

太行山中段植物群落物种多样性与环境的关系*

李军玲 张金屯**

(北京师范大学生命科学学院 北京 100875)

摘要 通过丰富度指数、物种多样性指数和均匀度指数,结合 TWINSpan、DCCA 排序及相关分析,研究了物种多样性及其变化机制,把植物群落分为 8 个群落类型;物种多样性指数变化的总体趋势是随着海拔的降低(从群落 I 到群落 VIII)而降低(Simpson 指数除外),对于某一个群落,这些指数都反映出基本一致的趋势;物种多样性指数的 DCCA 第一轴基本上反映了海拔变化引起的土壤水分的变化,第二轴基本上反映了人类对群落的干扰程度,物种多样性指数随土壤水分的增加而增大,随人类干扰程度的增加而减小. 环境因子中,氮、有机质、海拔与第一轴呈负相关,其余因子与第一轴呈正相关,而铜、pH 值与第一轴夹角很小,说明它们和水分梯度有显著的正相关,而锰、电导率与第二轴夹角小,说明它们与第二轴相关性大,而磷和第二轴却呈显著负相关. 图 3 表 1 参 12

关键词 太行山中段;多样性;DCCA;相关分析

CLC Q948.12

Plant Species Diversity in the Middle Part of the Taihang Mountain*

LI Junling & ZHANG Jintun**

(College of Life Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract By using richness, diversity and evenness indices, and combining with TWINSpan, DCCA and correlation analysis techniques, plant species diversity and diversification mechanism were studied. The plant communities were classified into eight types by TWINSpan. The species diversity indices were generally reduced with the lowering of (from community I to community VIII) altitude (except Simpson index). However, to certain communities, the indices reflected the basically unanimous trend. The first axis of DCCA basically indicated the diversification of soil water, while the second axis indicated the disturbance degree by people, so the species diversity indices were increased with soil water and reduced with the disturbance degree by people. The correlations among N, organic matter, elevation and the first axis were negative association, and the others were positive. The angle among Cu, pH and the first axis was very small, showing significantly positive association. The angle among Mn, electrical conductivity and the second axis was also small, showing significant association, and the correlations between P and the second axis were significantly negative. Fig 3, Tab 1, Ref 12

Keywords Taihang Mountain; diversity; DCCA; correlation analysis

CLC Q948.12

物种多样性是指在物种水平上的生物多样性^[1],是生物多样性在物种水平上的表现形式.它包括两个方面,一是指一定区域内物种的总和,主要从分类学、系统学和生物地理学角度对一个区域内物种的状况进行研究,也称区域物种多样性;二是指生态学方面物种分布的均匀程度,常常是从群落组织水平上进行研究,也称为生态多样性或群落多样性^[2].归纳起来,物种多样性具有三方面的涵义:种的丰富度(species richness)或多度(abundance),种的均匀度(species evenness)或平衡性(equitability)以及种的总多样性(total diversity).物种多样性反映群落或生境中物种的丰富度、变化程度和均匀度,可定量表征群落和生态系统的特征^[1,2].

自 1943 年 Williams 提出物种多样性的概念和 Fisher 提出物种多样性指数的概念以来,已有许多群落多样性的测度方法相继问世.对物种多样性变化的影响因子的研究,目前已有大

量的报道.贺金生就纬度、水分、土壤、营养成分、海拔、演替等因子对近年来国内外陆地植物群落的研究结果进行了综述,总结了一些规律,如纬度梯度规律^[3].有些方面的研究深入一些,如土壤中的 P、Mg、K、Ca 与群落的多样性有关,土壤养分的增加与多样性的增大成正相关关系,土壤有机质的积累有利于植物多样性的增加,土壤含水量的减少明显影响沙漠人工植被中灌木的生存,从而影响到植被的物种多样性水平;张峰等(2002)研究了土壤有机质、土壤全氮、全磷、电导率、土壤 pH 值、铜、锰、锌、钾、海拔、坡度和坡向等 12 项环境因子和物种多样性之间的关系^[4].

土壤环境因子即土壤状况与植物生长发育的关系,许多研究都有所涉及.土壤状况直接影响着植物的生长发育,植物在整个生长发育过程中也能通过根系分泌物和枯落物等改善土壤的水、热、气、肥等理化性质.但土壤因子与物种多样性关系的研究,以及利用 DCCA 排序研究物种的多样性和土壤因子关系的论文,迄今为止还不多见.

