

甘肃莲花山植物群落物种多样性对海拔梯度的响应

王德君¹, 韩国君², 高智辉^{3*}, 王云果³

(1. 甘肃莲花山国家级自然保护区管理局, 甘肃 康乐 731500; 2. 甘肃农业大学, 甘肃 兰州 730070;
3. 西北农林科技大学 林学院, 陕西 杨陵 712100)

摘 要:植物群落的物种多样性与海拔梯度的关系是植物生态学的研究热点。通过对甘肃莲花山自然保护区森林植物群落样地调查, 计算乔木层、灌木层和草本层的多样性指数、丰富度指数和均匀度指数, 分析森林植物群落物种多样性与海拔的之间的相关性, 以此来探讨山地植物群落的变化对海拔梯度的响应, 为山地植被的垂直地带性分布提供物种多样性分析的依据。通过分析得出, 甘肃莲花山植物群落乔木层的丰富度指数较小, 而灌木层的多样性指数较大, 乔木层和草本层的均匀度指数在群落间变异幅度较大, 而灌木层变异较小。在中海拔地区白桦、红桦和糙皮桦群落的针阔叶混交林中乔木层的丰富度指数、灌木层的多样性指数大于其他海拔地区。在低海拔地区乔木层、灌木层的群落物种多样性较高, 而草本层的群落物种多样性较低。

关键词:植物群落; α 多样性指数; 丰富度; 均匀度

中图分类号: S718.545 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-7461(2020)06-0096-07

Response of Community Species Diversity to Elevation Gradient in the
Lianhuashan Nature Reserve

WANG De-jun¹, HAN Guo-jun², GAO Zhi-hui^{3*}, WANG Yun-guo³

(1. Gansu Lianhuashan Nature Reserve Administration, Kangle 731500, Gansu, China; 2. Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, Gansu, China; 3. College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China)

Abstract: Species richness index, species diversity index and evenness index were used to measure the diversity of forest plant communities occurring in Lianhuashan Nature Reserve. The diversity characteristics of community species were analyzed, the variation of community species diversity along the elevation gradient was studied, and the phases of each index were calculated. The suitability and conformity of each index were tested. The diversity index of shrub layer was higher than those of herb layer and tree layer. The richness index of tree layer was lower than those of shrub layer and herb layer. The evenness index of the tree layer and herb layer varied greatly between the communities, but the shrub layer did not. The species diversity index of coniferous broad-leaved mixed forest at medium altitude area was higher than those in other elevations.

Key words: plant community; α diversity index; richness index; evenness index

植物群落物种多样性是植物群落的重要特征之一; 是维持群落结构和功能稳定性的物质基础^[1]。其中植物群落物种多样性与海拔梯度的关系是这一领域一直以来的研究热点和难点^[2-4]。植物群落的空间异质性是对自然环境的一种适应性表现, 但同

时也对群落中植物物种的分布产生影响, 体现在群落物种多样性指数的变化^[5]。海拔梯度的变化是光照、水分、温度等生境因子变化的综合体现, 局域范围内的山地小气候造成植物群落物种多样性的海拔梯度格局的差异性, 也反映物种的丰富度、多样性、

收稿日期: 2020-04-30 修回日期: 2020-08-28
基金项目: 国家自然科学基金(31960631)。
作者简介: 王德君, 高级工程师。研究方向: 自然保护区管理。E-mail: 2932339643@qq.com
* 通信作者: 高智辉, 高级实验师。研究方向: 森林病虫害。E-mail: gaozhihui263@163.com

均匀度与群落的相互关系。

甘肃莲花山处位于黄土高原向青藏高原的过渡地带,由 7 座海拔 3 000 m 以上的山峰和山间谷地组成,相对海拔高差达 1 500 m,随海拔增高,降水量从 400 mm 增至 800 mm,土壤类型各异,植物种类丰富,区系成分复杂,有种子植物 910 余种^[7],植被类型具有典型的温带山地垂直地带性分布特征,海拔由高向低依次分布有常绿针叶林、针阔叶混交林和落叶阔叶林^[6]。关于甘肃莲花山植物群落物种多样性与海拔梯度的关系还未见报道。以甘肃莲花山典型森林植物群落调查为基础,研究该区域植物群落多样性的海拔格局,有助于更好地理解植物对环境变化的适应,为甘肃莲花山生物多样性保护和自然保护区管理提供科学依据。

