

南京老山国家森林公园朴树群落优势种的种间关系

张雄邦¹, 姚 锐², 张光富²

(1. 浙江煤炭地质局勘探一队, 浙江 湖州 310017)

(2. 南京师范大学生命科学学院, 江苏省生物多样性与生物技术重点实验室, 江苏 南京 210023)

[摘要] 研究森林群落主要树种的种间关系, 有助于揭示植物群落的结构和功能及物种共存的维持机制. 在野外调查基础上, 采用 2×2 联列表, 通过方差比率法 (VR)、 χ^2 检验、3 个关联指数 (Jaccard 指数、Ochiai 指数、Dice 指数)、联结系数 (AC) 以及 Pearson 积距相关系数和 Spearman 秩相关系数对南京老山国家森林公园的朴树群落中 16 种主要乔木的种间关系进行分析. 结果表明: 群落内总体方差比率 (VR) 为 0.95, 表现为负联结, 反映了该群落处于不稳定的进展演替阶段. 16 个优势乔木树种组成的 120 个种对中, 仅有 1 对呈显著正联结, 44 对呈显著或极显著负联结, 而绝大多数种对联结关系未达到显著水平, 这表明种对间的独立性较强.

[关键词] 朴树群落, 优势种, 种间联结, 南京

[中图分类号] S718.54 [文献标志码] A [文章编号] 1001-4616(2016)04-0056-09

Interspecific Relationships of Dominant Species from *Celtis sinensis* Communities in Laoshan National Forest Park, Nanjing

Zhang Xiongbang¹, Yao Rui², Zhang Guangfu²

(1. The First Exploration Team, Zhejiang Administration of Coal Geology, Huzhou 310017, China)

(2. School of Life Sciences, Nanjing Normal University, Jiangsu Key Laboratory of Biodiversity and Biotechnology, Nanjing 210023, China)

Abstract: Interspecific relationships among dominant species in forests are conducive to understand plant community structure and function, and to discover the mechanisms of species coexistence. According to field survey, the interspecific relationship of 16 dominant species in tree layer of *Celtis sinensis* community in Laoshan National Forest Park, Nanjing was studied by using variance ratio (VR), χ^2 -test, three association indices (including Jaccard, Ochiai, Dice) and association coefficient (AC) in the 2×2 contingency table, together with Pearson's correlation coefficient, Spearman's rank correlation coefficient. The result indicated that overall associations between those dominant species in the community were not significantly negative, suggesting that this community was not mature and in the phase of progressive succession. The χ^2 test showed that among these 16 dominant species, only 1 species pairs exhibited significantly positive association and 44 species pairs showed that significant negative association. However, most of the total 120 species pairs did not show significant or extremely significant interconnection, reflecting that the sampled dominant species tended to distribute relatively independently and were still in the unstable succession.

Key words: *Celtis sinensis* community, dominant species, interspecific association, Nanjing

种间联结 (interspecific association) 是指不同物种在空间分布上的相互关联性, 通常是由于群落生境的差异影响物种的分布而引起的^[1-3]. 总体而言, 森林群落中不同树种之间的关系可以分为 3 种情况: 正联结、负联结和无联结. 种间联结是群落形成和演化的基础, 是生态群落的重要特征之一. 种间联结是种间相互关系的表现形式, 它可作为群落分类的依据. 因此, 对种间联结的研究有助于揭示森林群落的水平格局形成、群落结构与功能以及群落演替动态^[4]. 此外, 种间联结研究对于维护森林群落的稳定性、解释群落中的物种共存机制以及指导森林植被的生态恢复均具有重要作用^[3,5].

朴树 (*Celtis sinensis*) 为榆科 (Ulmaceae) 落叶乔木, 多生于山坡、沟谷, 主要分布在江苏、安徽、山东、河

收稿日期: 2016-06-14.

基金项目: 江苏省第二次全国重点保护野生植物资源调查项目.

通讯联系人: 张光富, 副教授, 研究方向: 植物生态学. E-mail: zhangguangfu@njnu.edu.cn

南等省区^[6]。朴树的茎皮为人造棉和造纸原料,果实榨油可做润滑油;根皮可入药,治疗腰痛、漆疮、麻疹,从其树枝分离的化合物具有抗肿瘤和消炎的功效;同时朴树对二氧化硫、氯气等有毒气体有较强的抵抗能力^[7-8]。在以落叶阔叶林为主的南京地区,朴树是其中主要的建群种或优势树种之一^[9]。近年来,关于朴树的研究主要集中在种子寿命^[10]、丛生菌根^[11]、种群结构与分布格局^[7]、群落特征和群落稳定性^[8]等方面,而对于朴树群落优势种群的种间联结尚未见报道。目前种间联结的测定方法有多种,但是何者最为合适,迄今并无定论^[12]。因此本文主要研究目的在于,(1)采用种间联结的不同测定方法,分析南京老山国家森林公园(以下简称老山)朴树群落主要种群的种间联结关系,以便揭示不同种群之间相互作用的主要原因;(2)通过测定南京朴树林群落中优势种群的总体联结性、种间关联度和种间协变,并进行显著性检验,以便比较种间联结不同测定方法的有效性;(3)根据朴树群落优势种群的种间关系研究,提出该地区朴树群落生态保护的主要对策。