收稿日期:2005-07-19 接受日期:2005-11-22

* 国家自然科学基金(No. 30070140)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 30070140)

** 通讯作者 Corresponding author (E-mail:zhangjintun@yahoo.com.cn)

1 研究地区和研究方法

1.1 研究地区的自然概况

太行山中段主峰红岩岭位于山西省晋中地区东南部,左权县境内,海拔 2 089 m. 左权县在太行山主峰西侧,界于北纬 36°45'~37°17',东经 130°06'~113°48'之间,地势由西北斜向东南,东南部山岭高耸,西北部较为平坦. 大部地区海拔在 1 200 m 以上,县境四周群山环抱,均为太行山分支.

本地区属于暖温带大陆性气候,四季分明,冬季少雪,春季多风,夏季雨量高度集中,秋季为时较短,多晴朗凉爽天气. 从气象站近 12 a 资料统计看,年平均气温 7.3 °C. 一月份最冷,平均气温 -9.1 °C,七月份最热,平均气温 21.6 °C,日平均气温稳定通过 10 °C 或以上期间的平均累计温度为 2 878 °C. 平均终霜期在 5 月上旬初,初霜期在 9 月下旬. 全年无霜期一般约 150 d 左右(按白霜统计). 年平均降水量为 560.3 mm,但年际变化较大,多雨年份曾达 817.0 mm (1963 年);而少雨年份仅有 318.0 mm (1965 年). 降水量的年内分配亦差异很大,全年降水量的 63% 集中在 7、8、9 月份. 本地区地形复杂,各地气候分布不一,地方性小气候特点异常明显.

1.2 研究方法

2003 年 8 月在太行山中段,海拔 1 050 ~ 2 089 m 之间,每隔垂直距离 50 m 设置 2 ~ 4 个样方,林地样方大小为 10 m × 10 m (乔木种由于人为干扰或处于幼苗阶段或数量很少,100 m² 在本地区已具代表性),灌丛样方大小为 4 m × 4 m,草本样方大小为 1 m × 1 m,共计 68 个,坡度坡向在取样时尽量保持一致. 调查记录内容包括:(1) 物种名称及每个种的盖度和高度,乔木同时要记录株数及胸径;(2) 群落综合特征和生境特征,包括群落总盖度、海拔、坡度、坡向等;(3) 在每个样方中心及两个对角,除去腐殖质层在大约 10 cm 深土层中各取一土样,实验室处理时,把 3 个平行样混合后均分,取其中的一份作为这个样方的土样. 土壤样品的分析在山西大学环境与资源学院环境检测实验室内进行,共分析了土壤有机质、土壤全氮、全磷、电导率、土壤 pH 值、铜、锰、锌、和钾 9 项因子(测定方法分别为油浴加热 K₂Cr₂O₇ 容量法、开氏定氮法、酸溶 - 钼锑抗比色法、电导法、电位法、原子吸收分光光度法),这 9 项土壤因子值和海拔高度(m)组成本文要分析的 10 项环境因子,得 10 × 68 的环境因子数据矩阵. 68 个样方共记录 88 个种(限于篇幅,省去植物名录表),这 88 个种的重要值计算结果组成得 68 × 88 的原始数据矩阵.

1.3 数据处理

植物种的数据采用重要值作为综合指标^[5]. 在每个样方内计算乔木、灌木和草本植物的重要值: 乔木重要值 = (相对密度 + 相对高度 + 相对优势度)/300

灌木和草本重要值 = (相对盖度 + 相对高度)/200

1.3.1 物种多样性 采用丰富度指数、均匀度指数和多样性指数,其计算公式^[6]如下:

$$\text{Simpson 多样性指数(1958): } \lambda = \frac{\sum_{i=1}^S N_i(N_i - 1)}{N(N - 1)}$$

$$\text{Shannon - Wiener 多样性指数(1958): } H' = - \sum_{i=1}^S \left(\frac{N_i}{N} \right) \ln \left(\frac{N_i}{N} \right)$$