1 研究区概况

甘肃莲花山保护区位于甘肃省南部,东以洮河

为界,北以冶木河为界,属秦岭山脉的西段,地理坐标为 103°4′—103°5′E,34°5′—35°0′N。在南北水平挤压的作用下,形成了纬向隆起带及沉降带,由莲花山及山间谷地组成保护区主体,且该区处于黄土高原和青藏高原两大高原的交界带。降水量随着海拔增高而递增,海拔 2 100 m 左右的东北部,降水量>500 mm,海拔 2 500 m 以上的西南部,降水量>800 mm。在保护区内,海拔 1 800~2 200 m 河谷主要是栗钙土、红粘土,海拔 2 200~2 700 m 湿润中低山区主要为黑土,海拔 2 700~3 200 m 高山区为暗棕壤。保护区内小生境的差异较大,从河谷到最高峰的高差 1 500 m,不同海拔高度森林群落中物种组成与层片结构差异很大。依据乔木层的优势种划分为巴山冷杉林、青海云杉林、紫果云杉林、白桦林、糙皮桦林、红桦林、华山松林、辽东栎林和山杨林 9 种森林群落类型(表 1)。

表 1 甘肃莲花山森林植物群落分布

Table 1 Basic situation of forest plant community in Lianhuashan Nature Reserve

群落类型	海拔/m	优势种		坡向	坡度/(°)
		平均胸径/cm	最大胸径/cm		
巴山冷杉(<i>Abies fargesii</i>)	2 900~3 200	25.2	45.0	阴坡	25~30
青海云杉(<i>Picea crassifolia</i>)	2 800~3 100	20.3	52.0	半阴	15~30
紫果云杉(<i>Picea purpurea</i>)	2 800~3 000	18.0	28.0	半阴	25~30
白桦(<i>Betula platyphlla</i>)	2 500~2 700	13.4	17.1	半阳	15~30
糙皮桦(<i>Betula utilis</i>)	2 700~2 900	8.1	10.4	半阴	20~40
红桦(<i>Betula albo-sinensis</i>)	2 500~2 800	12.2	17.8	阴坡	15~25
华山松(<i>Pinus armandii</i>)	2 100~2 500	6.1	10.2	半阴	35~40
辽东栎(<i>Quercus liaotungensis</i>)	2 300~2 500	14.7	25.3	半阳	35~40
山杨(<i>Populus davidiana</i>)	2 300~2 500	6.4	13.8	半阴	20~25

2 研究方法

2.1 样地设置

根据植物群落分布的高度范围可分为 3 个海拔梯度,低海拔(2 100~2 500 m)、中海拔(2 500~2 900 m)和高海拔(2 800~3 200 m)。在每个海拔梯度调查固定样地,每个样地内设置 1 个(20 m×20 m)乔木样方,每个乔木样方内设置 2 个(10 m×10 m)的灌木样方,在每个灌木样方内随机布置 4 个(1 m×1 m)的草本样方。乔木样方调查实行每木检尺,记物种名、胸径、高度、冠幅和枝下高。灌木样方调查物种名、株数、高度、地径、冠幅。草本调查物种、平均高、盖度和数量。同时,记录样地的海拔高度、坡度、坡向和经纬度等。

2.2 群落物种多样性计算

群落物种多样性是一个群落结构和功能复杂性的度量。通过计算多样性指数(diversity index)、丰

富度指数(richness index)和均匀度指数(evenness index)反映群落物种多样性。为避免计算个体之间差异,物种多样性的测度指标可用生物量、重要值等取代。以重要值和盖度为测度指标测算物种多样性指数优于多度^[8-9]。以重要值为测度指标,分别计算乔木层、灌木层和草本层的群落物种多样性指数,公式如下^[10-11]。