1 研究地概况

研究区南京老山国家森林公园位于南京长江北岸,东临南京长江大桥,西靠安徽省滁河,总面积 80 km²,森林覆盖率达 80%。该区地理位置 118°25'~118°40'E,32°03'~32°09'N。该区属于北亚热带季风气候区,温暖湿润,雨量充沛,光照充足,四季分明。年平均气温 15.1℃,年均降水量 1 106.5 mm,全年无霜期 228 d。土壤类型主要为黄棕壤。老山位于中亚热带和北亚热带的交汇处,该区共有种子植物 94 科 291 属 477 种^[13],其森林主要由落叶阔叶林和常绿落叶阔叶混交林组成。其中落叶阔叶林是该地区相对稳定的森林植被类型,群落的植物种类组成较为丰富,群落成层现象较为明显^[8]。朴树林是该区落叶阔叶林的主要类型之一,其乔木层物种主要有朴树、黄檀(*Dalbergia hupeana*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、构树(*Broussonetia papyrifera*)、八角枫(*Alangium chinense*)和黄连木(*Pistacia chinensis*)等;灌木层主要物种有高粱泡(*Rubus lambertianus*)、莢蒾(*Viburnum dilatatum*)、卫矛(*Euonymus alatus*)、野山楂(*Crataegus pinatifida*)、圆叶鼠李(*Rhamnus globosa*)等;草本层植物主要有贯众(*Cyrtomium fortunei*)、海金沙(*Lygodium japonicum*)、天南星(*Arisaema heterophyllum*)、野蔷薇(*Rosa multiflora*)、井栏边草(*Pteris multifida*)等;层间植物主要有紫藤(*Wisteria sinensis*)、络石(*Trachelospermum jasminoides*)和菝葜(*Smilax china*)等。

2 研究方法

2.1 野外样方调查方法

在南京老山国家森林公园以朴树分布为主的天然次生林内,分别在虎凹和核桃凹设置 6 块和 4 块典型调查样地,测定每块样地的海拔、坡向、坡位、坡度、土壤等生态因子。各样地面积均为 20 m×20 m,再将每块样地分为 4 个 10 m×10 m 的小样方,共计 40 个小样方,对每一小样方中的乔木层植物进行每木检尺,逐株调查,分别记录样方内乔木层物种(DBH≥5 cm)的种类、株数、胸径、冠幅等以及环境因素^[7,14]。根据样方中乔木物种的出现频度(除去仅出现于 1 个样方的物种),筛选出以下 16 种乔木树种进行种间联结分析。这 16 个物种分别是:1.八角枫;2.刺槐;3.枫杨(*Pterocarya stenoptera*);4.构树;5.化香(*Platycarya strobilacea*);6.黄连木;7.黄檀;8.朴树;9.苦竹(*Pleioblastus amarus*);10.马尾松(*Pinus massoniana*);11.赛山梅(*Styrax confusa*);12.三角枫(*Acer buergerianum*);13.栓皮栎(*Quercus variabilis*);14.李(*Prunus salicina*);15.榆树(*Ulmus pumila*)和 16.柘树(*Cudrania tricuspidata*)。其中,裸子植物 1 科 1 种,被子植物 11 科 15 种(本文图和表中的植物物种序号依次同上)。

2.2 种间联结测定方法

2.2.1 多物种间的总体联结性检验

对多物种间总体关联性的测定,可用 Schluter(1984)提出的由零联结模型(Null association model)导出方差比率(VR)法进行^[3]。计算公式为:

$$\delta_r^2 = \sum_{i=1}^s P_i(1-P_i),$$

$$S_r^2 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (T_j - t)^2,$$

$$VR = S_T^2 / \delta_T^2 \quad P_i = n_i / N.$$

其中 S 为总物种数, N 为总样方数, T_j 为样方 j 内出现的研究物种的总数, n_i 为物种 i 出现的样方数, t 为样方中种的平均数. 若 $VR > 1$, 表示物种间表现出正的关联; 若 $VR < 1$, 则表示物种间存在负的净关联. 由于种间的正负关联可以相互抵消, 因此采用统计量 W ($W = N \times VR$) 来检验 VR 值偏离 1 的显著程度. 若物种不显著相关联, 则 W 落入由下面 χ^2 分布给出的界限的概率为 90%: $\chi_{0.95}^2(N) < W < \chi_{0.05}^2(N)$.

2.2.2 乔木物种间的联结性检验— χ^2 检验

首先将调查的原始数据转化为 0、1 形式的二元数据矩阵, 然后分别构建朴树群落 16 种乔木的 2×2 列联表, 把成对的物种在样方内存在或不存在的排列, 计算出 a 、 b 、 c 和 d 的实测值. 代入 χ^2 公式进行显著性检验, 计算群落中物种的联结性和相关性.

