

山西历山国家级自然保护区千金榆群落种间分离研究

张海博¹, 焦磊², 张殷波¹, 张峰^{1,2*}

(1. 山西大学黄土高原研究所, 太原 030006; 2. 山西大学生命科学与技术学院, 太原 030006)

摘要: 对山西历山国家级自然保护区普通沟和西峡的千金榆 (*Carpinus cordata*) 群落进行野外调查, 共记录了 40 个样方, 44 个物种, 组成 946 个种对。利用最近邻体法构造 $N \times N$ 最近邻体列联表, 以 χ^2 检验和种间分离指数 S 作为区分指标, 研究了千金榆群落的种间分离情况。结果表明: (1) 946 个种对中呈现随机毗邻的最多, 有 507 个种对, 占总数的 53.59%; 呈现正分离的有 349 个种对, 占总数的 36.89%; 而呈现负分离种对最少, 只有 90 对, 占总数的 9.52%。(2) 群落的建群种或优势种因为有较强的生存能力和竞争能力, 往往表现出正分离, 例如千金榆、小叶鹅耳枥 (*Carpinus turczaninowii*)、五角枫 (*Acer mono*)、葛罗槭 (*Acer grosseri*) 等有较强生存能力的物种与大多数的物种发生正分离; 而六道木 (*Abelia biflora*)、东北茶藨子 (*Ribes mandshuricum*)、小花溲疏 (*Deutzia parviflora*)、美蔷薇 (*Rosa bella*) 和紫花卫矛 (*Euonymus porphyries*) 等群落中的伴生种或小灌木, 与部分物种形成负分离。其余物种之间发生随机毗邻的较多。(3) 对千金榆群落 44 $\times$ 44 列联表进行全面分离, 结果表明群落内的 44 个物种相互交错分布, 不是全面分离。此外, 种间分离的结果也揭示该群落处于演替初期, 受岩石风化崩塌的影响较严重, 人为干扰因素较轻。

关键词: 千金榆; 种间分离; χ^2 检验; 最近邻体法; $N \times N$ 最近邻体列联表; 半矩阵图; 历山国家级自然保护区
中图分类号: Q948.15 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-0837 (2011) 06-0668-07

Interspecific Segregation in *Carpinus cordata* Communities in Lishan Nature Reserve, Shanxi

ZHANG Hai-Bo¹, JIAO Lei², ZHANG Yin-Bo¹, ZHANG Feng^{1,2*}

(1. Institute of Loess Plateau, Shanxi University, Taiyuan 030006, China; 2. School of Life Science, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

Abstract: Interspecific relationships are an important element affecting community structure and function. To explore the pattern of interspecific segregation in *Carpinus cordata* communities, 40 quadrates were investigated in Lishan Nature Reserve, Shanxi, with a distribution map drawn for all trees and shrubs with the DBH ≥ 5 cm for tree or basal diameter for shrubs. The nearest neighbors of each individual were identified using nearest neighbor method. The interspecific segregation for all species in these communities was studied by using the χ^2 -test, an $N \times N$ nearest-neighbor contingency table and a 2×2 nearest-neighbor contingency sub-table. Based on the value to divide S index, interspecific segregation indicated that there were 349 species-pair positive segregations, 90 species-pair negative segregations, and 507 species-pair random segregations, accounting for 36.89%, 9.52%, and 53.59%, respectively. The semi-matrix showed that the dominant species often showed positive segregation, and had a stronger viability and competitiveness, such as *Carpinus cordata*, *Carpinus turczaninowii*, *Acer mono* and *Acer grosseri*. The dominant and companion species usually showed negative segregation, with fewer individuals and lower coverage, such as *Abelia biflora*, *Ribes mandshuricum* and *Rosa bella*. The result of the χ^2 test for the $N \times N$ nearest-neighbor contingency table

收稿日期: 2011-03-04, 修回日期: 2011-05-25。

基金项目: 山西省自然科学基金 (2006011077, 2011011031-1); 山西省留学基金 (20100012); 科技部科技基础性工作专项项目 (2011FY110300)。

作者简介: 张海博 (1985 -), 男, 硕士研究生, 主要从事植被数量生态方面的研究 (E-mail: goodboyzhanghaibo@163.com)。

* 通讯作者 (Author for correspondence. E-mail: fzhang@sxu.edu.cn)。

indicated that 44 species in the communities demonstrated mosaic distribution and overall non-segregation. Moreover, the results of species segregation indicated that the *Carpinus cordata* communities were in the early stage of succession, which was consistent with the fact that the communities were unstable due to the disturbance of natural rock collapse and human activities.