Patrick 丰富度指数(1949): $R = S$

$$\text{Margalef 丰富度指数(1958): } R_1 = \frac{S - 1}{\ln(N)}$$

$$\text{Menhinick 丰富度指数(1964): } R_2 = \frac{S}{\sqrt{N}}$$

$$\text{Hill 的多样性指数(1973): } N_1 = e^{H'}$$

$$\text{Hill 的多样性指数(1973): } N_2 = \frac{1}{\lambda}$$

$$\text{Pielou 的均匀度指数 1 (1975): } E_1 = \frac{H'}{\ln(S)}$$

$$\text{Sheldon 均匀度指数(1969): } E_2 = \frac{e^{H'}}{S}$$

$$\text{Heip 均匀度指数(1974): } E_3 = \frac{e^{H'} - 1}{S - 1}$$

$$\text{Hill 的均匀度指数(1973): } E_4 = \frac{N_2}{N_1}$$

$$\text{Alatalo 均匀度指数(1981): } E_5 = \frac{N_2 - 1}{N_1 - 1}$$

式中, S 为每一样方中的物种总数, N 为 S 个种的全部重要值之和, N_i 为第 i 个种的重要值.

1.3.2 群落的多样性测度 采用植被重要值数据,用 VES-PAN 软件包 HILL 设计的 TWINSpan 进行分类;群落中所有乔、灌、草各物种一起参与多样性的计算,结合加权参数进行群落的多样性测度 $D = W_1 D_1 + W_2 D_2 + W_3 D_3$. 其中, D 表示群落总体多样性指数; D_1 、 D_2 、 D_3 分别为乔木层、灌木层、草本层的多样性指数; W_1 、 W_2 、 W_3 分别为给定乔木层、灌木层、草本层的权重系数,大小分别为 0.5、0.3、0.2. 根据分类结果,在每一个群落类型中将所含的各样方的多样性指数求平均值,即得到每一个群落的多样性指数.

考虑到各多样性指数的差异,将 68 个样方的 12 个多样性指数进行最大值标准化,产生一个 12 × 68 的数据矩阵,结合最大值标准化后的环境因子数据矩阵,进行 DCCA 分析.

2 结果与分析

2.1 群落类型的多样性

对本地区植被进行了 TWINSpan 等级分类,结合其生态意义把 68 个样方分为 8 个组,代表 8 个群落类型:

群落 I: 披针苔草 + 小红菊 + 珠芽蓼 + 火绒草群落 (Assoc. *Carex lanceolata* + *Dendranthema charetii* + *Polygonum viviparum* + *Leontopodium leontopodioides*).

群落 II: 绣线菊 + 黄刺玫 - 披针苔草 + 草地早熟禾群落 (Assoc. *Spiraea japonica* + *Rosa xanthina* - *Carex lanceolata* + *Poa pratensis*).

群落 III: 白桦 - 绣线菊 - 披针苔草 + 草地早熟禾群落 (Assoc. *Betula platyphylla* - *Spiraea japonica* - *Carex lanceolata* + *Poa pratensis*).

群落 IV: 沙棘 + 黄刺玫 - 铁杆蒿群落 (Assoc. *Hippophae rhamnoides* + *Rosa xanthina* - *Artemisia sacrorum*).

群落 V: 黄刺玫 - 披针苔草 + 铁杆蒿群落 (Assoc. *Rosa xanthina* - *Carex lanceolata* + *Artemisia sacrorum*).

群落 VI: 酸枣 + 荆条 - 披针苔草 + 铁杆蒿群落 (Assoc. *Ziziphus jujuba* + *Vitex negundo* var. *heterophylla* - *Carex lanceolata*).

lata + *Artemisia sacrorum*).

群落Ⅶ:荆条-铁杆蒿群丛(Assoc. *Vitex negundo* var. *heterophylla* - *Artemisia sacrorum*).

群落Ⅷ:酸枣-铁杆蒿群丛(Assoc. *Ziziphus jujube* - *Artemisia sacrorum*).

2.2 群落多样性

太行山中段的地带性植被为暖温带落叶阔叶林,各植物群落之间的结构与功能差异较大,这种差异主要受制于组成物种不同的生态生物学特征,因而作为反映群落组织水平的物种多样性指数研究,无疑能更系统、更清晰地表现各群落的一些生态特性.