乔木层重要值 $IV_{tr}=(\text{相对密度}+\text{相对高度}+\text{相对优势度})/3$

灌木层、草本层重要值 $IV_{sh}=(\text{相对高度}+\text{相对盖度})/2$

1) 丰富度指数

$$R_0=S$$
$$R_1=(S-1)/\ln N$$
$$R_2=S/\sqrt{N}$$

2) 多样性指数

Simpson 指数(D)

$$D_1=1-\sum_{i=1}^n P_i^2$$

$$D_2=1-\sum_{i=1}^n [N_i(N_i-1)/N(N-1)]$$

Shannon-Winener 指数(H')

$$H'=-\sum_{i=1}^n P_i \ln P_i$$

3)均匀度指数

Pielou 均匀度指数(J)

$$J_H=(-\sum_{i=1}^n P_i \ln P_i)/\ln S$$

$$J_D=(1-\sum_{i=1}^n P_i^2)/(1-1/S)$$

Alatalo 均匀度指数(E_a)

$$E_a=[1/\sum_{i=1}^n P_i^2-1]/[\exp(-\sum_{i=1}^n P_i \ln P_i)-1]$$

式中, S 第 i 物种所在样方内的物种总数; N_i 第 i 物种重要值; N 第 i 物种所在样方所有物种的重要值之和; $P_i=N_i/N$ 第 i 物种相对重要值。

2.3 数据统计与分析

以海拔高度将样地数据合并计算,取其平均值。用 SPSS21.0 对不同海拔高度植物群落各层数据进行 One-way ANOVA 单因素方差分析。用 Origin9.1 进行作图。

3 结果与分析

3.1 植物群落物种多样性特征

从森林植物群落的不同层次来看,丰富度指数(R_0 、 R_1 、 R_2)均表现为灌木层>草本层>乔木层(表 2)。灌木层 Simpson 多样性指数(D_1)、Shannon-wiener 多样性指数(H')均显著大于乔木层。由于植物群落所处的微生境和演替阶段的不同,不同群落类型的物种数差异较大。甘肃莲花山各森林植物群落类型,乔木层平均有物种 4.4 个,灌木层平均有物种 21.1 个,草本层平均有物种 18.8 个。灌

木层与草本层、乔木层的 Simpson 多样性指数(D_1)相差 2.4、5 倍,灌木层与草本层、乔木层的 Margalef 丰富度指数(R_1)相差 1.6、6.2 倍,灌木层与草本层、乔木层的 Alatalo 均匀度指数(E_a)相差 10、14.8 倍。Simpson 多样性指数为(D_1)、Margalef 丰富度指数(R_1)和 Alatalo 均匀度指数(E_a)能更敏感地反映植物群落各层之间的物种多样性差异。

从乔木层、灌木层、草本层调查数据的离散程度(标准误)来看,各层的丰富度指数、物种多样性(D_1 、 D_2)和均匀度指数(E_a)均为草本层最大,乔木层最小。在莲花山森林植物群落中乔木的物种数和个体局部空间分布差异较小,而灌木和草本的差异较大。

3.2 植物群落物种多样性与海拔梯度的关系

3.2.1 乔木层群落物种多样性与海拔的关系 常用多样性指数(D_1 、 D_2 、 H')、丰富度指数(R_0 、 R_1 、 R_2)和均匀度指数(J_H 、 J_D 、 E_a)反映群落物种多样性。随海拔高度增加乔木层的物种丰富度指数、多样性指数和均匀度指数呈先增大再减小的变化规律,中海拔>高海拔>低海拔(图 1)。海拔 2 200~2 800 m 白桦、红桦群落的多样性指数较高,而辽东栎群落常形成单优群落,辽东栎群落的多样性指数最低。白桦群落、红桦群落混生其他树种,使其多样性高于其他群落类型。以物种数计算的丰富度指数 R_0 反映随海拔的变化趋势更为明显,海拔 2 200~2 700 m 白桦林、红桦林和糙皮桦群落丰富度指数为 4.83,比海拔低 1 800~2 200 m 的华山松、山杨和辽东栎群落的丰富度指数高 61%。Simpson 多样性指数(D_1)在中海拔 2 200~2 700 m 为 1.3,比低海拔 1 800~2 200 m 的多样性指数高 55%。Alatalo 均匀度指数(E_a)在海拔 2 200~2 700 m 为 1.62,比海拔 1 800~2 200 m 和 2 700~3 200 m 的均匀度指数分别高 35%和 17%。