其中 a 是两个种都存在的样方数, b 是 B 种存在而 A 种不存在的样方数, c 为 A 种存在而 B 种不存在的样方数, d 为两个种都不存在的样方数, N 为取样总数. 由于取样的非连续性, 常用 Yates 的连续性校正公式计算 χ^2 值, 公式为:

$$\chi^2 = \frac{N(|ad-bc|-N/2)^2}{(a+b)(c+d)(a+c)(b+d)}.$$

种间联结显著性判定采用以下标准: 当 $\chi^2 < 3.841$ 时, 种间联结独立; 当 $\chi^2 \geq 6.635$ 时, 种间有显著的生态联结; 当 $3.841 \leq \chi^2 < 6.635$ 时, 种间有一定的生态联结. χ^2 本身没有负值, 因此判定正、负联结的方法是: 若 $a > (a+b)(a+c)/n$ 即 ($ad > bc$) 为正联结, 反之为负联结^[1,3].

2.2.3 种间关联度的测定方法

采用以下 3 个[共同出现百分率(JI)、Ochiai 指数(OI)、Dice 指数(DI)]无负值变化的无中心指数(non-centred index)并结合联结系数(AC)来表示种间关联程度和相伴出现的机率^[15,17].

(1) 联结系数(AC)

当 $ad > bc$ 时,

$$AC = \frac{ad-bc}{(a+b)(b+d)}.$$

当 $ad < bc$, 且 $d \geq a$ 时,

$$AC = \frac{ad-bc}{(a+b)(a+c)}.$$

当 $ad < bc$, 且 $d < a$ 时,

$$AC = \frac{ad-bc}{(b+d)(d+c)}.$$

AC 的值域为 $[-1, 1]$, AC 值越趋近于 1, 表明物种正联结性越强; 相反, AC 值越趋近于 -1, 表明物种间的负联结性越强; AC 为 0 时, 则表明物种间完全独立.

(2) 共同出现百分率(JI):

$$JI = \frac{a}{(a+b+c)}.$$

(3) Ochiai 指数(OI):

$$OI = \frac{a}{\sqrt{(a+b)(a+c)}}.$$

(4) Dice 指数(DI):

$$DI = \frac{2a}{(2a+b+c)}.$$

OI 、 DI 、 JI 3 个指数都表示种对相伴出现机率和联结性程度, 当 $a = 0$ 时, 取值为 0, 表明种间完全相异, 不同时出现在同一样方中; 当 $a = S$ (总种数) 时取值为 1, 表示同时出现在样方中.

2.2.4 种间协变的测定方法

矩积相关系数和秩相关系数是反映两个物种种间协变线性关系的重要指标, 可反映物种间的数量变

化关系. 本文采用 Pearson 积矩相关系数和 Spearman 秩相关系数作相关分析. 并利用朴树群落 16 个优势种的重要值作为数量指标^[3]. 采用公式“乔木重要值=(相对多度+相对频度+相对显著度)/3”^[14] 对前 16 位的主要物种的重要值进行量化,即形成了 10×16 的数据矩阵.

(1) Pearson 相关系数:

$$r_p(i, j) = \frac{\sum_{k=1}^n (X_{ik} - \bar{X}_i)(X_{jk} - \bar{X}_j)}{\sqrt{\sum_{k=1}^n (X_{ik} - \bar{X}_i)^2 \sum_{k=1}^n (X_{jk} - \bar{X}_j)^2}}$$

(2) Spearman 秩相关系数:

$$r_s(i, j) = 1 - \frac{6 \sum_{k=1}^n d_k^2}{n^3 - n}$$

该系数属于非参数检验,式中, n 为样方数, $d_k = (x_{ik} - \bar{x}_i)(x_{jk} - \bar{x}_j)$, x_{ik} 为第 k 个样方中种 i 的重要值, \bar{x}_i 为 k 个样方中种 i 重要值的平均值. \bar{x}_j 及 x_{jk} 的值同上.

3 结果与分析

3.1 多物种间总体联结性

根据南京朴树群落 16 个优势种之间存在与不存在的矩阵计算 VR 值: $VR = S_i^2 / \delta_i^2 = 0.950$ $3 < 1$, 这说明 16 个种群之间存在净的负联结. 对以上测定结果,用统计量 W 来检验 VR 值偏离 1 的显著性. $W = VR \times N = 38.012$. 查表得相应的 χ^2 值, $\chi_{0.95(16)}^2 = 23.26$, $\chi_{0.05(16)}^2 = 50.99$, W 落入 $\chi_{0.95(16)}^2$ 与 $\chi_{0.05(16)}^2$ 之间,说明 16 个种群之间在总体上呈不显著负联结,各自趋于独立.

3.2 乔木层优势种的种间联结性

采用联结系数等度量种间联结性的强度,是作为对种间联结性的一种说明. 而 χ^2 检验方法较准确地刻画了种间联结性之间的差异,因此联结关系的显著性与关联度的大小,成为种间联结研究不可缺少的两个方面. 表 1 列出了具有显著和极显著种对的测定值.