Key words: *Carpinus cordata*; Interspecific segregation; χ^2 -test; Nearest-neighbor's method; Nearest-neighbor contingency table; Semi-matrix; Lishan Nature Reserve

种间分离是用来描述两个种或几个种的个体交错分布的程度^[1]。种间分离的研究对于揭示群落物种间的相互作用和群落组成具有重要的意义^[2]。国内有关种间分离的研究主要有戴小华等^[3]对霸王岭热带雨林的研究,张殷波等^[4]对翅果油树群落的研究,柴勇等^[6]对莱阳河自然保护区岭罗麦、光序肉实树群落的研究,高昆等^[6]对历山山核桃群落的研究,蔡冰玲等^[7]对梅花山自然保护区拟赤杨群落的研究等。而国外对于种间分离的研究仅有对同种个体的母-幼树之间^[8]、雌-雄树之间^[9]两个方面。我国植物群落类型众多,南北差异较大,因此,可以加大不同植物群落种间分离的研究力度,这对于揭示群落内物种之间的相互作用、了解群落的组成与结构、掌握群落的发展与动态等方面有着重要的意义。

目前关于千金榆(*Carpinus cordata*)的研究较少,主要集中在群落数量分类方面^[10]和植被分布方面^[11],针对千金榆的种间分离研究尚未见报道。我们以历山国家级自然保护区普通沟和西峡分布的千金榆群落作为研究对象,采用最近邻体法和 $N \times N$ 最近邻体列联表法,通过 χ^2 检验和分离指数的计算,对其群落进行种间分离的研究,以期为了解千金榆群落的结构、演替阶段以及生物多样性保护提供理论依据。

1 研究区域自然环境概况

历山国家级自然保护区位于山西省中条山东段,地处沁水、翼城、阳城和垣曲四县交界处,北纬 $35^{\circ}16' \sim 35^{\circ}27'$,东经 $111^{\circ}51' \sim 112^{\circ}30'$,主峰舜王坪海拔2358 m^[12]。该保护区属于暖温带季风型大陆性气候,年均气温 13.5°C ,年积温 4900°C ,年均无霜期236 d, $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的有效积温 4281°C ,年降水量548.1 mm^[13]。

历山国家级自然保护区由于受地形、气候、海拔高度、坡向等的影响,植被类型多样,植物资源丰

富^[14],植被类型以落叶阔叶天然次生林为主,主要森林群落类型有辽东栎(*Quercus liaotungensis*)林、栓皮栎(*Q. variabilis*)林、鹅耳枥(*Carpinus cordata*)林、山杨(*Populus davidiana*)林、油松(*Pinus tabulaeformis*)林、华山松(*Pinus armandi*)林、侧柏(*Platycladus orientalis*)林等。灌丛群落类型主要有黄刺玫(*Rosa xanthina*)灌丛、虎榛子(*Ostryopsis davidiana*)灌丛、黄栌(*Cotinus coggygria* var. *cinerea*)灌丛、连翘(*Forsythia suspense*)灌丛等。草本群落类型主要有紫羊茅(*Festuca rubra*)草丛、羊胡子草(*Aneurolepidium chinensis*)草丛、苔草(*Carex* spp.)草甸以及白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)草丛等^[15]。

2 研究方法

2.1 野外调查方法

2010年7月在历山国家级自然保护区内的普通沟和西峡进行野外调查,随机选择40个乔木群落样方(面积为 $10\text{ m} \times 10\text{ m}$),对样方内胸径 $\geq 5\text{ cm}$ 或基径 $\geq 1\text{ cm}$ 的所有乔木或灌木的种名、胸径、高度、坐标以及群落总盖度、乔木层盖度和灌木层盖度等进行测量和记录。

