

DOI: 10.5846/stxb201502040284

王焯, 秦浩, 董刚, 秦晓娟, 赵小娜, 张峰. 山西油松林分类多样性. 生态学报, 2016, 36(20): - .

Wang Y, Qin H, Dong G, Qing X J, Zhao X N, Zhang F. Taxonomic diversity of *Pinus tabulaeformis* communities in Shanxi. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(20): - .

山西油松林分类多样性

王 焯¹, 秦 浩¹, 董 刚^{1,2}, 秦晓娟², 赵小娜¹, 张 峰^{1,2,*}

1 山西大学黄土高原研究所, 太原 030006

2 山西大学生命科学学院, 太原 030006

摘要: 基于物种分类系统关系的分类学多样性能反映群落内物种分类学之间的差异, 而且可以间接反映生态系统或群落是否处于退化阶段。与传统的物种多样性指数相比, 分类学多样性指数对不同的取样方法和大小具有较强的稳定性。以山西油松林为研究对象, 在山西省范围内选取 113 个样地进行植被调查, 并结合历史资料和相关文献整理了植物名录, 野外共记录植物 357 种, 隶属于 3 门 4 纲 36 目 71 科 227 属。植物科内属、种的组成差异较大, 其中含属、种最多的科是菊科, 分别为 31 属和 50 种, 含种最多的属为蒿属 (*Artemisia* 11 种)。选取平均分类学差异指数 (Δ^+) 和分类学差异变异指数 (Λ^+) 作为度量群落分类学多样性的指标, 同时分析了分类学多样性指数与环境因子的关系, 研究结果表明: 113 个样地的 Δ^+ 值大都位于 Δ^+ 理论平均值上方 (89.5%); Λ^+ 值都位于 Λ^+ 理论平均值上方, 这表明山西油松林物种组成的亲缘关系较远, 分属不同的分类单元; 群落内物种分类单元的均匀度较差, 即物种主要集中在几个大的分类单元内, 如菊科、蔷薇科、豆科和禾本科等。对分类学多样性指数影响最大的是群落结构因子 (胸径、乔木密度和群落物种数), 其次是微地形因子 (坡向和坡位)。土壤中的全氮和有机碳与 Δ^+ 呈极显著正相关 ($P < 0.01$)。宏观地形因子 (纬度和海拔) 与 Δ^+ 和 Λ^+ 相关性不显著 ($P > 0.05$)。通过对山西油松林物种的 Δ^+ 和 Λ^+ 研究表明, 山西油松林大多处于平稳的成长阶段, 林内物种组成相对稳定, 存在一定的物种分类差异, 但主要集中在几个大的分类单元。

关键词: 山西; 油松林; 平均分类学差异指数 (Δ^+); 分类学差异变异指数 (Λ^+)

Taxonomic diversity of *Pinus tabulaeformis* communities in Shanxi

WANG Ye¹, QIN Hao¹, DONG Gang^{1,2}, QING Xiaojuan², ZHAO Xiaona¹, 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: Taxonomic diversity based on the phylogenetic system directly reflects species diversity with evolutionary information, considering evolutionary and taxonomic hierarchies among species in a community. It can also indirectly indicate if community structure and components are affected by habitat and disturbance. Thus, it can indicate whether a community or ecosystem is degraded. Furthermore, taxonomic diversity is robust and minimally influenced by different sampling methods and sampling areas compared to the traditional species diversity indices (e.g., Shannon index). *Pinus tabulaeformis* is an important specie of timbers and ecological trees in North China, and distributed widely in Shanxi. To explore the taxonomic diversity of *P. tabulaeformis* communities in Shanxi, we investigated 113 stands in Shanxi, in which 357 species belonging to 227 genera, 71 families, 36 orders, 4 classes, and 3 phyla were recorded. The compositions of genera and species within families exhibited differences. The dominant family including the most genera and species was

基金项目: 山西省自然科学基金项目 (2013011037-1); 山西省回国留学人员科研项目 (20100012); 科技部科技基础性工作专项 (2011FY110300)

收稿日期: 2015-02-04; **网络出版日期:** 2015-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: fzhang@sxu.edu.cn

Compositae (31 genera and 50 species). Most of the species belonged to the genus *Artemisia* (11 species). In addition, we selected the average taxonomic difference index (Δ^+) and taxonomic difference variation index (Λ^+) to measure taxonomic diversity, then discussed the relationships between taxonomic diversity indices and environmental factors. The results indicated that the expected values of Δ^+ and Λ^+ were 53 and 280, respectively. Based on the distributions of 113 stands in the confidence funnel, the Δ^+ value of 89.5% and all the Λ^+ values were above the expected values of Δ^+ and Λ^+ , which suggested that species composition of the *P. tabuliformis* communities had more distant relatives and belonged to different taxa. The evenness of *P. tabuliformis* communities was low, given that most species belonged to a small number of families (e.g., Compositae, Rosaceae, Leguminosae, Gramineae). The community factors (DBH, density, and number of species) and microtopography factors (aspect and slope position) were the most important factors influencing the taxonomic diversity index, followed by macrotopography factors (latitude and altitude). DBH had a highly significant and positive correlation with Δ^+ and Λ^+ ($P < 0.01$); the relationship between slope, aspect, and Δ^+ was highly significant ($P < 0.01$). The slope position had a significant correlation with Δ^+ ($P < 0.05$) and highly significant correlation with Λ^+ ($P < 0.01$). The relationships between Δ^+ , total nitrogen, and soil organic carbon were highly significant and positive correlations ($P < 0.01$). The correlation of macrotopography factors with Δ^+ and Λ^+ was not significant ($P > 0.05$). We concluded that most *P. tabuliformis* communities in Shanxi were in the steady growth stage. The species composition was relatively stable, although there were taxonomic differences to some degree within species distributed mainly in a few of the larger taxa.