表 2 植物群落的物种多样性特征

Table 2 Species diversity characteristics of plant communities

层次	丰富度指数			多样性指数			均匀度指数		
	R_0	R_1	R_2	D_1	D_2	H'	J_H	J_D	E_a
乔木层	4.4±0.5*	0.7±0.1	0.9±0.1	1.11±0.1	0.6±0.05	0.6±0.05	0.8±0.02	0.8±0.03	1.4±0.10
灌木层	21.1±1.3	6.5±0.3	2.4±0.2	5.55±0.2	0.9±0.01	0.9±0.01	1.9±0.02	1.0±0.01	0.1±0.01
草本层	18.8±2.5	4.1±0.8	2.0±0.4	2.7±0.2	0.9±0.02	0.9±0.01	0.9±0.01	1.0±0.01	2.1±0.06

注:植物群落各层次的多样性指数为群落数据的平均值;* 平均值±标准误。

3.2.2 灌木层群落物种多样性与海拔的关系 灌木层的丰富度指数:高海拔>中海拔>低海拔;灌木层的多样性指数:中海拔>高海拔>低海拔;而均匀度指数未呈明显规律(图 2)。在高海拔地区植物群落的丰富度指数(R_2)比低海拔地区高 30.4%。糙皮桦群落灌木层的多样性指数比山杨、辽东栎群落

高 28.4%,中海拔地区糙皮桦林下灌木层能够接受到比较充分的光照,生长繁茂,低海拔地区山杨群落受人为干扰的影响,灌木层的多样性指数较低,辽东栎林为多代萌生,常形成纯林,林下植物稀少。

3.2.3 草本层群落物种多样性与海拔的关系 草本层多为 1 年生植物,个体数记数难度较大,在不同

生育阶段的草本个体所占空间差异也很大,草本层以重要值作为多样性指数的测度指标,比较它们作为测度指标计算的多样性指数更为合理。草本层的丰富度指数和多样性指数均呈现规律为低海拔>高海拔>中海拔;低海拔地区草本层的均匀度指数大于中海拔、高海拔地区(图 3)。在低海拔地区的华山松、山杨和辽东栎群落草本层的丰富度指数(R_1) 5.55 是中海拔地区的白桦、红桦和糙皮桦群落的丰富度指数 2.64 的 2.1 倍。

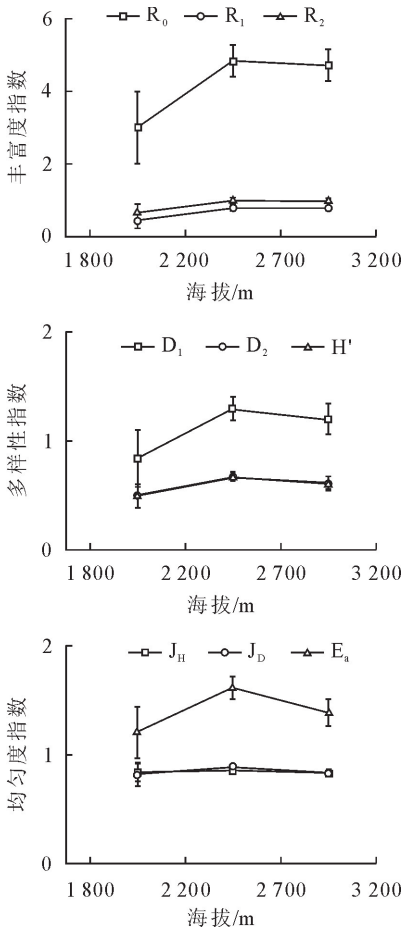


图 1 乔木层群落物种多样性与海拔的关系
Fig. 1 Relationship of diversity index and altitude in tree layer

3.3 植物群落物种多样性指数相关性

植物群落物种多样性指数包括多样性指数、丰富度指数和均匀度指数,以重要值为测度指标计算的各指数之间的相关系数(表 3)。结果表明,均匀度指数(E_a)与丰富度指数(R_1)的相关系数 $r = -0.477$,呈显著负相关($P < 0.05$)。均匀度指数(E_a)与多样性指数(D_1)、均匀度指数(J_H)的相关系数分别为 -0.711 、 -0.868 ,呈极显著负相关($P < 0.01$)。均匀度指数(E_a)与其他指数相关性不显著。丰富度指数(R_0 、 R_1 、 R_2)与多样性指数(D_1 、 D_2 、 H')相关性高,其相关系数在 $0.699 \sim 0.901$,呈极显著相关($P < 0.01$)。说明这 9 种群落物种多样