在绘制样方中乔木和灌木分布图的过程中,需要先固定某一个植株为基株,然后测量植株之间的距离,最后根据每一个植株的坐标,完成分布图的绘制。

2.2 数据处理

本实验采用最近邻体法对样方数据进行分析,将样方左上角的第1棵植株作为分布图的第1个基株,然后按照最近邻体法,测量基株与其附近所有个体的距离,最近的个体将成为第2个基株;依此类推,最后将样方内所有的植株连起来,完成分布图的绘制。

2.2.1 $N \times N$ 最近邻体列联表

$N \times N$ 最近邻体列联表在研究多物种群落的最

近邻体关系方面,表现得更为方便和准确。在 Pielou^[1] 最早提出的 2×2 最近邻体列联表中,基株是包括群落中所有个体的,在研究多物种群落的种间分离时,需要将样方内所有的植株依次定义为基株,研究其最近邻体种对。这样就将 Pielou 的 2×2 最近邻体列联表进行了一个简单的扩展,得到了一个 N×N 最近邻体列联表(表 1)^[2]。当计算两个物种之间的分离指数时,再对 N×N 最近邻体列联表进行相应的截取,即得到相应物种的 2×2 最近邻体列联表(表 2)。

表 1 N×N 最近邻体列联表

Table 1 N×N nearest-neighbor contingency table

基株 Base plant	最近邻体 Nearest neighbor				总计 Total
	S ₁	S ₂	...	S _k	
S ₁	n ₁₁	n ₁₂	...	n _{1k} (n _{1j})	f ₁
S ₂	n ₂₁	n ₂₂	...	n _{2k} (n _{2j})	f ₂
...	...	...	...	...	...
S _k	n _{k1}	n _{k2}	...	n _{kk}	f _k
总计 Total	S ₁	S ₂	...	S _k	N

注: N-样方内所有个体的总和; S_k-样地中总物种数 k(即 S₁, S₂……S_k); n_{ij}-种 i 个体的最近邻体是种 j 个体共出现的次数(即 n₁₁, n₁₂……n_{1k}); n_j-种 j 个体的最近邻体是种 i 的个体的数目(即 n₂₁, n₂₂……n_{2k}); f_k-种 i 的个体数(即 f₁, f₂……f_k)。

Notes: N-The number of all individuals in the samples; S_k-The number of species in the plots (e.g. S₁, S₂……S_k); n_{ij}-The number of species i whose nearest neighbor is an individual of species j (e.g. n₁₁, n₁₂……n_{1k}); f_i-The individuals number of species i.

表 2 2×2 最近邻体列联截表

Table 2 2×2 nearest-neighbor contingency sub-table

基株 Base plant	最近邻体 Nearest neighbor		总计 Total
	S _i	S _j	
S _i	n _i	n _{ij}	n _i + n _{ij}
S _j	n _j	n _{ji}	n _j + n _{ji}
总计 Total	n _i + n _{ij}	n _j + n _{ji}	N=n _i + n _{ij} + n _j + n _{ji}

注: S_i-物种 i; S_j-物种 j; n_i-种 i 个体的最近邻体是种 i 的个体的数目; n_{ij}-种 i 个体的最近邻体是种 j 的个体的数目; n_j-种 j 个体的最近邻体是种 i 的个体的数目; n_{ji}-种 j 个体的最近邻体是种 j 的个体的数目; N-样方内所有个体的总和。

Notes: S_i-Species i; S_j-Species j; n_i-The number of species i whose nearest neighbor is an individual of species i; n_{ij}-The number of species i whose nearest neighbor is an individual of species j; n_j-The number of species j whose nearest neighbor is an individual of species i; n_{ji}-The number of species j whose nearest neighbor is an individual of species j; N-The number of all individuals in the sub-table.