Key Words: Shanxi; *Pinus tabuliformis* communities; average taxonomic difference index (Δ^+); Taxonomic difference variation index (Λ^+)

生物多样性是评价物种数量、结构类型^[1]、分布格局^[2]、时空变化的有力工具^[3]。传统的生物多样性指数大都基于物种个体数及相关信息,如 Margalef 丰富度指数、Pielou 均匀度指数及 Simpson 多样性指数等,这些指数对取样的时间、地点、样地大小与方法极其敏感^[4],同时也不能直接反映种间的分类等级关系。

分类等级关系是群落物种多样性的重要方面,当两个群落物种丰富度相同时,分类关系较远的群落比分类关系较近的有更大的多样性^[5]。为了研究群落分类学关系的变化,Clarke 等提出了考虑物种间的分类关系的指数^[6],主要包括分类多样性指数 Δ 、分类差异指数 Δ^* 、平均分类学差异指数 Δ^+ 和分类学差异变异指数 Λ^+ ^[7]。平均分类学差异指数 Δ^+ 和分类学差异变异指数 Λ^+ 是基于物种间权重,根据分类等级的路径长度,将群落分类多样性特征量化的方法^[8-9]。其平均值不依赖于取样性质和样本大小,可用于大尺度的研究,避免取样性质未知或不一致对取样数据的影响^[10],且易于计算^[11]。 Δ^+ 反映群落种间亲缘关系^[12], Δ^+ 值越高表示物种间亲缘关系越远,多样性越大; Λ^+ 可以反映群落物种分类关系的均匀程度^[13], Λ^+ 值越大表明物种分布均匀性越差。分类学多样性研究最初集中在动物区系和鱼类群落^[6,14]。如 Leonard 等^[15] 应用不同的分类指标评估英国海洋生物多样性;Ellingsen 等^[16] 研究了挪威大陆架底栖生物的分类多样性。近十余年来,在植被生态研究中分类学多样性方法逐渐得到应用,如李景文等^[17] 对海南主要热带森林植物的分类多样性的研究;Da Silva 等^[18] 对巴西中部稀树草原的研究;秦晓娟等^[3] 检验了分类多样性对湿地植物群落的适用性;赵小娜等^[19] 对庞泉沟自然保护区植物群落分类多样性进行研究,并分析了分类学多样性指数与环境因子的关系。

油松 (*Pinus tabuliformis*) 是中国北方地区重要的用材和生态树种,以油松为建群种形成的森林群落是华北山地优势植被类型之一,山西是我国油松林分布的集中区之一,具有广泛的代表性。本文在对山西油松群落进行野外调查的基础上,运用分类学多样性指数 (Δ^+ 和 Λ^+) 对山西油松群落的分类学多样性进行研究,探讨山西油松林内物种的组成特征和分类学多样性及与其有关的物种进化关系、物种共存和群落构建等问题,分析地形因子和群落因子与分类学多样性指数的相关性,分析了大尺度上影响物种分类学差异性的因子,为群落构建等问题提供一定的理论依据;同时,检验分类学多样性分析方法在森林群落生态学中的应用效果,全面了解区域尺度上油松林的分类多样性,为科学管理和保护山西油松林资源提供科学依据。

1 研究区概况

油松林在山西北起恒山,至五台山折向西,在岢岚、兴县以南分布极为广泛。以太行山的盂县、平定、和顺、左权、榆社、黎城、陵川,太岳山的沁源、霍州、介休、灵石、洪洞,吕梁山的交城、中阳、蒲县、乡宁,五台山的繁峙、五台、代县,恒山,中条山的沁水、阳城、翼城^[20-21],黑茶山的岚县、兴县、方山等地、管涔山的宁武、五寨、岢岚等分布较为集中。其中太岳山是我国油松林分布的代表性区域^[22],而大同天然油松很少成林^[23]。

野外调查的油松林(山西)分布范围:110°45′—113°45′ E,34°48′—38°57′ N,海拔 744—1867 m。研究区属温带大陆性季风气候,全年日照时数 2808 h,无霜期 120 d^[24]。年平均气温为 4—14 °C,一月平均温为-6.8 °C,七月平均温为 23.6 °C。年降水量为 400—600 mm。

2 研究方法

2.1 野外调查

2012 年 6 月—2014 年 9 月,在山西共设置 113 个样地进行植被调查(图 1),几乎遍及山西省的油松林分布范围。样地面积为 20×30 m²,记录乔木层树种名、高度、冠幅、多度和郁闭度等;将样地划分为 6 个 10×10 m²的样方,选取对角线的 2 个样方,记录灌木层种名、多度、平均高和盖度;在 6 个样方中各选取 1 个 1×1 m²的小样方,记录草本层种名、平均高和盖度^[25-26],采集每个样方的表层土,密封保存,分析土壤属性。记录的环境信息包括经纬度、海拔、坡度、坡向、坡位和干扰情况等。