表 1 朴树群落乔木层 16 个种群间联结指数和 χ^2 检验统计

Table 1 Interspecific association index values and χ^2 -test of 16 dominant species in tree layer of *Celtis sinensis* forest

种对	AC 值	χ^2 值	种对	AC 值	χ^2 值
1—6	-1.000	30.002	8—13	-1.000	14.507
1—7	-1.000	28.718	8—15	-0.375	5.017
1—8	-0.833	25.208	9—10	-1.000	11.598
1—9	-1.000	4.103	9—11	-1.000	6.532
1—10	-1.000	4.103	9—12	-1.000	4.888
2—12	-1.000	18.941	9—13	-1.000	6.532
2—13	-1.000	16.851	9—14	-1.000	11.598
3—8	-0.375	3.980	9—15	-1.000	4.102
3—9	-1.000	6.532	9—16	-1.000	6.532
3—10	-1.000	6.532	10—11	-1.000	6.532
3—11	-1.000	3.989	10—12	-1.000	4.888
3—13	-1.000	3.989	10—13	-1.000	6.532
3—14	-1.000	6.532	10—14	-1.000	11.598
3—16	-1.000	3.989	10—15	-1.000	4.103
4—9	-1.000	4.888	10—16	-1.000	6.532
4—10	-1.000	4.888	11—13	-1.000	3.989
4—14	-1.000	4.888	11—14	-1.000	6.532
5—9	-1.000	4.888	11—16	-1.000	3.989
5—10	-1.000	4.888	13—14	-1.000	6.532
5—14	-1.000	4.888	13—16	-1.000	3.989
6—13	-1.000	5.071	14—15	-1.000	4.103
6—14	-1.000	4.321	14—16	1.000	4.373
6—16	-1.000	5.071			

由表 1 可知,朴树林乔木层 16 个种的 120 个种对中,种对之间无极显著正联结 ($P < 0.01$),仅 1 个种对

(14—16)呈显著正联结($P<0.05$),表明这 2 个种常相伴出现在极显著或显著负联结的 44 个种对中,共有 9 个种对呈极显著负联结($P<0.01$),35 个种对呈显著负联结($P<0.05$).而无联结的种对有 75 个,这表明朴树群落中绝大多数种对间的独立性较强.

应用 Yates 修正的 Pearson 公式,对朴树林 16 种乔木之间进行两物种间联结性的 χ^2 检验(表 2).从表 2 可知种间有极显著生态联结的种对有 9 个,占总数的 7.5%;种间联结显著的种对有 35 个,占总数的 29.2%;种间无联结或联结未达到显著的种对有 75 对,占总数的 63.4%.

表 2 朴树群落乔木优势种种间 χ^2 统计量数阵

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1															
2	0.000														
3	2.866	2.707													
4	0.160	2.523	3.205												
5	2.563	2.523	0.929	2.730											
6	30.002	1.160	0.638	0.008	0.008										
7	28.718	0.076	0.000	3.003	0.120	0.835									
8	25.208	0.357	3.980	1.824	1.824	1.059	0.208								
9	4.103	3.663	6.532	4.888	4.888	0.003	0.342	0.577							
10	4.103	3.663	6.532	4.888	4.888	0.003	3.077	0.577	11.598						
11	2.866	2.707	3.989	3.205	3.205	0.638	0.000	0.033	6.532	6.532					
12	0.160	18.941	0.929	2.730	2.730	1.670	0.120	1.824	4.888	4.888	3.205				
13	2.866	16.851	3.989	3.205	3.205	5.071	2.807	14.507	6.532	6.532	3.989	3.205			
14	1.823	3.663	6.532	4.888	4.888	4.321	3.077	0.577	11.598	11.598	6.532	2.670	6.532		
15	2.500	2.540	0.526	2.563	0.160	0.401	0.370	5.017	4.103	4.103	2.866	0.160	0.526	4.103	
16	0.526	0.301	3.989	3.205	3.205	5.071	0.000	0.033	6.532	6.532	3.989	0.929	3.989	4.373	2.866

3.3 乔木层优势种的种间关联度

由于两物种间联结性的 χ^2 检验只能作为一种定性判断,并且不能区分联结强度的大小.因此这里应用联结系数(AC)、Jaccard 指数(JI)、Dice 指数和 Ochiai 指数测定种间关联度,以种间联结测度各指标计算值作半矩阵图,对朴树群落乔木树种种间关联度进行计算,结果见图 1、图 2、图 3 和表 3.