2.2.2 χ^2 检验

通常用 2×2 列联表进行 χ^2 检验(经过连续性矫正)来判断样方内的两个物种是否存在分离,即:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^m \frac{(|Q_i - T_i| - 0.5)^2}{T_i^2} \quad df = 1 \quad (1)$$

式中 O_i 为 n_i 实测值, m 为实测值或理论值的个数(针对此处的 2×2 列联表, m=4), T_i 为 n_i 的理论值, df 表示 2×2 列联表的自由度。

如果式中 (n_i, n_{ij}, n_j, n_{ji}) 的任一理论值 < 5 时, 需要利用 2×2 列联表进行精确检验, 即:

$$P(k) = \frac{(n_{ii} + n_{ij})!(n_{ji} + n_{jj})!(n_{ii} + n_{jj})!(n_{ij} + n_{ji})}{N! \, n_{ii}! \, n_{ij}! \, n_{ji}! \, n_{jj}!} \quad (2)$$

式中各字母的意义同表 2。对于任意一个 2×2 列联表作精确检验时, 都需要先按公式(2) 求出 P 值。然后保持行、列总数 (n_{ii} + n_{ij}, n_{ji} + n_{jj}, n_{ii} + n_j, n_{ij} + n_{ji}) 不变, 将表中最小的值 (min {n_{ii} + n_{ij}, n_{ji} + n_{jj}, n_{ii} + n_j, n_{ij} + n_{ji}}) 逐次降低, 直到最小的值降为 0。在每降低一次最小值时, 都需要按照公式(2) 计算一次 P 值。因此得到的 P 值可能会有 P(1)、P(2)、P(3)、……P(k)……。这样, 2×2 列联表精确检验的结果就是 $P = \sum_{k=1}^m P(k)$ ^[2]。

2.2.3 种间分离指数

与对称种群一样, 在不对称种群中, 也可以出现种的随机混合。检验随机混合时, 每个植物都认为有两种属性: 它本身的种及其最近邻体的种。如果这两种属性是独立的, 则两个种是不分离的。在计算分离指数时, 采用 Pielou^[1] 的分离指数来计算种间的分离程度^[16], 即分离指数为:

$$S = 1 - \frac{N_{ij}(n_{ij} + n_{jj})}{(n_{ii} + n_{ij})(n_{ij} + n_{jj}) + (n_{ji} + n_{jj})(n_{ii} + n_{j})}$$
$$= \frac{2(n_{ii}n_{jj} - n_{ij}n_{ji})}{(n_{ii} + n_{ij})(n_{ij} + n_{jj}) + (n_{ji} + n_{jj})(n_{ii} + n_{j})} \quad (3)$$

分离指数 S 的数值变化范围在 -1 和 +1 之间。结合公式(2) 分析, 当 P=1, n_{ii}n_{jj}-n_{ij}n=0 时, -1 < S < 0, 此时存在 3 种情况: ① n_{ii}=n_j=n_{ij}=n_{ji}=0, S=-1 时, 可以得出两个物种之间是随机毗邻的结果; ② n_{ii}=n_j=n_{ij}=0, 且 n_{ij}≠0 或者 n_{ij}=n_{ji}=n_j=0 且 n_{ii}≠0 时, -1 < S < 0, 可以得出两物种发生完全正分离的结果; ③ n_{ii}、n_{jj}、n_{ij} 和 n_{ji} 中有任何两个数值为 0 时, -1 < S < 0, 可以得出两个物种发

生负分离的结果。

当 $0.05 < P < 1$ 时：①若 $n_{ij}n_{ji} - n_{ij}n_{ji} > 0$, $0 < S < 1$, 这种情况下, 两个物种是发生正分离；②若 $n_{ij}n_{ji} - n_{ij}n_{ji} < 0$, $-1 < S < 0$, 这种情况下, 两个物种是发生负分离的；③若 $n_{ij}n_{ji} - n_{ij}n_{ji} = 0$ 时, $S = 0$, 此时两物种随机毗邻。

当 $P < 0.05$, $0 < S < 1$, 且 $n_{ij}n_{ji} - n_{ij}n_{ji} > 0$ 时, 此时两物种是随机毗邻^[6]。

计算分离指数时, 本研究将 n_{ij} 加权为 0.0001, 这样既可以防止公式中出现分母为 0 的情况, 还可以进一步降低加权值对分离指数的影响^[17]。