坡向采用等级制,即阳坡(1)、半阳坡(2)、半阴坡(3)和阴坡(4),数字越大,表示水分条件越好。坡位同样采用等级制,即下坡位(1)、中下坡位(2)、中坡(3)、中上坡(4)和上坡位(5);干扰情况可分为无干扰(4)、轻微(3)、中度(2)和重度(1),数字越小,表示人为干扰相对越强。将调查的环境因子划分为宏观地形因子(经度、纬度和海拔)、微地形因子(坡度、坡向和坡位)、土壤属性因子(全氮、全磷、pH 和有机碳)和群落结构因子(胸径、乔木密度和群落物种数),以便进行比较。

2.2 数据分析

综合野外调查和历史资料整理山西油松林物种总名录。根据林奈分类系统,将物种分类等级确定为门、纲、目、科、属、种 6 个等级。定义分类等级上最远的 2 个种路径长度为 100(即最长路径)^[6],根据分类等级确定每一等级水平上的权重^[27-28]:同属的不同种 $\omega_{ij} = 16.67$ ^[3];同科不同属的种 $\omega_{ij} = 33.33$;同目不同科的种 $\omega_{ij} = 50.00$;同纲不同目的种 $\omega_{ij} = 66.67$;同门不同纲的种 $\omega_{ij} = 83.33$;不同门的种 $\omega_{ij} = 100$ 。

Clarke 等^[29]提出了计算分类学多样性测度的方法,公式如下:

平均分类学多样性指数

$$\Delta^+ = \frac{(\sum \sum_{i < j} \omega_{ij})}{\frac{s(s-1)}{2}} \quad (1)$$

分类学差异变异指数

$$\Lambda^+ = \frac{(\sum \sum_{i < j} (\omega_{ij} - \Delta^+))}{\frac{s(s-1)}{2}} \quad (2)$$

其中, ω_{ij} 为第 i 和第 j 个物种在分类等级中的路径长度, S 为样方中出现的种数。

对各样地的多样性指数值与理论平均值进行统计性检验,建立 95% 的置信漏斗曲线^[5,30]。由 PRIMER6 软件可求得 Λ^+ 与 Δ^+ 的值及完成置信漏斗的绘制。

用 R 软件完成 Λ^+ 和 Δ^+ 与地形因子、土壤因子和群落结构的 Spearman 秩相关分析。

3 结果与分析

3.1 群落结构与组成

山西北部油松林多为人工油松纯林,林下灌木较少,草本植物优势种为长芒草(*Stipa capillata*)等。中西部吕梁山、太岳山和太行山油松林成熟林较少,其中太岳山中幼龄林占优势;关帝林区的油松多为中幼龄林,且多为纯林,同时分布有少量的松、栎类混交林;太行山区幼龄林约占 2/3,其余大部分为中龄林,常与栎类混交;灌木层主要有黄刺玫(*Rosa xanthina*)、美蔷薇(*Rosa bella*)、三裂绣线菊(*Spiraea trilobata*)、土庄绣线菊(*Spiraea pubescens*)、虎榛子(*Ostryopsis davidiana*)等;草本层以披针薹草(*Carex lancifolia*)为主。南部中条山幼龄林居多,中龄林约占 1/3,常与白桦(*Betula platyphylla*)、辽东栎(*Quercus wutaishanica*)、元宝槭(*Acer truncatum*)、山杨(*Populus davidiana*)等混交,灌木种类和数量较多,常见的有胡枝子(*Lespedeza bicolor*)、黄刺玫(*Rosa xanthina*)、金银忍冬(*Lonicera maackii*)、荆条(*Vitex negund* var. *heterophylla*)、西北栒子(*Cotoneaster multiflorus*)、甘肃山楂(*Crataegus kansuensis*)、土庄绣线菊、黄栌(*Cotinus coggygria* var. *coggygria*)、暴马丁香(*Syringa reticulata*)等,草本层主要以羊胡子草(*Carex rigescens*)、华北米蒿(*Artemisia giraldii*)等为主。

野外共记录 357 种植物,隶属于 3 门 4 纲 36 目 71 科 227 属。3 个门分别为被子植物门(包含 2 纲 350 种)、裸子植物门(包含 1 纲 5 种)和蕨类植物门(包含 1 纲 2 种)。被子植物中双子叶植物纲(30 目)占优势地位。从目水平来看,管状花目含科最多,有 6 科。含属最多的为桔梗目(34 属),含种最多的为蔷薇目(71 种)。植物科内种、属组成差异较大,其中菊科(31 属)、蔷薇科(18 属)、豆科(15 属)禾本科(15 属)、唇形科(11 属)等含属较多。菊科含种最多(50 种),占总种数的 14.01%,其次为豆科 34 种(9.52%)、蔷薇科 33 种(9.24%)和禾本科 21 种(5.88%)。含种较多的属为蒿属(*Artemisia* 11 种)、堇菜属(*Viola* 9 种)、委陵菜属(*Potentilla* 7 种)、沙参属(*Adenophora* 7 种)和薹草属(*Carex* 5 种)等。