分别计算每个群落中各个样方的多样性,取其平均值作为各群落的多样性.图1显示了太行山中段8个植物群落类型的物种丰富度、物种多样性指数和均匀度指数,其总体趋势为随着海拔的降低(从群落Ⅰ到群落Ⅷ)其多样性指数降低.对于

某一个群落,这些指数都反映出基本一致的趋势,这是因为物种多样性指数是由物种丰富度和均匀度指数所决定的.

群落Ⅰ的样方海拔都较高,人为干扰较小,水热条件也较好,因而各项指数较高,而 Simpson 指数例外,因为该指数主要反映优势种在群落中的作用,当海拔降低时,群落结构简单化,如群落Ⅳ和群落Ⅵ都为单优势种群落,因而该指数在量上有增加之势.而群落Ⅴ造成群落较高指数的原因可能是该群落处于演替阶段,优势种暂不占主导地位.总之,该群落只是暂时可以抵抗外界的干扰,具有一定的稳定性,随着时间的推移,必然会出现新的群落结构.由此可见,影响物种多样性的因素很多,植物群落类型、海拔高度、人为干扰、演替阶段、生境条件差异等均对各项指数有一定的影响.总体来说,图1中物种丰富度、物种多样性指数和均匀度指数都较好地反映了太行山中段地区不同植物群落类型在物种组成或群落组织化水平方面的差异.