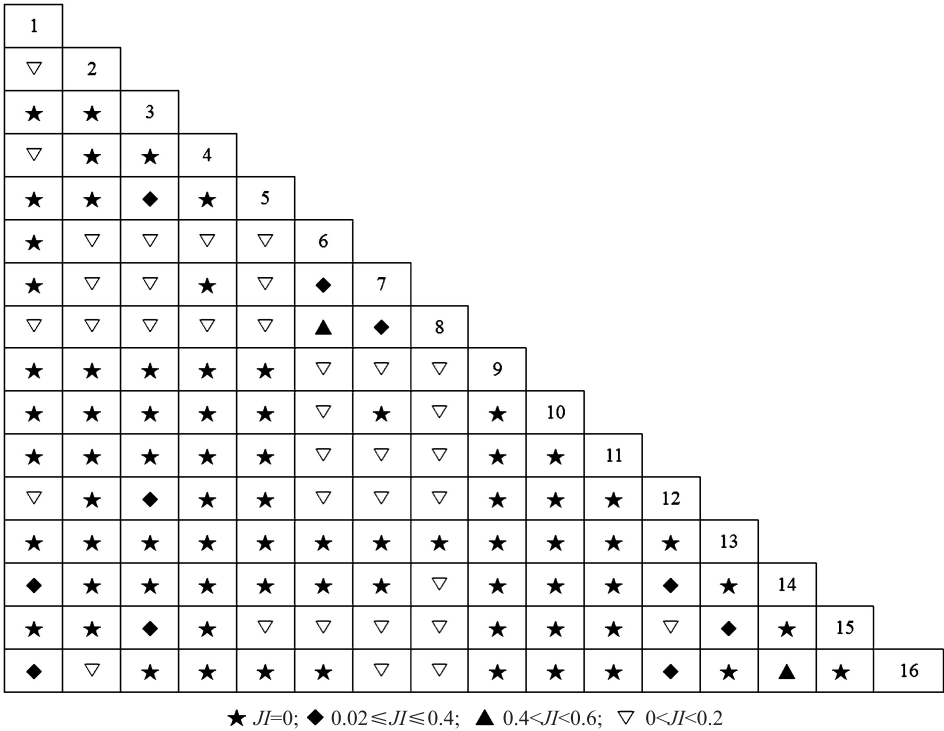


图 1 朴树群落优势种种间联结 JI 值半矩阵图

Fig. 1 Semi-matrices of interspecific association (JI) for dominant species in *Celtis sinensis* forests

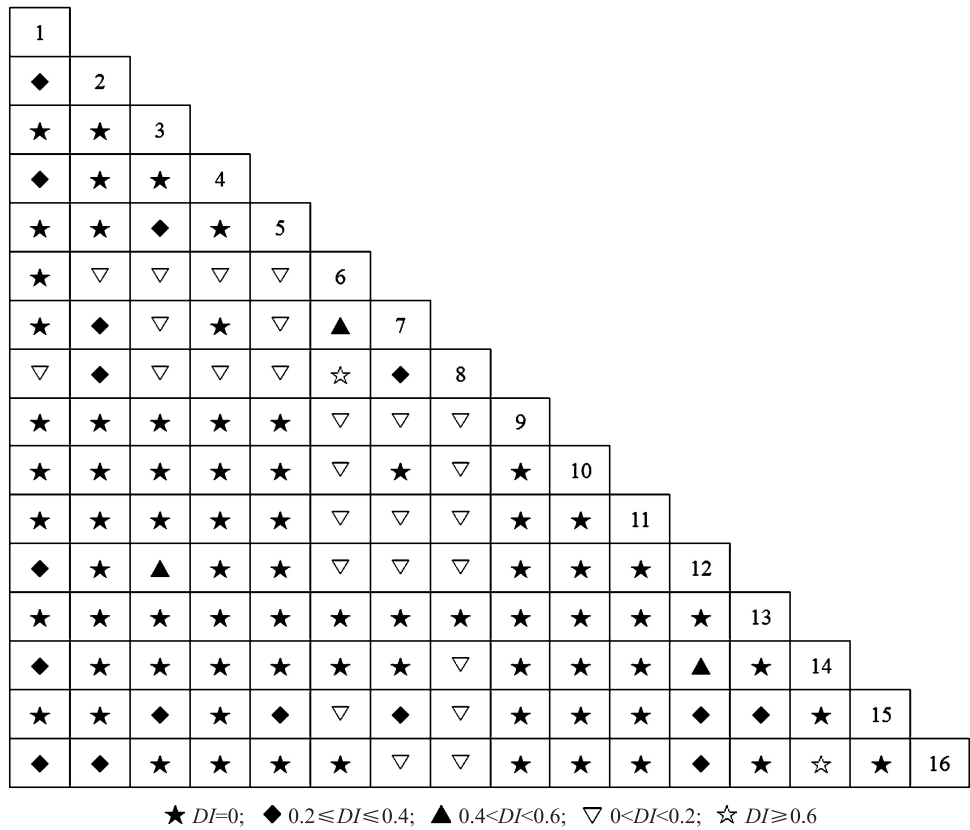


图2 朴树群落种间联结 DI 值半矩阵图

Fig. 2 Semi-matrices of interspecific association (DI) for dominant species in *Celtis sinensis* forests