由此可见,山西油松林群落大都处于中幼林成长阶段,林下的物种组成和分类单元相对比较丰富,但主要以几个大的分类单元为主,如在科水平上集中于菊科、蔷薇科、豆科和禾本科。

3.2 分类学多样性指数

根据山西油松林的 Δ^+ 和 Λ^+ 理论平均值建立 95% 的置信漏斗曲线(图 2)。图 2 中置信漏斗的上下置信限分别为相应种数在最大阶元和最小阶元的分类多样性理论值。图 2a 中虚线是 Δ^+ 的理论平均值(约为 53),所有样地 Δ^+ 理论平均值与种数的变化基本独立。 Δ^+ 阈值在种数为 4—7 时明显减小,之后随着种数的增加,逐渐趋近于稳定状态,与 Δ^+ 理论平均值平行。

Δ^+ 值表示群落中所有物种间路径长度的理论平均值,置信漏斗范围内样地 Δ^+ 值越大,表示样地内物种间分类学多样性越大,种间亲缘关系越远。 Δ^+ 值大都处于研究区 Δ^+ 的理论平均值之上,表明所调查的样地内物种间的分类学多样性比较丰富。其中位于置信漏斗上包迹线上方的样地占总样地数的 11.5%,包括样地 S6(永济五老峰)、S78(晋源区天龙山)、S85(阳城庄沟)等,这些样地的 Δ^+ 值显著高于区域的 Δ^+ 理论平均值($P <$