2.2.4 $N \times N$ 种对间的全面分离指数

根据张殷波等^[4]提出的全面分离这一概念, 在对群落内两两物种之间的分离规律分析之后, 用 χ^2 检验对 44×44 最近邻体列联表进行全面分析和处理, 通过 χ^2 检验的结果来判断群落中所有物种间的种间分离规律是否符合全面分离。

3 结果与分析

3.1 χ^2 检验结果和分离指数 S 的关系

通过对 2×2 列联表的 χ^2 值进行计算, 结果表明, 在 44 个物种组成的 946 个种对中, 有 905 对存在显著分离, 有 41 对存在不显著分离。

利用 χ^2 检验的结果对分离指数 S 进行区间的划分, 得到表 3, 即: 千金榆群落中存在正分离的种对有 349 对, 存在负分离的种对有 90 对, 而随机毗邻的种对有 507 对。

表 3 千金榆群落 44 种植物种间分离的类型和比例
Table 3 Types and proportion of interspecific segregation of 44 species in *Carpinus cordata* communities, Lishan Mountains

类型 Type	种对数 Number of species-pair	比例 (%) Proportion
正分离 Positive segregation	349	36.89
负分离 Negative segregation	90	9.52
随机毗邻 Random segregation	507	53.59

3.2 两两物种间的分离情况

通过种间分离的结果绘制半矩阵图, 结果见图 1。由图 1 可以看出, 千金榆、小叶鹅耳枥 (*Carpinus turczaninowii*)、五角枫 (*Acer mono*)、葛罗槭 (*Acer grosseri*) 和槲栎 (*Quercus aliena*) 与大多数种发生正分离, 仅有唐古特忍冬 (*Lonicera tanguti-*

ca) 和黄心子 (*Euonymus macropterus*) 两个种没有与其他种形成正分离。北京花楸 (*Sorbus discolor*) 仅与小叶鹅耳枥、五角枫、山杨、漆树 (*Toxicodendron vernicifluum*) 和少脉槲 (*Tilia paucicostata*) 形成负分离, 而与其他物种形成正分离。木姜子 (*Litsea pungens*)、老鹳龄 (*Styrax hemsleyana*)、暴马丁香 (*Syringa reticulate*)、茶条槭 (*Acer ginnala*)、照山白 (*Rhododendron micranthum*)、接骨木 (*Sambucus williamsii*) 等均不与其他种发生负分离。仅有鞘柄菝葜 (*Smilax stans*) 不与其他物种随机毗邻。唐古特忍冬和黄心子 2 个种与其他种发生随机毗邻。其余多数种之间发生随机毗邻的较多, 随机毗邻占总数的 53.59%。

从各个物种在群落中的地位和作用角度分析, 群落的优势种或建群种的优势在于它们的个体盖度较大, 优势度较大, 故优势种或建群种间多表现为正分离。而群落中的优势种和一些伴生种, 尤其是乔木和林下灌木往往形成负分离, 主要是由于伴生种相对于优势种来说, 个体少、盖度小, 并且与优势种具有相似的生境要求, 因此, 在激烈的竞争下, 它们只能通过互相交错分布来充分利用各种环境资源, 这样才能保证个体正常的生长和发育^[18]。

3.3 所有种对之间的总体分离情况

对 44×44 列联表进行了 χ^2 检验, 结果为: $\chi^2 = 1.608 \times 104$, $df = 1849$, $\chi^2 > \chi^2_{0.01}$ 。因此, 可以认为样方中的 44 个物种相互随机毗邻, 即样方中的所有种对是总体不分离的。

4 讨论

种间分离主要是描述几个物种在空间相互交错分布的程度, 它的测定仅仅以两两邻体的距离为基础, 这样就可以基本消除样方大小、间隔甚至形状等因素对实验结果的影响, 因此它可以较其他方法更准确、客观地反映群落中各物种之间的空间关系。研究种间分离的常见方法主要有最近邻体列联表^[19]、最近邻体距离法^[20]和 $K(t)$ 方程法^[21]等 3 种方法。在研究单个物种的分布格局时, 较常用最近邻体距离法, 而 $K(t)$ 方程法通常用于分析任意尺度下的种群空间分布格局以及种间关系^[2]。如果是研究两物种的种间分离, 最好使用最近邻体列联表。若是研究多物种群落的种间分离, 可能 $N \times N$ 最近邻体列联表方法更适合。本研究采用的是 $N \times N$