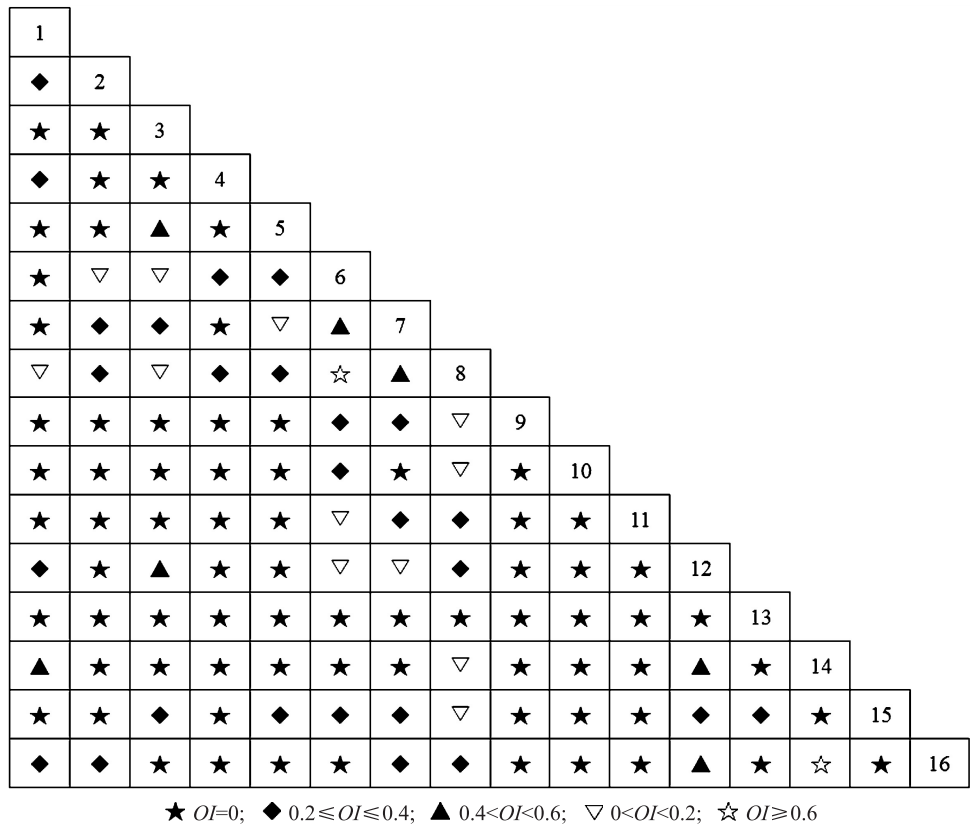


图3 朴树群落种间联结 OI 值半矩阵图

Fig. 3 Semi-matrices of interspecific association (OI) for dominant species in *Celtis sinensis* forests

表 3 朴树群落乔木优势种种间联结系数(AC)数阵														
Table 3 Data matrix of interspecific association by AC value of dominant species in tree layer of <i>Celtis sinensis</i> community														
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1														
2	0.143													
3	-1.000	-1.000												
4	0.259	-1.000	-1.000											
5	-1.000	-1.000	0.460	-1.000										
6	-1.000	-0.238	-0.048	0.298	0.298									
7	-1.000	0.200	0.333	-1.000	0.111	0.368								
8	-0.833	0.036	-0.375	-0.167	-0.167	0.211	0.000							
9	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	0.023	0.077	0.006						
10	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	0.023	-1.000	0.006	-1.000					
11	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-0.048	0.333	0.013	-1.000	-1.000				
12	0.259	-1.000	0.460	-1.000	-1.000	-0.362	0.111	-0.167	-1.000	-1.000	-1.000			
13	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000		
14	0.231	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	0.006	-1.000	-1.000	-1.000	0.316	-1.000	
15	-1.000	-1.000	0.444	-1.000	0.259	-0.048	0.333	-0.375	-1.000	-1.000	-1.000	0.259	0.444	-1.000
16	0.444	0.429	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	0.333	0.013	-1.000	-1.000	-1.000	0.460	-1.000	0.487 -1.000

从共同出现百分率 JI 值半矩阵图(图 1)可以看出,种对 6—8 和种对 14—16、3—5、6—7、7—8、3—12、1—14、12—14、3—15、13—15、1—16、12—16、14—16 的 JI 值均大于 0.4,说明这些种对的联结性较强;而种对 1—2、1—4、2—6、3—6、4—6、5—6、2—7、3—7、5—7、1—8、2—8、3—8、4—8、5—8、6—9、7—9、8—9、6—10、8—10、6—11、7—11、8—11、1—12、6—12、7—12、8—12、8—14、5—15、6—15、7—15、8—15、2—16、7—16、8—16 的 JI 值在 $0<JI<0.2$ 的范围内,其余种对的 JI 值为 0,说明这些种对之间联结程度不显著;大多数种对的 JI 值在 0.4 以下,说明种对之间联结程度不显著.而 Dice 指数与 Ochiai 指数的半矩阵图(图 2、图 3)均与 JI 指数半矩阵图在联结性上大体一致.

通过联结系数(AC)的半矩阵图(表 3)可知: $AC=-1$ 的种对有 73 对,占总种对数的 60.83%, $-1<AC<0.2$ 的种对数有 25 对,占总种对数的 20.83%, $0.2\leq AC\leq 0.4$ 的种对数有 14 对,占总种对数的 11.67%,而 $0.4<AC$ 的种对数有 8 对,占总种对数的 6.67%.朴树群落乔木树种种对间 AC 值总体趋向于负值,大部分 $=-1$,且 AC 大于 0 的种对中绝大部分的 $AC\leq 0.4$,说明朴树群落乔木层种对间的绝大部分呈现负关联,且正关联不明显.

将 χ^2 检验结合联结系数(AC)、Jaccard 指数、Dice 指数、Ochiai 指数进行分析,并参照表 1 可知,在 χ^2 检验中呈现显著或极显著关联的种对中,其 AC 值基本上达到最大-1 或 1, JI 、 DI 、 CI 都为 0 或接近 1,这都说明了结果的一致性.

3.4 种间协变

从 Spearman 半矩阵图(表 4)可以看出,共有 41 对物种之间表现出正关联,而有 79 对物种之间表现出负关联,正关联和负关联之间的比例为 0.52;而从 Pearson 半矩阵图(表 4)中可以看出,共有 33 对物种之间表现出正关联,而有 87 对物种之间表现出负关联,正关联和负关联之间的比例为 0.38. Spearman 秩相关所测得的正负关联要大于 Pearson 相关所测得的. Pearson 相关系数和 Spearman 秩相关系数所测得的正联结种对数均小于负联结种对数,且总体联结性表现为负联结不显著,这说明负联结的相对数值要大于正联结的相对数值.结合上面的分析和南京老山地区朴树林的实际情况来看, Spearman 秩相关要比 Pearson 相关更能反映该地区的种间联结.