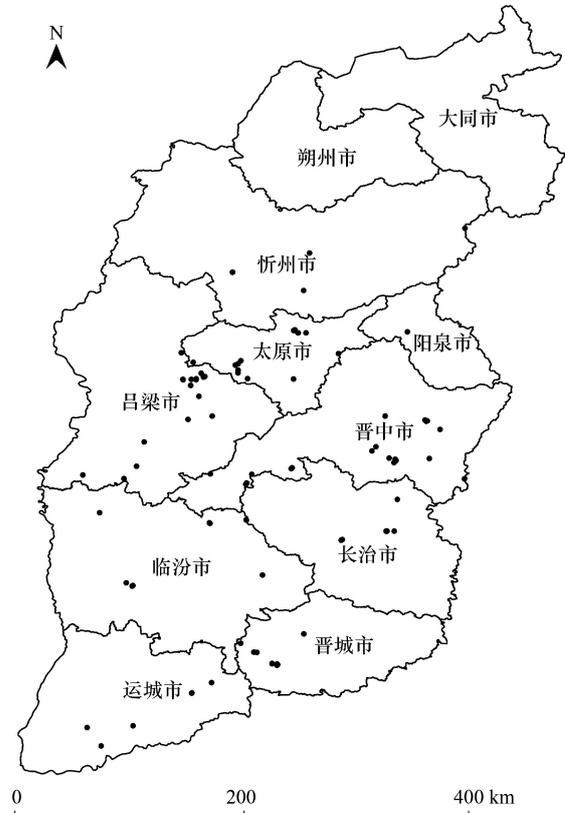


图 1 调查地点的基本信息

Fig. 1 Distribution of stands of *Pinus tabulaeformis* in Shanxi

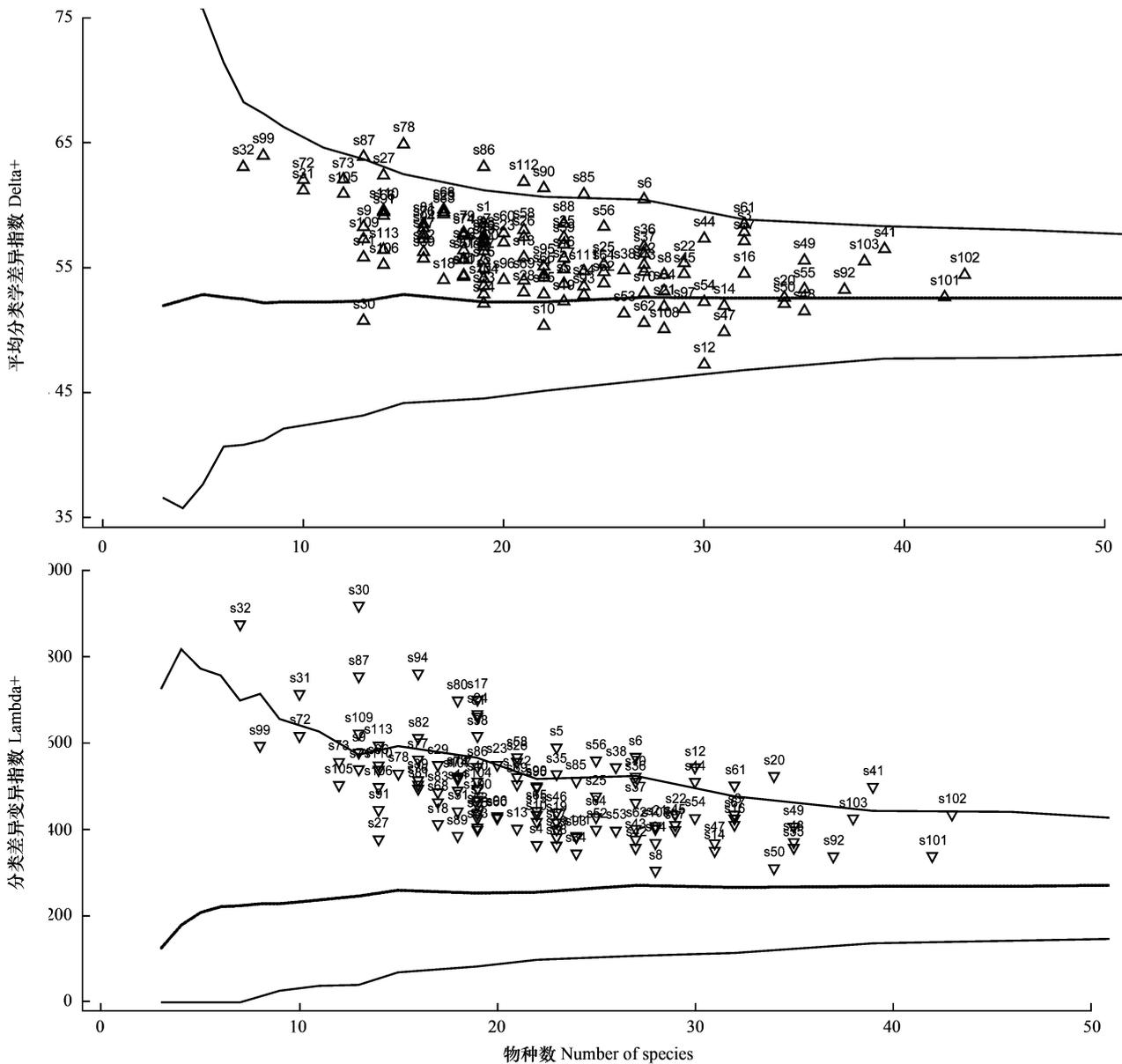


图 2 Δ^+ (a) 和 Λ^+ (b) 95% 的置信漏斗曲线及各调查点在曲线中的位置

Fig.2 Δ^+ (a) and Λ^+ (b) for the plant communities in 113sites, plotted against the number of species on the 95% confidence funnel

0.05)。位于理论平均值下方的样地数远远小于其上方样地数,仅有样地 S10(运城盐湖区)、S12(安泽草峪岭)、S30(襄垣古韩)、S47(左权程家村)、S108(交城双家寨)等 10 个;位于下包迹线之外的样地并未出现。样地 S78 平均分类差异指数 Δ^+ 值(64.86)高于其余样地,即样地 S78 种间亲缘关系较其他样地远。样地 S12 的 Δ^+ 值(47.23)最低,平均每科含 3.33 种,每属含 3 种,表明其物种组成之间的亲缘关系较近。

图 2b 中置信漏斗的上下置信限分别为 Λ^+ 值理论的最大曲线与最小曲线, Λ^+ 值可表征物种分类单元分布的均一性水平。置信漏斗范围内样地 Λ^+ 值越小,表明生物或群落间的分类地位关系程度越均匀。虚线是 Λ^+ 的理论平均值,反映区域内物种分类等级间的差异变异情况。由图 2b 可以看出, Λ^+ 理论平均值也几乎与种数变化无关,基本保持在 280 左右。只有当种数很少时(<5), Λ^+ 的最大和最小曲线才会出现急剧变化;之后随着种数的增加逐渐趋于稳定,且逐渐平行于 Λ^+ 理论平均值。

所有样地的 Λ^+ 值均位于理论平均值上方,表明油松林样地内种间的分类等级均匀性低于区域内的理论平均值。其中有 25 个样地位于置信漏斗最大值曲线上方,分别为样地 S5(平陆东郭)、S6、S12、S17(永和芝

河)、S20(乡宁台头)等。这些样地的 Λ^+ 值显著高于区域内的理论平均值 ($P < 0.05$), 表现出种间分类单元显著的不均匀性。样地 S30 分类差异变异指数 Λ^+ (917.35) 最高, 表明其物种的等级分布最不均匀。样地 S30 共有 13 种植物分属 2 门 3 纲 6 目 7 科 11 属, 其中菊科含种最多(7 种), 其他皆为单属单种的科。相反, 样地 S8(垣曲毛家弯)分类差异变异指数 Λ^+ (304.66) 低于其余样地, 基本接近区域内的理论平均值, 这说明 S8 物种等级分布相对均匀。样地 S8 共有 28 种植物, 隶属 2 门 3 纲 16 目 20 科 26 属, 其中毛茛目、蔷薇目、管状花目和中央种子目各有两个科, 其他各目仅包含一个科。豆科、菊科、堇菜科含物种数最多, 各有 3 种植物。

由 Δ^+ 和 Λ^+ 与种的分布可以看出, Δ^+ 和 Λ^+ 随着物种的增加基本呈现出下降的趋势。样地 S102(宁武接官亭)种数最多, 共 43 种, Δ^+ 和 Λ^+ 值相对较低, 分别为 54.4 和 434.47。样地 S32 种数最少, 虽然仅有 7 种植物但它们分属 2 门 3 纲 5 目 5 科 6 属, 平均分类差异指数(63.04)较高, 分类差异变异指数(874.28)较高。