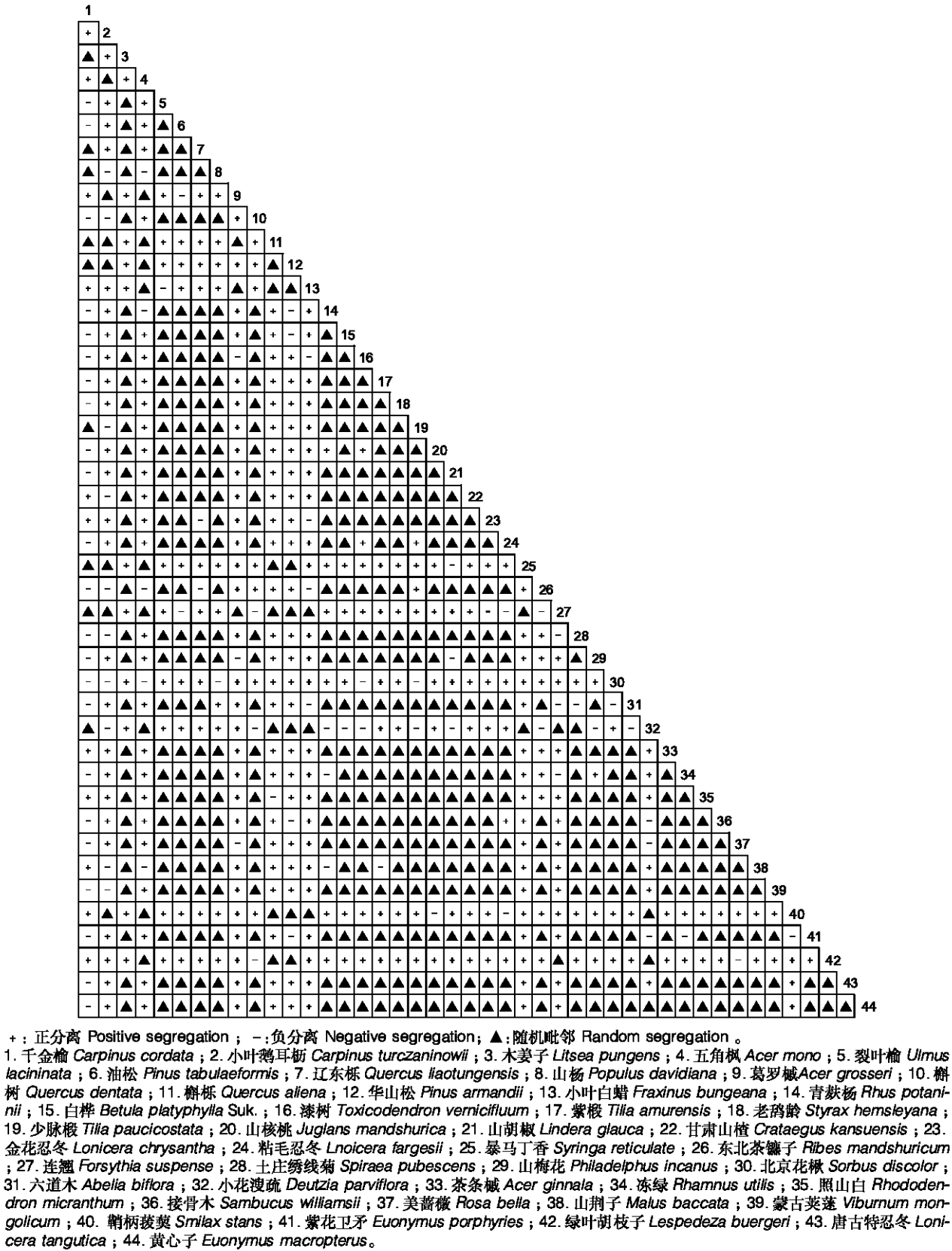


图 1 千金榆群落 44 个物种的种间分离半矩阵图
Fig.1 Semi-matrix of interspecific segregation of 44 species in *Carpinus cordata* communities, Lishan Nature Reserve, Shanxi