性指数符合程度高,在描述群落的物种多样性方面具有相似作用。

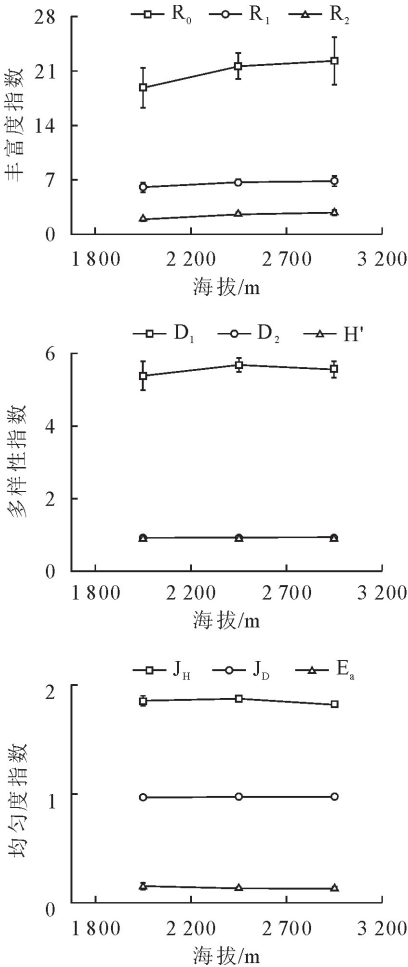


图 2 灌木层群落物种多样性与海拔的关系
Fig. 2 Relationship of diversity index and altitude in shrub layer

4 结论与讨论

4.1 结论

甘肃莲花山保护区植物群落乔木层的多样性指数、丰富度指数均小于灌木层、草本层。在不同森林植物群落之间乔木层和草本层的均匀度指数变异幅度较大,而灌木层变异较小。Simpson 多样性指数为(D_1)、Margalef 丰富度指数(R_1)和 Alatalo 均匀度指数(E_a)能更敏感反映植物群落各层之间的物种多样性差异。在低海拔地区乔木层、灌木层的群落物种多样性较高,而草本层的群落物种多样性较低。在中海拔地区白桦、红桦和糙皮桦的针阔叶混交林中乔木层的丰富度指数、灌木层的多样性指数大于其他海拔地区。

甘肃莲花山森林植物群落的物种丰富度指数(R_0 、 R_1 、 R_2)、多样性指数(D_1 、 D_2 、 H')和均匀度指数(J_H 、 J_D)相关性高,均匀度指数(E_a)与其他各指数呈负相关。各指数在描述群落的物种多样性方面具有相似作用。

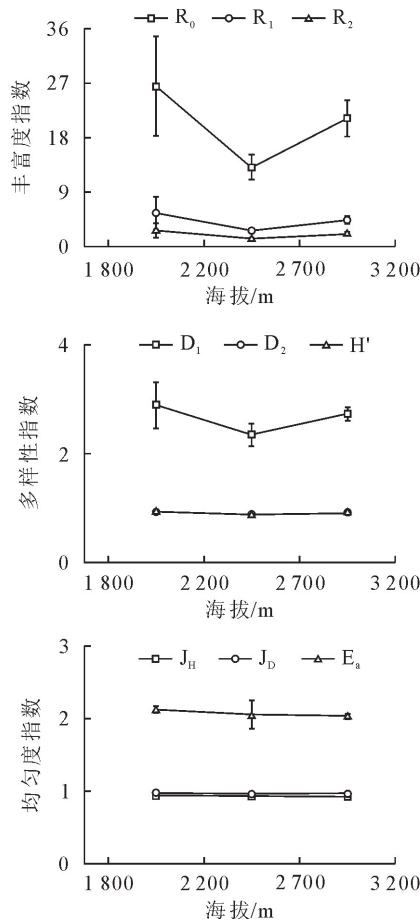


图3 草本层群落物种多样性与海拔的关系
Fig. 3 Relationship of diversity index and altitude in herb layer