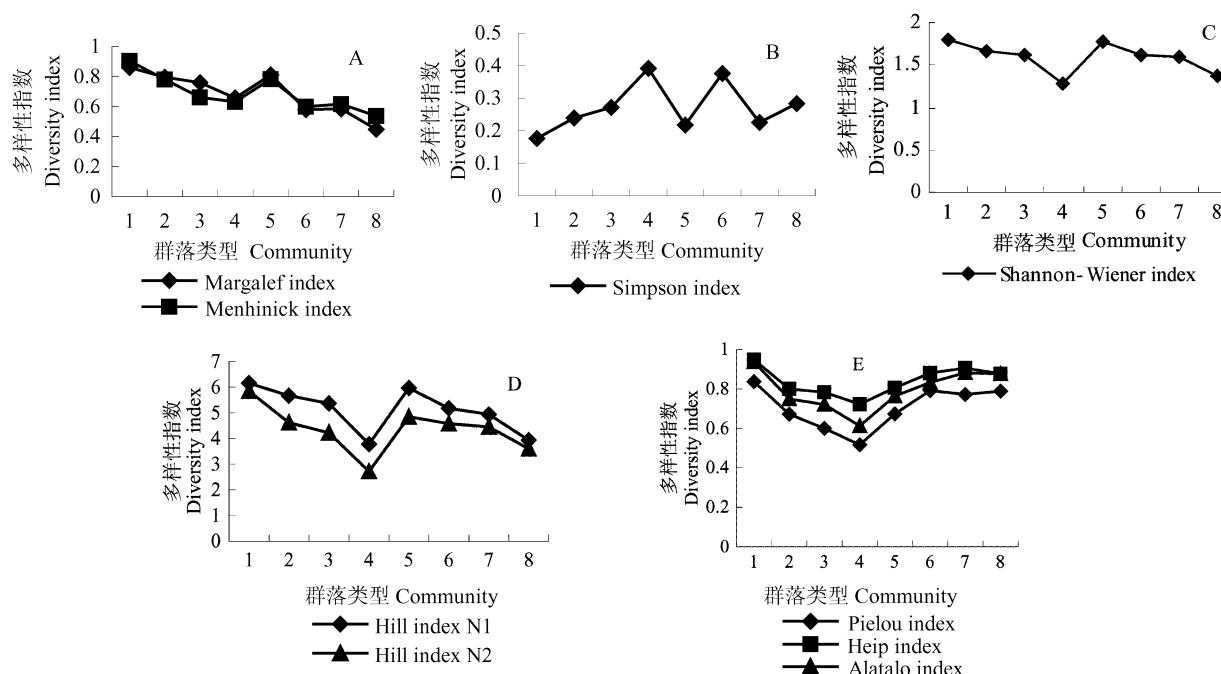


图1 8个植物群落的多样性指数

Fig. 1 Diversities of 8 communities

2.3 群落物种多样性与海拔的关系

研究地为太行山中段自然植被,地理范围较小,山地海拔高度特别是由于海拔高度造成的水、热条件是影响环境因子变化的主导因素.同时,所研究的植被从海拔1050~2089 m连续分布,由于人类活动的影响群落物种多样性也发生了很大的变化.因此,海拔高度的变化也反映了人类活动强度的变化,即由低海拔向高海拔影响强度逐渐减弱.另一方面,水分条件在海拔1050~2089 m的垂直范围内随海拔高度上升而逐渐得到改善.所以群落的物种多样性总的趋势是由低海拔向高海拔逐渐升高.当然由于群落所处的发育阶段不同或生境如坡度、坡向等的差异,以及由此引起的土壤厚度和有机质含量、水分条件等一系列生境的变化,而导致多样性出现波动.

群落多样性测度是将乔、灌、草一起参与多样性计算而产生,物种丰富度、物种多样性指数和均匀度指数沿着海拔的变

化如图2(在每个群落中选2~3个典型样方做图)所示.各项指数与海拔之间有一定的相关,其中丰富度指数 R_2 ($r = 0.698$)、多样性指数 N_1 ($r = 0.679$)、多样性指数 H' ($r = 0.658$)与海拔有极显著相关($P < 0.01$),均匀度指数 E_2 ($r = 0.492$)和多样性指数 λ (Simpson 指数)与海拔也有显著相关($P < 0.05$).除多样性指数 λ 和均匀性指数 E_2 单调递减外,其它指数均呈相同的变化趋势,即自低海拔至高海拔指数逐渐递增. Simpson 递减趋势的原因是因为它主要反映优势种在群落中的作用;而均匀度指数递减可能是由于干扰而导致的,而综合多样性指数是丰富度指数和均匀度指数的综合反映,在丰富度指数显著增高而均匀度指数降低的情况下,综合多样性指数增大,但较丰富度指数减缓.

2.4 物种多样性与环境关系分析

由于传统的 DCCA 排序可以同时进行样方和环境因子的

排序,使得排序轴不仅反映样方之间的相似性,而且反映样方间在环境组成上的相似性^[7].所以本文以样方的 12 个多样性指数和环境因子为原始数据矩阵作 DCCA 排序图,排序结果不仅反映样方之间多样性指数的相似性,而且反映样方多样性变化与环境因子组成的相互关系.

图 3 中,箭头所处的象限表示环境因子与排序轴间的正负相关性,箭头连线的长度代表着某个环境因子与植物群落的多样性变化的相关程度的大小^[8].线越长,说明相关性越大,反之则越小.箭头连线与排序轴的夹角表示某个环境因子与排序轴之间相关性的程度,夹角越小,相关性越大.