表 4 朴树群落乔木优势种种间协变的相关系数														
Table 4 Interspecific covariation correlation coefficients of dominant species in tree layer of <i>Celtis sinensis</i> community														
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	0.088	0.575	0.030	-0.151	-0.511	-0.437	0.519	-0.258	-0.258	-0.382	0.415	-0.258	0.300	-0.015
2	-0.015		-0.138	-0.198	-0.165	-0.406	-0.073	0.251	0.138	-0.138	-0.205	-0.166	-0.138	0.588
3	0.588	-0.166		-0.159	0.076	-0.323	-0.097	-0.076	-0.111	-0.111	-0.165	0.087	-0.111	0.093
4	0.093	-0.247	-0.166		-0.189	0.072	-0.332	0.713	-0.159	-0.159	-0.236	-0.191	-0.159	0.180
5	0.180	-0.247	0.580	-0.247		-0.122	0.341	-0.418	-0.132	-0.132	0.522	-0.118	-0.132	-0.580
6	-0.580	-0.623	-0.406	0.277	-0.320		0.015	-0.266	-0.257	0.744	0.585	-0.318	-0.015	-0.265

续表 4 Table 4 continued

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
7	-0.265	0.180	0.196	-0.390	0.400	-0.157		-0.475	0.637	-0.232	0.036	-0.252	-0.232	-0.232	0.594
8	0.594	0.199	0.058	0.683	-0.294	-0.285	-0.423		-0.083	-0.186	-0.415	0.163	-0.436	0.177	-0.262
9	-0.262	0.580	-0.111	-0.166	-0.166	-0.290	0.588	-0.058		-0.111	-0.165	-0.133	-0.111	-0.111	-0.262
10	-0.262	-0.166	-0.111	-0.166	-0.166	0.522	-0.262	-0.174	-0.111		0.768	-0.133	-0.111	-0.111	-0.390
11	-0.390	-0.247	-0.166	-0.247	0.364	0.389	0.005	-0.415	-0.166	0.745		-0.198	-0.165	-0.165	0.663
12	0.663	-0.247	0.580	-0.247	0.253	-0.415	-0.083	0.182	-0.166	-0.166	-0.247		-0.232	0.980	-0.262
13	-0.262	-0.166	-0.111	-0.166	-0.166	0.174	-0.262	-0.522	-0.111	-0.111	-0.166	-0.166		-0.111	0.327
14	0.327	-0.166	-0.111	-0.166	-0.166	-0.174	-0.262	0.174	-0.111	-0.111	-0.166	0.745	-0.111		0.042
15	0.042	-0.319	0.500	-0.319	0.628	-0.157	0.092	-0.574	-0.214	-0.214	0.064	0.160	0.643	-0.214	
16	0.093	0.253	-0.166	-0.247	-0.247	-0.337	0.180	0.104	0.580	-0.166	-0.247	0.500	-0.166	0.745	0.093

注:左下角为 Pearson 积矩相关系数,右上角为 Spearman 秩相关系数.

4 讨论与结论

种间联结的测定方法有多种,主要有方差比率法(VR)、 χ^2 检验、关联指数和种间协变系数等^[1-3]. 本研究在南京老山国家森林公园内共设置朴树群落 10 块样地、40 个小样方、共计 4 000 m²,并对其中的乔木层优势种的种间联结采用多种方法进行测定. 结果发现:采用方差比率法和基于 2×2 联列表的 χ^2 检验可以较好地反映朴树群落优势种的总体联结性. 同时采用 3 个关联指数(Jaccard 指数、Ochiai 指数、Dice 指数)并结合联结系数(AC)可以较好地反映其优势种的种间关联度,这些不同指数得到的结果较为一致. 此外,采用 Pearson 积矩相关系数和 Spearman 秩相关系数对优势种之间的种间联结进行协变分析,结果发现 χ^2 检验只能作出定性判断,而协变分析能够进行定量分析. 另外,本文的研究结果还表明 Spearman 秩相关较 Pearson 相关系数具有更高的灵敏性,这一结果与简敏菲等^[16]研究对九连山常绿阔叶林 28 个乔木优势种群的种间关联性分析结果相一致. 因此,综合采用不同的测定方法^[4],将定性定量分析方法有机结合,可以更为有效地揭示森林群落中乔木物种的种间联结性.