表3 植物群落物种多样性指数相关性
Table 3 The correlation coefficient of diversity index

	丰富度指数			多样性指数			均匀度指数		
	R ₀	R ₁	R ₂	D ₁	D ₂	H'	J _H	J _D	E _a
R ₀	1								
R ₁	0.959 **	1.000							
R ₂	0.935 **	0.931 **	1.000						
D ₁	0.795 **	0.901 **	0.708 **	1.000					
D ₂	0.838 **	0.779 **	0.699 **	0.749 **	1.000				
H'	0.846 **	0.791 **	0.707 **	0.763 **	0.998 **	1.000			
J _H	0.562 ***	0.736 **	0.486 *	0.942 **	0.542 *	0.558 *	1.000		
J _D	0.666 *	0.614 *	0.535 *	0.599 *	0.855 **	0.854 **	0.474 *	1.000	
E _a	-0.243	-0.477 *	-0.249	-0.711 **	-0.088	-0.111	-0.868 **	-0.012	1.000

注:显著性水平 * $P<0.05$; ** $P<0.01$ 。

制黄土区辽东栎群落发育的主要因子,通过研究辽东栎细根反映植物群落对生态因子的响应^[17]。海拔和地下水埋深是影响天山南麓山前平原植物群落物种多样性的重要因素^[18]。制约吕梁山植物群落结构及分布格局的主导因子是海拔高度和人类干扰^[19]。甘肃莲花山保护区内地形起伏多变,从洮河沿岸到莲花山主峰(3 578 m),由于一些植被类型垂直分布的范围较大,受人类活动影响的地区群落物

4.2 讨论

灌木层、草本层的多样性指数受乔木层郁闭度影响较大,均匀度指数变化比较复杂。白龙江上游森林植物群落各层的多样性指数、丰富度指数大小为灌木层>草本层>乔木层,而均匀度指数无明显规律^[12]。山西关帝山植物群落各层的多样性指数和丰富度指数草本层>灌木层>乔木层,均匀度指数无差异^[13]。山西五鹿山森林群落以重要值计算的丰富度指数、Shannon-Wiener 和 Simpson 多样性指数呈现草本层>灌木层>乔木层^[14]。调查尺度也是影响各地域植物群落物种多样性差异的重要因素。当扩大取样面积时,物种数及其个体数均逐渐增加,Shannon 多样性指数却下降,表明植物群落具有环境梯度或小尺度生境异质性,其物种组成存在较大的空间异质性^[15]。甘肃莲花山森林植物群落乔木层的丰富度指数最小。由于本研究灌木层采用 10 m×10 m 的大样方调查,灌木层均匀度指数变化较小,与其他地区的研究结果会有所差异。

群落物种多样性的空间变化是植物群落物种多样性的海拔格局的反映。海拔高度直接决定着该区域的水、热条件,是生境影响植物群落物种多样性因子的主导因子。研究表明,气温和土壤含水量决定了局域植被生物量的大小。河西走廊光伏电站的电板正下方遮阴、低湿的微环境,使植物生长受到影响,植被地上生物量相对较低^[16]。水热的差异是限

种多样性差异较大。人类活动强度的变化由低海拔向高海拔渐弱。在干扰较大的山杨林、华山松林中乔木层的物种数较少,而灌木层和草本层的物种数较多,云杉林、冷杉林群落较高的郁闭度导致草本层的物种多样性很低。