3.3 分类学多样性指数与环境因子和群落结构的相关分析

由表 1 可知, 宏观地形因子与 Δ^+ 相关不显著 ($P > 0.05$), 与 Λ^+ 相关亦不显著 ($P > 0.05$), 其中纬度和海拔与 Δ^+ 和 Λ^+ 相关性大于经度, 主要原因是山西纬度跨度大于经度和海拔梯度变化明显。微地形因子中, 坡向与 Δ^+ 极显著正相关 ($P < 0.01$), 坡位与 Δ^+ 显著正相关 ($P < 0.05$), 与 Λ^+ 极显著正相关 ($P < 0.01$)。

土壤属性与 Λ^+ 相关不显著 ($P > 0.05$); 全氮和有机碳与 Δ^+ 呈极显著正相关, pH 和全磷与 Δ^+ 相关不显著 ($P > 0.05$)。

表 1 Δ^+ 、 Λ^+ 与环境因子和群落结构的 Spearman 秩相关关系

Table 1 Spearman's rank correlations coefficients of Λ^+ and Δ^+ with environmental factors and community structure

指数 index	纬度 Latitude	经度 Latitude	海拔 Altitude	坡度 Slope	坡向 Aspect	坡位 SP	pH pH	全氮 TN	全磷 TP	有机碳 SOC	胸径 DBH	密度 Density	物种数 S
Δ^+	0.070	0.005	0.117	0.015	-0.240 **	0.175 *	0.012	0.317 **	-0.147	0.315 **	0.214 *	-0.028	-0.540 **
Λ^+	-0.103	-0.031	-0.050	-0.095	0.025	0.225 **	0.048	0.132	0.010	0.131	0.048	0.210 *	-0.579 **

SP: 坡位 Slope position; TN: 全氮 Total nitrogen; TP: 全磷 Total phosphorus; SOC: 有机碳 Soil organic carbon; DBH: 胸径 Diameter at breast height; S: 物种数 Number of species

群落结构因子中, 物种数与 Δ^+ 呈极显著负相关 ($P < 0.01$), 与 Λ^+ 呈极显著负相关 ($P < 0.01$); 乔木密度与 Δ^+ 相关不显著 ($P > 0.05$), 与 Λ^+ 显著正相关 ($P < 0.05$); 胸径与 Δ^+ 显著正相关 ($P < 0.05$), 与 Λ^+ 相关不显著 ($P > 0.05$)。由此可以看出, 影响油松林 Δ^+ 和 Λ^+ 分布的最直接的因子主要是微地形因子和群落结构因子。

4 讨论

山西油松林的植物主要集中于菊科、豆科、禾本科、莎草科。多数样地的 Λ^+ 值高于理论平均值, 表明山西油松群落物种分布均匀性较弱。Pienkowski 等研究表明, Δ^+ 值落入 95% 的置信漏斗最小值曲线以下时, 表示该样地的生境发生退化或受到严重污染^[13,31]。山西油松林所有样地 Δ^+ 值没有位于置信漏斗最小值曲线下方的, 表明山西油松林分布区域的生态环境整体情况良好, 受到的各种干扰较少。这主要得益于 1998 年以来的退耕还林政策的实施和山西省生态文明建设各种管理措施的全面落实, 包括停止对油松林的采伐、加强对盗伐油松林的处罚和监管等。五老峰和天龙山为旅游胜地, 油松林处于中幼林阶段, 林隙间较为充足的光照有利于林下灌木和草本的生长, 使得林下物种多样性更丰富, 群落分类学多样性增高; 同时, 旅游对油松林有轻度干扰, 加之一些植物繁殖体也可能随游人进入松林, 其中某些种可能在油松林定居并成功完成生活史, 使得样地 S6 和 S78 具有较高的分类学多样性。样地 S85、S86、S87、S90、S112, 位于国有林场或县有林场, 油松林发育良好, 群落结构完整, 乔木层可分为两个亚层, 其中第一亚层为建群种——油松, 第二亚层物种较为丰富, 常见的有辽东栎、山杨、白桦等, 灌木层和草本层发育也较为完整, 从而使得这些样地具有较高的分类学多样性。这一结果与其他研究者的结论一致^[3], 即结构复杂的群落具有更高的分类学多样性指数。样地 S12 位于安泽草峪岭乡道附近, 垦荒、行走等人类日常活动严重干扰了林下林缘植被的生长和种子的传播; 油松林处于幼林阶段, 且位于阳坡, 水分条件较差, 不利于林下植物的生长, 分布的草本大多为菊科和禾本科等抗逆性强