种间联结在一定程度上反映了物种间的相互关系及其与环境因子的关系^[5,17]. 正联结通常表明不同物种对环境条件具有相似的需求或一个物种的生长为另一个物种的定居创造了适宜的条件,而负联结通常表明物种间对环境需求不同或者由于竞争而产生相互排斥. 本文的研究结果表明:朴树群落中 16 个乔木树种总体呈现负关联,正关联不明显,绝大多数种对无联结或联结不显著,且总体联结性表现为负联结不显著. 这表明朴树群落中乔木优势物种的分布较为独立,不同物种间的关系较为松散. 其主要原因在于朴树群落尚处在植物群落的进展演替阶段,不同物种的生态需求可能存在一定的差异. 如群落中朴树(8)和构树(4)的 *JI* 值仅 0.167,联结程度不显著. 这与野外调查中的观测结果相一致,构树往往生长于向阳山坡或林缘,而朴树大多见于沟谷或郁闭度较高的山坡生境. 因为朴树为喜光耐阴树种,深根系;而构树为喜光速生树种,浅根系. 该区地处北亚热带,其地带性植被类型为常绿、落叶阔叶混交林^[9]. 朴树群落等落叶阔叶林尚处在进展演替的后期阶段. 其次要原因在于朴树群落处于不稳定的演替阶段,可能易于受到外界环境因素的扰动而发生波动. 如当前朴树林乔木层优势物种尽管主要为演替后期的阔叶树种,如朴树、黄檀、化香、三角枫等. 但是其中还有马尾松等先锋演替树种,也有刺槐等外来落叶阔叶树种. 王林林等对该区朴树林群落稳定性的分析也表明,其群落处于不稳定之中^[8]. 大多数情况下,在相对稳定的群落中,其物种间的总体关联性趋于正相关^[18-19];而当群落处于不稳定阶段时,其总体关联性则趋于无关联或显著负关联.

通过对南京老山国家森林公园朴树群落种间关系的研究发现,目前该地区朴树群落处于进展演替阶段,群落尚不稳定,抵御自然灾害以及外来种入侵的能力较弱. 因此建议在朴树林生态恢复过程中,可以适当去除少量先锋树种或外来入侵种;人工抚育过程中可以合理种植一些生境需求相似,有相近生物学特性的树种. 这样,通过调节森林群落中植物种内种间竞争关系,从而增加其群落的稳定性,改善其生态系统的结构与功能.

[参考文献]

- [1] 王伯荪,彭少麟. 南亚热带常绿阔叶林种间联结测定技术研究:I. 种间联结测试的探讨与修正[J]. 植物生态学与地

- 植物学丛刊,1985,9(4):274-285.
- [2] SU S,LIU J,HE Z,et al. Ecological species groups and interspecific association of dominant tree species in Daiyun Mountain National Nature Reserve[J]. Journal of mountain science,2015,12(3):637-646.
- [3] 郭俊兵,狄晓艳,李素清. 山西大同矿区煤矸石山自然定居植物群落优势种种间关系[J]. 生态学杂志,2015,34(12):3327-3332.
- [4] 王秀云,朱汤军,徐高福. 千岛湖马尾松群落种群生态位与种间联结[J]. 浙江林业科技,2015,35(3):36-42.
- [5] 李木楠,李志娟,李素清,等. 山西阳泉矿区煤矸石山自然定居植物群落优势种种间关系[J]. 应用与环境生物学报,2015,21(6):143-149.
- [6] FU L G,XIN Y Q,WHITTEMORE A. Ulmaceae[M]//WU Z Y,PETER R. Flora of China. Beijing:Science Press,2003.
- [7] 高邦权,张光富. 南京老山国家森林公园朴树种群结构与分布格局研究[J]. 广西植物,2005,25(5):406-412.
- [8] 王林林,唐坚强,张光富,等. 南京朴树林竞争强度及其群落稳定性[J]. 生态与农村环境学报,2012,28(6):654-660.
- [9] 赵清,丁登山,阎传海. 南京幕燕山地森林植被恢复重建研究[J]. 地理研究,2003,22(6):742-750.
- [10] PANETTA F D. Seedling emergence and seed longevity of the tree weeds *Celtis sinensis* and *Cinnamomum camphora*[J]. Weed research,2001,41(1):83-95.
- [11] YANG Q,WEI S,SHANG L,et al. Mycorrhizal associations of an invasive tree are enhanced by both genetic and environmental mechanisms[J]. Ecography,2015,38(11):112-118.
- [12] 徐满厚,刘敏,翟大彤,等. 植物种间联结研究内容与方法评述[J]. 生态学报,2016,36(24):待刊. DOI:10.5846/stxb201505311092.
- [13] 凌云,张光富,龚滨. 南京老山国家森林公园植物区系及其与邻近地区的关系[J]. 安徽农业科学,2010,38(36):20938-20942.
- [14] LI W,ZHANG G F. Population structure and spatial pattern of the endemic and endangered subtropical tree *Parrotia subaequalis*(Hamamelidaceae)[J]. Flora,2015,212:10-18.
- [15] 宋永昌. 植被生态学[M]. 上海:华东师范大学出版社,2001.
- [16] 简敏菲,刘琪璟,朱笃,等. 九连山常绿阔叶林乔木优势种群的种间关联性分析[J]. 植物生态学报,2009,33(4):672-680.
- [17] 周刘丽,张晴晴,赵延涛,等. 浙江天童枫香树群落不同垂直层次物种间的联结性与相关性[J]. 植物生态学报,2015,39(12):1136-1145.
- [18] 张明霞,王得祥,康冰,等. 秦岭华山松天然次生林优势种群的种间联结性[J]. 林业科学,2015,51(1):12-21.
- [19] 康冰,刘世荣,温远光,等. 广西大青山南亚热带次生林演替过程的种群动态[J]. 植物生态学报,2006,30(6):931-940.

[责任编辑:黄 敏]