海拔高度影响着温度、湿度和光照等多种生态因子,物种多样性的海拔梯度格局,可反映物种生态学特性及对环境的适应性^[20]。随着海拔升高植物

群落的物种丰富度和多样性逐渐增加,优势度、均匀度逐渐降低^[21]。山西芦芽山植物群落的丰富度指数和物种多样性指数随着海拔高度的增加而逐渐减小^[22]。陕西佛坪自然保护区乔木层的物种多样性沿海拔梯度增加先增后减的趋势,即在中海拔上物种多样性最高,而草本层的物种多样性呈先降后升的趋势^[23]。神农架南坡沿海拔 600~3 100 m 垂直梯度中,海拔 1 400~1 500 m 混交林的多样性较高,草本层丰富度与海拔之间无显著相关^[24]。河北小五台山北坡乔木层的物种丰富度随海拔升高而逐渐减小,随着海拔的升高, α 多样性指数先增大再减小^[25]。物种多样性随海拔升高先降低后增加,在群落演替的针阔混交林阶段达到最大^[12]。山西芦芽山各植被类型的物种多样性指数排列依次为落叶阔叶林 > 针阔叶混交林 > 针叶林^[22]。莲花山随海拔上升,其降水量逐渐增加。植物群落的物种多样性指数也随海拔上升而逐渐增大。由于植物群落受坡位、坡向、坡度等小生境的影响,多样性指数会出现波动。莲花山的乔木层随海拔出现先增加后减少,中海拔(2 200~2 800 m)的白桦、红桦群落的多样性指数较高,而低海拔的辽东栎群落常形成单优群落,随着保护措施的持续,辽东栎群落可能会逐渐挤压山杨群落。中海拔多样性较高,与当地经过干扰后先锋树种占领林窗形成单优群落,后经过若干年的保护,阳性树种开始混生在桦木类先锋群落中,形成混交林,是群落演替的中期。如果能够进一步排除干扰,先锋树种的成分可能进一步减少而其他优势树种就会因为适应当地环境而形成优势群落。如果持续低频干扰,按照中性理论,混交群落会一直持续,并维持较高的生物多样性。高海拔地区的冷杉林和云杉林群落较高的郁闭度,说明高海拔地区干扰较少,群落处于单优顶级群落。这与保护区禁止采伐有很大关系,要坚持禁伐,以此来维持顶级群落,发挥顶级群落的生态功能。

参考文献:

[1] 邓清月,张晓龙,牛俊杰,等.晋西北饮马池山植物群落物种多样性沿海拔梯度的变化[J].生态环境学报,2019,28(5):865-872.
DENG Q Y,ZHANG X L,NIU J J,*et al.* Species diversity of plant communities along an altitude gradient in Yinmachi mountain,Northwestern Shanxi,China [J]. Ecology and Environmental Sciences,2019,28(5):865-872. (in Chinese)

[2] 余娇娥,司宏敏,吴雪涛,等.海拔梯度下元谋干热河谷植物群落特征[J].生态环境学报,2018,27(11):2017-2022.
YU J E,SI H M,WU X T,*et al.* Characteristics of plant communities in Yuanmou dry-hot valley under different elevation gradients [J]. Ecology and Environmental Sciences,2018,27

(11):2017-2022. (in Chinese)

[3] MARKS C O,MULLER-LANDAU H C,TILMAN D,*et al.* , Tree diversity, tree height and environmental harshness in eastern and western North America [J]. Ecology Letters, 2016,19(7):743-751.

[4] DING J Y,ZHAO W W,DARYANTO S,*et al.* The spatial distribution and temporal variation of desert riparian forests and their influencing factors in the downstream Heihe river basin,China [J]. Hydrology and Earth System Sciences,2017,21 (5):2405-2419.

[5] 叶万辉,马克平,马克明,等.北京东灵山地区植物群落多样性研究Ⅸ:尺度变化对 α 多样性的影响[J].生态学报,1998,18 (1):10-14.
Ye Wanhui, Ma Keping, Ma Keming, *et al.* Studies on plant community diversity in Donglingshan mountain, Beijing, China IX: the influence of scale on α diversity[J]. Acta Ecologica Sinica,1998,18(1):10-14. (in Chinese)

[6] 韩庆杰,孙学刚,刘秀生,等.莲花山主要森林群落空间格局的分形特征[J].生态学杂志,2008,27(02):185-191.
HAN Q J,SUN X G,LIU X S,*et al.* Fractal characters of spatial patterns of main forest communities in Lianhua mountain [J]. Chinese Journal of Ecology,2008,27(2):185-191. (in Chinese)

[7] 李佳喜,张耀甲.甘肃莲花山自然保护区种子植物区系的研究[J].兰州大学学报:自然科学版,2000,36(5):98-106.
LI J X,ZHANG Y J. A study on the spermatophytic flora from Lianhua mountain nature reserve in Gansu Province[J]. Journal of Lanzhou University: Natural Sciences[J]. 2019,36(5): 98-106. (in Chinese)

[8] 张林静,岳明,赵桂仿,等.新疆阜康地区植物群落物种多样性及其测度指标的比较[J].西北植物学报,2002,22(2):350-358.
ZHANG L J,YUE M,ZHAO G F,*et al.* Plant community species diversity on oasis-desert ecotone in Fukang of Xinjiang and comparison of its measurement[J]. Acta Bot. Boreal. -Occident. Sin.,2002,22(2):350-358. (in Chinese)

[9] 韩国君,孙学刚,韩庆杰.不同测度指标对莲花山森林植物群落 α 多样性指数的影响[J].甘肃农业大学学报,2004,39(1):66-71.
HAN G J,SUN X G,HAN Q J. Effects of different measurement criteria on α diversity indexes of forest plant communities in the Lianhua mountains[J]. Journal of Gansu Agricultural University,2004,39(1):66-71. (in Chinese)

[10] MAGURRANAE. A E. Ecological diversity and its measurement[M]. New Jersey:Princeton University Press,1988.