的物种。因此,样地 S12 的 Δ^+ 值最小。

相关性分析(表 1)表明,尽管山西油松林分布的纬度和海拔变异明显,但纬度和海拔并不是导致 Δ^+ 和 Λ^+ 分布的决定的因子,亦即平均分类差异指数 Δ^+ 并没有表现出明显的纬度和海拔变化规律,与李永振等研究结果类似^[11,32],这说明 Δ^+ 指数在区域尺度上反映群落的分类学多样性具有较强的稳健性;同时,也表明山西是油松林分布相对适宜的区域,林下物种组成主要以菊科、禾本科等为主,它们具有较广的生态幅和适应性。微地形因子中,坡向与 Δ^+ 极显著正相关($P < 0.01$),即在阴坡的油松林具有较高的分类学多样性。坡向的差异会影响光照和水分的空间异质性^[20]。在山西油松林分布区光照充足,限制植物生长和分布的主要是水分因子。在阳坡由于光照时间长、强度大,分布的物种往往以耐旱性较强的植物为主;由于土壤持水量较低,种间对水分的竞争强度相对较大,物种组成往往集中于某一科或某一属。如样地 S30 位于襄垣古韩乡土桥村海拔 1122 m 的阳坡,充分的光照使得喜阳的油松长势良好,乔木层郁闭度较大(0.85)不利于林下灌木和草本的生存;S30 共有 13 种植物分属 2 门 3 纲 6 目 7 科 11 属,其中含种最多的科为菊科(7 种),其他科皆为单属单种,如展枝沙参(*Adenophora divaricata*)、披针藁草、角盘兰(*Herminium monorchis*)、油松、茜草(*Rubia cordifolia*)、鸡腿堇菜(*Viola acuminata*)。位于交城庞泉沟阴坡的样地 S90,由于水分条件好于阳坡,乔木层郁闭度较小(0.55),林下灌木层和草本层组成丰富多样,共有 22 种植物分属 2 门 3 纲 13 目 16 科 21 属,包括侧柏(*Platycladus orientalis*)、灰栒子(*Cotoneaster acutifolius*)、美蔷薇、野青茅(*Deyeuxia arundinacea*)、筋骨草(*Ajuga ciliata*)、北柴胡(*Bupleurum chinense*)、异鳞藁草(*Carex heterolepis*)等不同生活型种,使得样地分类多样性指数较大。

坡位主要反映的是立地条件、水分状况以及人为干扰等情况;坡位与 Δ^+ 显著正相关($P < 0.05$),与 Λ^+ 极显著正相关($P < 0.01$)。赵小娜等^[19]研究结果表明坡位与 Δ^+ 正相关($P > 0.05$),与 Λ^+ 负相关($P > 0.05$),是由于研究区域位于庞泉沟自然保护区,海拔 1600—2400 m,温度变化明显,且受人为活动干扰较少, Δ^+ 和 Λ^+ 主要受海拔梯度的影响。本文研究的油松林海拔分布相对较低(744—1800 m),热量条件相对较好,人为活动干扰较多,林下的物种组成相对简单。群落物种数与 Δ^+ 和 Λ^+ 呈极显著负相关($P < 0.01$);密度与 Δ^+ 显著正相关($P < 0.05$);胸径与 Δ^+ 显著正相关($P < 0.05$)。如位于宁武接官亭林场的样地 S102 物种数最多,共 43 种,属 2 门 3 纲 19 目 24 科 38 属,乔木层密度较小郁闭度低(0.60),林下种类丰富,灌木层优势种为土庄绣线菊,草本优势种为披针藁草和东方草莓(*Fragaria orientalis*), Δ^+ 和 Λ^+ 值相对较低。位于武乡县石门乡石门村的样地 S32 物种数最少,仅出现油松、披针藁草、茜草、小红菊(*Dendranthema chanelii*)、白莲蒿(*Artemisia sacrorum*)、牛尾蒿(*Artemisia dubia*)等,植物但它们分属 2 门 3 纲 5 目 5 科 6 属,因此表现出较高的 Δ^+ 和 Λ^+ 值。

微地形因子和群落结构因子导致物种的微生境差异,研究表明与微生境相比地形因子对分类多样性影响较小^[11],本文的结果与此类似。群落结构因子对分类多样性影响最大可能是因为群落演替早期具有生态特性相似或对环境有相似响应的近缘种。随着演替的进行,物种对水分、光照等环境因子的需求增多,种间对相似资源的激烈竞争使近缘种逐渐减少,而使亲缘关系较远的物种得以实现稳定共存,群落趋向成熟,并最终达到顶级群落阶段。

致谢:感谢山西大学黄土高原研究所苏智娇、赵蓉、张森森、李旭华、邓永利、毛空、王洁等同学参与野外调查工作!

参考文献(References):

- [1] Neeson T M, Van Rijn I, Mandelik Y. How taxonomic diversity, community structure, and sample size determine the reliability of higher taxon surrogates. *Ecological Applications*, 2013, 23(5): 1216-1225.
- [2] Jucker T, Carboni M, Acosta A T R. Going beyond taxonomic diversity: Deconstructing biodiversity patterns reveals the true cost of iceplant invasion. *Diversity and Distributions*, 2013, 19(12): 1566-1577.