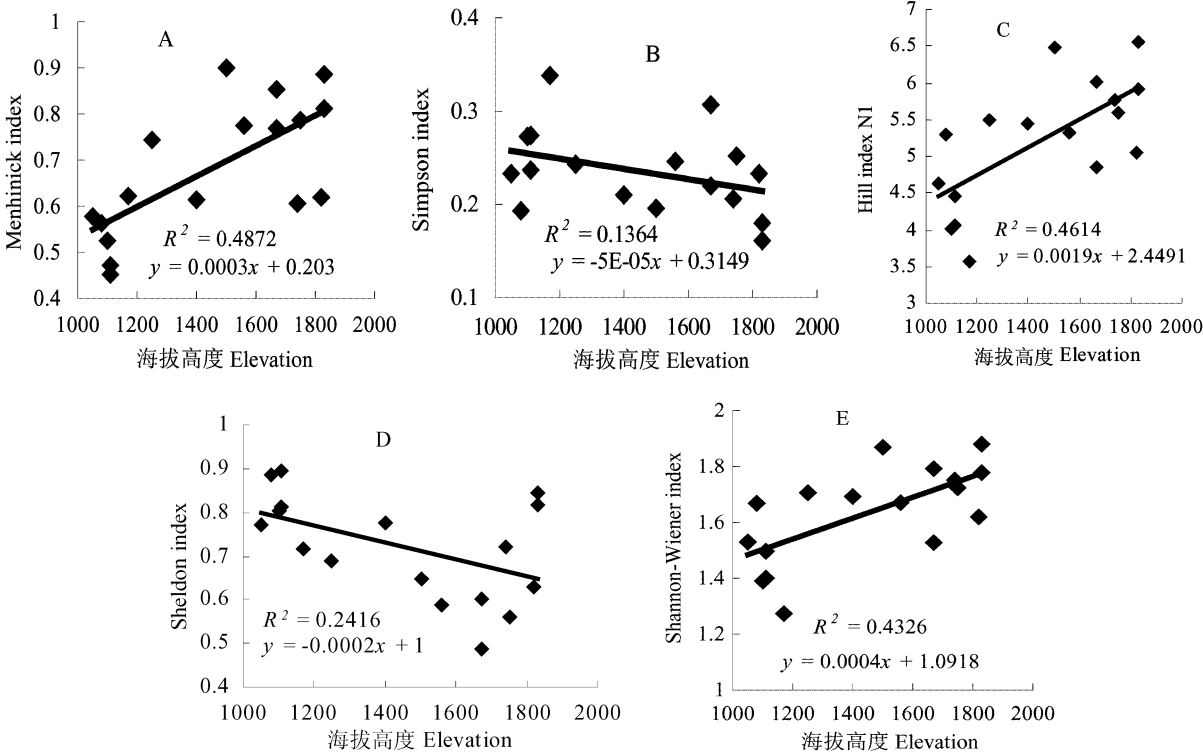


图 2 植物群落物种多样性与海拔高度的关系图
Fig. 2 Relationship between community diversity and elevation

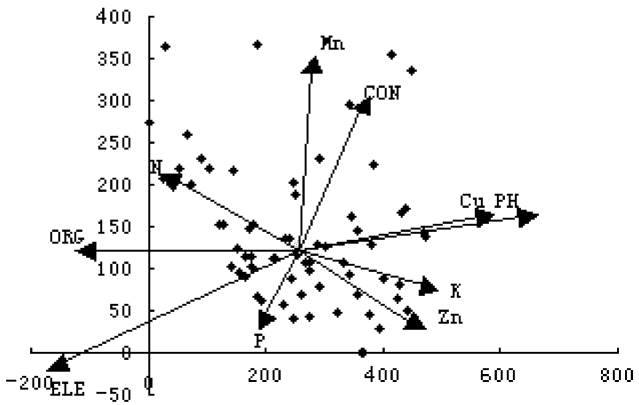


图 3 68 个样方的多样性指数与环境因子的 DCCA 排序图
Fig. 3 DCCA ordination diagram of diversity indices of 68 quadrats and environmental factors

ELE: 海拔 Elevation; ORG: 有机质 Organic matter; CON: 电导率 Conductance. 下同 The same below

从图中可以看出,排序轴第一轴基本上反映了海拔引起的土壤水分的变化,在 DCCA 第一轴从左向右,海拔逐渐升高,土壤水分逐渐增多,物种多样性在中性条件下达到最大,和传统结论相一致,第二轴基本上反映了人类对群落的干扰程度,即

人类的毁灭性利用森林资源.虽然传统研究结果表明中等程度干扰可增加群落物种多样性^[9, 14],但此地区强烈的人为干扰活动已经超出了传统意义上认为的程度,对该地区的植物多样性产生了强烈影响,干扰方式主要是人为破坏,在政府采取措施进行保护之前,在该地区曾经有林场.

环境因子中,氮、有机质、海拔与第一轴呈负相关,其余因子与第一轴呈正相关,而铜、pH 值与第一轴夹角很小,说明它们和水分梯度有显著的正相关,而锰、电导率与第二轴夹角小,说明它们与第二轴相关性大,而磷和第二轴却呈显著负相关^[10].通过环境因子箭头长度可以看出海拔和有机质、pH 值是决定群落多样性变化规律的主要因素,而磷的箭头长度最短,说明磷与群落多样性关系不大,不成为影响群落多样性变化的主要因素.

表 1 为多样性指数与环境因子的相关系数表,从表中可以看出,海拔、有机质与丰富度指数呈现显著或极显著正相关,而铜与丰富度指数呈现显著或极显著负相关, Simpson 指数和 Shannon - Wiener 指数及综合多样性指数和这些环境因子都构不成显著相关,而均匀度指数与氮、有机质呈现显著或极显著负相关,与 pH 值、铜呈现显著或极显著正相关.

