

[23] Manabe T, Nishimura N, Miura M, et al. Population structure and spatial patterns for trees in a temperate old-growth broad-leaved forest in Japan [J]. Plant Ecology, 2000, 151: 181-197.

[24] McDonald R I, Peet R K, Urban D L. Spatial pattern of *Quercus regeneration* limitation and *Acer rubrum* invasion in a Piedmont forest [J]. Journal of Vegetation Science, 2003, 14: 441-450.

[25] North M, Chen J Q, Oakley B, et al. Forest stand structure and pattern of old-growth western hemlock/Douglas-fir and mixed-conifer forests [J]. Forest Science, 2004, 50: 299-311.

[26] 侯向阳, 韩进轩. 长白山红松林主要树种空间格局的模拟分析 [J]. 植物生态学报, 1997, 21(3): 242-249.

Hou X Y, Han J X. Simulation analysis of spatial patterns of main species in the Korean-pine Broadleaved Forest in Changbai Mountain [J]. Acta Phytocologica Sinica, 1997, 21(3): 242-249. (in Chinese)

[27] 卢彦昌, 张文辉, 陆元昌. 黄龙山林区不同培育措施对辽东栎种群结构与动态的影响 [J]. 西北植物学报, 2006, 26(7): 1407-1413.

Lu Y C, Zhang W H, Lu Y C. Effects of different management practices on population structure and dynamics of *Quercus liaotungensis* [J]. Acta Bot Boreal-Occident Sin, 2006, 26(7): 1407-1413. (in Chinese)

[28] 薛智德, 朱清科, 山中典和, 等. 延安地区辽东栎群落结构特征的研究 [J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2008, 36(10): 81-87.

Xue Z D, Zhu Q K, Norikazu Y, et al. Characteristics of a *Quercus liaotungensis* community in a forested area at Yan'an [J]. Journal of Northwest A&F University: Nat Sci Ed, 2008, 36(10): 81-87. (in Chinese)

[29] 郭其强, 张文辉, 何景峰, 等. 黄龙山不同白桦林群落结构特征研究 [J]. 西北植物学报, 2007, 27(1): 132-138.

Guo Q Q, Zhang W H, He J F, et al. Structural characteristics of different *Betula platyphylla* communities in Huanglong Mountain [J]. Acta Bot Boreal-Occident Sin, 2007, 27(1): 132-138. (in Chinese)

[30] 王祎玲, 张钦弟, 郝晓杰, 等. 山西七里峪茶条槭的种群结构与空间分布格局 [J]. 西北植物学报, 2012, 32(5): 1027-1035.

Wang Y L, Zhang Q D, Hao X J, et al. Structure and spatial distribution of *Acer ginnala* population in Qiliyu, Shanxi [J]. Acta Bot Boreal-Occident Sin, 2012, 32(5): 1027-1035. (in Chinese)

[31] 曹旭平, 郭其强, 张文辉. 黄龙山油松林和油松+辽东栎混交林物种组成及优势种群动态 [J]. 西北植物学报, 2010, 30(5): 1012-1019.

Cao X P, Guo Q Q, Zhang W H. Species compositions and preponderant population dynamic of the *Pinus tabulaeformis* forest and *Pinus tabulaeformis*+*Quercus liaotungensis* forest in Huanglong Mountain [J]. Acta Bot Boreal-Occident Sin, 2010, 30(5): 1012-1019. (in Chinese)