- [3] 秦晓娟, 董刚, 邓永利, 毛空, 李旭华, 张峰. 山西平陆黄河湿地植物分类学多样性研究. 生态学报, 2015, 35(2): 409-415.
- [4] 蒋志刚, 纪力强. 鸟兽物种多样性测度的 $G-F$ 指数方法. 生物多样性, 1999, 7(3): 220-225.
- [5] Moreno C E, Castillo-Campos G, Verdú J R. Taxonomic diversity as complementary information to assess plant species diversity in secondary vegetation and primary tropical deciduous forest. *Journal of Vegetation Science*, 2009, 20(5): 935-943.
- [6] Clarke K R, Warwick R M. A taxonomic distinctness index and its statistical properties. *Journal of Applied Ecology*, 1998, 35(4): 523-531.
- [7] Graham N A J, McClanahan T R, Letourneur Y, Galzin R. Anthropogenic stressors, inter-specific competition and ENSO effects on a Mauritian coral reef. *Environmental Biology of Fishes*, 2007, 78(1): 57-69.
- [8] Rogers S I, Clarke K R, Reynolds J D. The taxonomic distinctness of coastal bottom-dwelling fish communities of the North-east Atlantic. *Journal of Animal Ecology*, 1999, 68(4): 769-782.
- [9] Ceschia C, Falace A, Warwick R. Biodiversity evaluation of the macroalgal flora of the Gulf of Trieste (Northern Adriatic Sea) using taxonomic distinctness indices. *Hydrobiologia*, 2007, 580(1): 43-56.
- [10] 徐宾铎, 金显仕, 梁振林. 黄海鱼类群落分类学多样性的研究. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2005, 35(4): 629-634.
- [11] 李永振, 史赞荣, 艾红, 董丽娜, 李娜娜, 李夏, 高天翔. 南海珊瑚礁海域鱼类分类多样性大尺度分布格局. 中国水产科学, 2011, 18(3): 619-628.
- [12] Richard M. The use of taxonomic distinctness to assess environmental disturbance of insect communities from running water. *Freshwater Biology*, 2007, 52(8): 1634-1645.
- [13] Mouillot D, Laune J, Tomasini J A, Aliaume C, Brehmer P, Dutrieux E, Do Chi T. Assessment of coastal lagoon quality with taxonomic diversity indices of fish, zoobenthos and macrophyte communities. *Hydrobiologia*, 2005, 550(1): 121-130.
- [14] 丁兰平. 两个新的群落多样性指数. 海洋科学, 1999, 21(1): 25-28.
- [15] Leonard D R P, Clarke K R, Somerfield P J, Warwick R M. The application of an indicator based on taxonomic distinctness for UK marine biodiversity assessments. *Journal of Environmental Management*, 2006, 78(1): 52-62.
- [16] Ellingsen K E, Clarke K R, Somerfield P J, Warwick R M. Taxonomic distinctness as a measure of diversity applied over a large scale: the benthos of the Norwegian continental shelf. *Journal of Animal Ecology*, 2005, 74(6): 1069-1079.
- [17] 李景文, 李俊清, 任艳林. 海南主要热带森林生态系统类型自然保护区物种分类多样性研究. 北京林业大学学报, 2002, 24(5/6): 108-114.
- [18] Da Silva I A, Batalha M A. Taxonomic distinctness and diversity of a hyperseasonal savanna in central Brazil. *Diversity and Distributions*, 2006, 12(6): 725-730.
- [19] 赵小娜, 秦晓娟, 董刚, 张峰. 庞泉沟自然保护区植物群落分类学多样性. 应用生态学报, 2014, 25(12): 3437-3442.
- [20] 陈姣, 廉凯敏, 张峰, 王建军, 史荣耀. 山西历山保护区野生种子植物区系研究. 山西大学学报: 自然科学版, 2012, 35(1): 151-157.
- [21] 刘蕾, 张峰. 历山白云洞景区植物群落物种多样性研究. 山西大学学报: 自然科学版, 2010, 33(3): 468-472.
- [22] 狄晓艳. 油松遗传多样性与光合生理生态特性研究[D]. 太原: 山西大学, 2014.
- [23] 张峰. 山西油松林分布区气候因素的排序研究. 山西大学学报: 自然科学版, 1990, 13(3): 322-327.
- [24] 张新波, 李悦, 袁虎威, 李伟, 富裕华, 刘致远, 朱松林. 山西油松天然林分 21 年子代生长性状遗传变异研究. 北京林业大学学报, 2014, 36(3): 104-109.
- [25] 方精云, 王襄平, 沈泽昊, 唐志尧, 贺金生, 于丹, 江源, 王志恒, 郑成洋, 朱江玲, 郭兆迪. 植物群落清查的主要内容、方法和技术规范. 生物多样性, 2009, 17(6): 533-548.
- [26] Schaminée J H J, Hennekens S M, Chytrý M, Rodwell J S. Vegetation-plot data and databases in Europe: an overview. *Preslia*, 2009, 81(3): 173-185.
- [27] Clarke K R, Warwick R M. The taxonomic distinctness measure of biodiversity: weighting of step lengths between hierarchical levels. *Marine Ecology Progress Series*, 1999, 184: 21-29.
- [28] 曾燊. 嘉陵江干流鱼类物种分类多样性研究. 西华师范大学学报: 自然科学版, 2012, 33(3): 246-260.
- [29] Clarke K R, Warwick R M. A further biodiversity index applicable to species lists: variation in taxonomic distinctness. *Marine Ecology Progress Series*, 2001, 216(2): 265-278.
- [30] Ricotta C, Avena G C. An information-theoretical measure of taxonomic diversity. *Acta Biotheoretica*, 2003, 51(1): 35-41.
- [31] Pienkowski M W, Watkinson A R, Kerby G, Warwick R M, Clarke K R. Taxonomic distinctness and environmental assessment. *Journal of Applied Ecology*, 1998, 35(4): 532-543.
- [32] 李圣法. 东海大陆架鱼类群落生态学研究-空间格局及其多样性[D]. 上海: 华东师范大学, 2005.