表 1 多样性指数与环境因子的相关系数
Table 1 Correlation coefficients of diversity indices and environmental factors

	N	P	ORG	CON	K	Zn	Cu	Mn	pH	ELE
R	0.168	0.057	0.332 **	-0.173	-0.219	-0.1	-0.322 **	0.064	-0.212	0.291 *
R_1	0.131	0.078	0.289 *	-0.207	-0.235	-0.026	-0.247 *	0.015	-0.2	0.326 **
R_2	0.012	0.115	0.104	-0.278 *	-0.102	0.192	-0.022	-0.087	-0.189	0.336 **
λ	0.085	-0.051	0.013	0.187	-0.058	-0.09	0.037	0.107	-0.013	-0.106
H'	0.022	0.062	0.113	-0.144	-0.088	0.019	-0.123	-0.093	-0.033	0.162
N_1	0.03	0.076	0.129	-0.164	-0.077	0.021	-0.143	-0.075	-0.047	0.171
N_2	-0.101	-0.002	-0.042	-0.136	0.059	0.046	-0.005	-0.128	0.071	0.051
E_1	-0.249 *	-0.065	-0.298 *	-0.04	0.229	0.067	0.202	-0.192	0.25 *	-0.15
E_2	-0.273 *	-0.067	-0.348 **	0.01	0.218	0.08	0.247 *	-0.205	0.3 *	-0.198
E_3	-0.269 *	-0.07	-0.355 **	-0.011	0.229	0.069	0.242 *	-0.201	0.278 *	-0.189
E_4	-0.28 *	-0.071	-0.33 **	-0.19	0.228	0.098	0.208	-0.127	0.241 *	-0.17
E_5	-0.291 *	-0.085	-0.335 **	-0.027	0.262 *	0.076	0.2	-0.15	0.253 *	-0.168

R : Patrick index; R_1 : Margalef index; R_2 : Menhinick index; λ : Simpson index; H' : Shannon - Wiener index; N_1 : Hill index 1; N_2 : Hill index 2; E_1 : Pielou index; E_2 : Sheldon index; E_3 : Heip index; E_4 : Hill evenness index; E_5 : Alatalo index

3 小结

(1) 传统群落多样性测度法是将群落中的乔、灌、草混在一起直接计算群落多样性指数,而本文先获得乔、灌、草各层的多样性指数然后结合加权参数进行计算,将这样加权计算出来的多样性和不加权计算出来的多样性进行相关性分析。结果表明,两种总体多样性具有极显著的相关关系($P < 0.01$, $N = 67$),那么可以认为给定的经验权重系数是比较合理的,它没有影响客观生态意义反映,同时参数值也突出体现了群落中不同结构、不同层次对于群落总体多样性具有不同的贡献的特点。

(2) 从本文数据可以看出,在不同群落类型中,各项指数有明显不同,说明其与群落类型有关^[11]:第一,群落物种数量越多,则丰富度较大;第二,结构越复杂、层次越分明的群落其多样性指数越高;第三, Simpson 指数侧重于反映优势种的地位^[12],与其它多样性指数变化趋势相反;第四,在物种树木一定的情况下,均匀度指数只与个体树木或生物量等指标在各个物种中分布的均匀程度有关,即群落中建群种或优势种作用明显的群落,其均匀度偏低,如群落IV为单优势种群落,均匀度指数最低;第五,从干到湿的水分梯度来讲,中生环境乔木植物群落的多样性最大(图3),而趋向于干湿两个极端环境的多样性逐渐减低。

(3) 各项多样性指数与海拔相关关系显著($P < 0.05$),有的极显著($P < 0.01$),除 Simpson 指数和均匀性指数 E 单调递减外,其它指数均呈相同的变化趋势,即自低海拔至高海拔指数逐渐递增,本地区为森林群落分布区,所出现的草地群落是由于森林破坏退化导致的,和亚高山草甸群落有本质区别,因此此结论和传统结论并无矛盾。Simpson 递减趋势的原因是它主要反映优势种在群落中的作用,而均匀度指数递减可能是由于干扰而导致的。

(4) 多样性指数由物种重要值作为原始数据计算得出,因此从多样性指数的变化可以看出植被种群的变化趋势;DCCA 排序由多样性指数和环境因子中心化后的数据计算得出,因此其结果不仅反映样方之间多样性指数的相似性,而且反映样方多样性变化与环境因子组成的相互关系。