最近邻体列联表法,并将样方内出现的乔木和灌木一起分析,这样既可以详实的记录样方内所有满足实验条件的个体,又可以充分地了解千金榆群落的组成结构和类型,进而真实有效的反映物种的空间格局和种间分离关系。因此这样的分析结果可能更符合实际群落中的情况。

通过对一个群落的种间分离情况的分析,可以了解该群落的演替过程^[4]。在群落演替的早期,出现正分离或负分离的情况偏多。正分离可能是同种植物聚集分布造成的,比如植物的种子散播在母株附近,这样就容易形成聚集分布;而负分离可能是由于不同植物的种子传播到了一起,聚集萌发。随着群落的发展,竞争以及自然稀疏作用都会导致群落发生相应的改变,因此相邻物种的种类、数目以及距离都会发生变化。在群落演替的稳定阶段,各物种间达到相应的平衡,种间关系趋于稳定,这样负分离就会减少^[1]。本研究的946个种对中,随机毗邻的种对占优势(53.59%),正分离的种对次之(36.89%),负分离的种对最少(9.52%)。这与Pielou^[1]、戴小华等^[3]、张殷波等^[4]、高昆等^[6]对不同植被类型种间分离的研究结果相似。因此本研究结果表明,历山国家级自然保护区的千金榆群落中正分离的种对所占比例相对较大,群落处于演替的初期阶段。

导致千金榆群落处于演替初期的原因主要有:(1)千金榆群落处于历山国家级自然保护区的沟谷之中,由于山体多为沙岩,岩体结构较差,加之岩石风化程度较高,常有崩塌发生。通过野外调查发现,样地内地表几乎为崩塌掉落的岩石所覆盖,不利于植物种子的萌发。林下灌木层和草本层盖度较低,种群密度也较低。由于岩体的崩塌,掉落的岩石常常会砸坏或砸死植物的幼苗。因此,群落的稳定性较差。(2)由于千金榆群落距旅游步道较近,常有游人进入千金榆群落,游人的践踏也是干扰群落的因素之一。加之,保护区的居民历史上形成的放牧习惯,牛羊的啃食也是造成植物幼苗生长困难的另一个重要因素。

种间分离是多因素联合作用的结果,常见的影响因素主要包括环境异质性、种子的散布格局、自然或人为干扰、种间与种内的相互作用以及物种的生物学特性等^[22-24]。对半矩阵图进行研究可以得出,样方中两个具有不同生境需求的物种主要发生

正分离,相对耐荫的植物如千金榆、小叶鹅耳枥、冻绿(*Rhamnus utilis*)和喜光的青麸杨(*Rhus potaninii*)以及甘肃山楂(*Crataegus kansuensis*)之间发生正分离的居多;而分布在相同或相似生境的物种往往发生负分离,例如油松、小叶鹅耳枥、山胡椒、土庄绣线菊(*Spiraea pubescens*)、美蔷薇(*Rosa bella*)、蒙古荚蒾(*Viburnum mongolicum*)等物种之间发生负分离的占多数。从生态位的角度看,生态位相似的物种之间容易发生正分离,尤其是一些乔木或大灌木之间,例如千金榆和葛罗槭、油松和榉栎、裂叶榆和华山松、山胡椒(*Lindera glauca*)和北京花楸等种对之间为正分离;而生态位互补的种之间易发生负分离,主要是一些乔木与林下灌木之间,如五角枫和东北茶藨子(*Ribes mandshuricum*)、葛罗槭和山梅花(*Philadelphus incanus*)、榉树(*Quercus dentata*)和绿叶胡枝子(*Lespedeza buergeri*)等种对之间发生负分离。总的来看,物种本身的生物学特性以及环境异质所导致的生态位不同可能是影响种间分离的主要因素。如果可以从种子散布格局、生态位的分化、生态种组以及种内和种间相互作用(正、负反馈调节)等角度研究群落的种间分离,将有助于解释物种间的空间格局和种间关系。

致谢:野外调查工作得到刘明光、廉凯敏、陈姣、刘莹等及历山国家级自然保护区管理局的大力协助,数据处理工作得到李博等同学的帮助,在此一并致谢!