(5) DCCA 第一轴反映了海拔变化引起的土壤水分的变化,第二轴基本上反映了人类对群落的干扰程度。随着海拔升

高,土壤水分越来越多,中生环境下多样性达到最大;人类干扰程度从低海拔到高海拔逐渐减小。此地区强烈的人为干扰活动,对该地区的植物多样性产生了强烈影响。如何有效减少人类干扰将是今后研究需要解决的问题。

(6) 各种环境因子与植物在某个地区都是一个整体,作为一个系统存在,其中各因子之间又相互影响、相互作用,任何一个因子的作用都不可能离开其它因子而独立作用,物种多样性与环境因子的关系很复杂,可能因地理位置不同、空间位置不同而有所差异,这种错综复杂的关系有待进一步研究。

References

- Chen TG (陈廷贵), Zhang JT (张金屯). Plant species diversity of Shenweigou in Guandi Mountains (Shanxi, China) I: Richness, evenness and diversity indexes. *Chin J Appl Environ Biol* (应用与环境生物学报), 2000, **6**: 406 ~ 411
- Wang DB (汪殿蓓), Ji SY (暨淑仪), Chen FP (陈飞鹏). A review on the species diversity of plant community superiority. *Chin J Ecol* (生态学杂志), 2001, **20**: 55 ~ 60
- He JS (贺金生), Chen WL (陈伟烈), Li LH (李凌浩). Community diversity of the main types of the evergreen broad-leaved forest in the Eastern part of the Middle Subtropical China. *Acta Phytoecol Sin* (植物生态学报), 1998, **22**: 303 ~ 311
- Zhang F (张峰), Zhang JT (张金屯), Shangguan TL (上官铁梁). Plant diversity of forest community in Zhuweigou of Lishan Mountain nature reserve. *Acta Phytoecol Sin* (植物生态学报), 2002, **26**: 46 ~ 51
- Zhang JT (张金屯), Chai BF (柴宝峰), Qiu Y (邱扬), Chen TG (陈廷贵). Changes in species diversity in the succession of plant communities of abandoned land in Luliang Mountain, western Shanxi. *Biodiv Sci* (生物多样性), 2000, **8**: 378 ~ 384
- Zhang JT (张金屯). Quantitative Ecology. Beijing: Science Press (科学出版社), 2004. 77 ~ 96
- Zhang JT (张金屯). Canonical principal component analysis and its application to the study of vegetation-climate relationships in Shanxi, China. *Acta Geograph Sin* (地理学报), 1998, **56**: 256 ~ 263
- Wang CH (王翠红), Zhang JT (张金屯), Shangguan TL (上官铁梁). Analysis of relationships between species richness and distribution pattern of spermatophyte in Shanxi Province. *Bull Bot Res* (植物研究), 2004, **24**: 248 ~ 253
- He JS (贺金生), Chen WL (陈伟烈), Jiang MX (江明喜), Jin YX

- (金义兴), Hu D (胡东), Lu P (路鹏). Plant species diversity of the degraded ecosystems in the Three Gorges Region. *Acta Ecol Sin* (生态学报), 1998, **18**: 399 ~ 407
- 10 Wu Y (吴彦), Liu Q (刘庆), Qiao YK (乔永康), Pai KW (潘开文), Zhao CM (赵常明), Chen QH (陈庆恒). Species diversity changes in subalpine coniferous forests of different restoration stages and their effects on soil properties. *Acta Phytoecol Sin* (植物生态学报), 2001, **25**: 648 ~ 655
- 11 Chen TG (陈廷贵), Zhang JT (张金屯), Shangguan TL (上官铁梁), Zhang F (张峰), Wang QX (王巧仙). The study of diversity in Shenweigou of Guandi Mountain, Shanxi Province. *Acta Bot Bor - occid Sin* (西北植物学报), 2000, **20**: 638 ~ 646
- 12 Chen FP (陈飞鹏), Ji SY (暨淑仪), Wang DB (汪殿蓓), Hu HR (胡惠蓉). Determination and evaluation of the species diversity indices of weed community in the paddy field of Nanhong, Hainan Province. *J Huazhong Agri Univ* (华中农业大学学报), 2001, **20**: 438 ~ 441