参考文献:

- [1] Pielou E C. Mathematical Ecology[M]. New York: John Wiley & Sons, 1977: 1-385.
- [2] 张金屯. 植被数量生态学方法[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1995: 87-89.
- [3] 戴小华, 余世孝, 练璐藩. 海南岛霸王岭热带雨林的种间分离[J]. 植物生态学报, 2003, 27(3): 380-387.
- [4] 张殷波, 张峰. 翅果油树群落的种间分离[J]. 生态学报, 2006, 26(3): 737-742.
- [5] 柴勇, 李玉媛, 司马永康. 莱阳河自然保护区岭罗麦、光序肉实树群落中树种的种间分离[J]. 云南植物研究, 2005, 27(2): 149-155.
- [6] 高昆, 张峰. 历山山核桃群落种间分离研究[J]. 生态学报, 2008, 28(4): 1601-1607.
- [7] 蔡冰玲, 吴承祯, 洪伟, 魏鑫. 梅花山自然保护区拟赤杨群落的种间分离[J]. 应用与环境生物学报,

- 2010, 16(2): 154–157.
- [8] Hamill D N, Wright S J. Testing the dispersion of juveniles relative to adults: a new analytic method [J]. *Ecology*, 1986, 67: 952–957.
- [9] Bawa K S, Opler P A. Spatial relationships between staminate and pistillate plants of dioecious tropical forest trees [J]. *Evolution*, 1977, 31: 64–68.
- [10] 史作民, 刘世荣, 程瑞梅, 蒋有绪. 河南宝天曼植物群落数量分类与排序 [J]. 林业科学, 2000, 36(6): 20–27.
- [11] 郑敬刚, 张有福, 王云, 董东平. 太行山中段植被分布特征及其多样性研究 [J]. 河南科学, 2009, 27(3): 292–294.
- [12] 卢景龙. 历山自然保护区珍稀濒危植物及其保护 [J]. 山西大学学报: 自然科学版, 2009, 32(3): 483–486.
- [13] 垣曲县地方志编纂委员会. 垣曲县志 [M]. 北京: 中华书局, 2006: 8–12.
- [14] 王惠玲, 李秀芬. 山西历山野生植物资源研究 [J]. 山西大学学报: 自然科学版, 2005, 28(4): 436–438.
- [15] 王建军. 历山自然保护区野生药用植物资源研究 [J]. 山西大学学报: 自然科学版, 2010, 33(1): 152–156.
- [16] Reich R M, Davis R. Quantitative spatial analysis [M]. Fort Collins: Colorado State University, 1998: 1–420.
- [17] 王伯荪, 余世孝, 彭少麟, 等. 植物群落学实验手册 [M]. 广州: 广东高等教育出版社, 1996.
- [18] 杨持. 生态学 [M]. 第2版. 北京: 高等教育出版社, 2008.
- [19] Pielou E C. Segregation and symmetry in two—Species populations as studied by nearest neighbor Relationships [J]. *J Ecol*, 1961, 49: 255–269.
- [20] Diggle P J. Statistical analysis of spatial point patterns [M]. London: Academic Press, 1983: 1–148.
- [21] Piplely B D. Spatial statistics [M]. New York: Wiley, 1981.
- [22] Law R, Mclellan A, Mahdi A. Spatiotemporal processes in calcareous grass land [J]. *Plant Spec Biol*, 1993, 8: 175–193.
- [23] Coomes D A, Rees M, Turnbull L. Identifying aggregation and association in fully mapped spatial data [J]. *Ecology*, 1999, 80: 554–565.
- [24] Packer A, Clay K. Soil pathogens and spatial patterns of seedling mortality in a temperate tree [J]. *Nature*, 2000, 404: 278–281.

(责任编辑: 张平)