[11] 马克平,刘玉明.生物群落多样性的测度方法 I α 多样性的测度方法:下[J].生物多样性,1994,2(4):231-239.
MA K P,LIU Y M. Measurement methods of biological diversity[J]. Chinese Biodiversity,1994,2(4):231-239. (in Chinese)

[12] 郭正刚,刘慧霞,孙学刚,等.白龙江上游地区森林植物群落物种多样性的研究[J].植物生态学报,2003,27(3):388-395.
GUO Z G,LIU H X,SUN X G,*et al.* Caracrstics of species diversity of plant communities in the upper reaches of Bailong river[J]. Acta Phytocologica Sinica ,2003,27(3):388-395.

(in Chinese)

[13] 陈廷贵,张金屯. 山西关帝山神尾沟植物群落物种多样性与环境关系的研究 I: 丰富度、均匀度和物种多样性指数[J]. 应用与环境生物学报, 2000, 6(5): 406-411.

CHEN T G, ZHANG J T. Plant species diversity of Shenweigou in Guandi mountains, Shanxi, China. I: richness, evenness and diversity indexes[J]. Chin. J. Appl. Environ. Biol., 2000, 6(5): 406-411. (in Chinese)

[14] 曲波,苗艳明,张钦弟,等. 山西五鹿山植物物种多样性及其海拔梯度格局[J]. 植物分类与资源学报, 2012, 34(4): 376-382.

QU B, MIAO Y M, ZHANG Q D, *et al.* Plant diversity and its elevational gradient patterns in Wulu mountain[J]. Plant Diversity and Resources, 2012, 34(04): 376-382. (in Chinese)

[15] 么旭阳,胡耀升,刘艳红. 长白山阔叶红松林典型森林群落功能多样性及其与地形因子的关系[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2014, 42(10): 95-102.

YAO C Y, HU Y S, LIU Y H. Functional diversity of typical broad-leaved Korean pine forest communities in Changbai Mountain and its relationship with topographical factors[J]. Journal of Northwest A&F University: Nat. Sci. Ed., 2014, 42(10): 95-102. (in Chinese)

[16] 张芝萍,尚雯,王祺,等. 河西走廊荒漠区光伏电站植物群落物种多样性研究[J]. 西北林学院学报, 2020, 35(2): 190-196.

ZHANG Z P, SHANG W, WANG Q, *et al.* Biodiversity of herbaceous species under large photovoltaic(PV) power stations in desert region of Hexi corridor[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2020, 35(2): 190-196. (in Chinese)

[17] 邓磊,关晋宏,高万里,等. 黄土区辽东栎群落细根生物量对物种多样性及气候的响应[J]. 西北林学院学报, 2018, 33(5): 22-28.

DENG L, GUAN J H, GAO W L, *et al.* Effects of species diversity and environmental gradients on fine root biomass of *Quercus Liaotungensis* forest in the Loess region[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2018, 33(5): 22-28. (in Chinese)

[18] 赵振勇,王让会,尹传华,等. 天山南麓山前平原植物群落物种多样性及空间分异研究[J]. 西北植物学报, 2007, 24(4): 4784-4790.

ZHAO ZY, WANG R H, YIN C H, *et al.* Species diversity and spatial heterogeneity of plant communities in piedmont plain of South slope of Tianshan Mountains[J]. Acta Bot. Boreal.-Occident. Sin., 2007, 24(4): 4784-4790. (in Chinese)

[19] 李晋鹏,郭东罡,张秋华,等. 山西吕梁山南段植物群落的生态梯度[J]. 生态学杂志, 2008, 27(11): 1841-1846.

LI J P, GUO D G, ZHANG Q H, *et al.* Ecological gradients of plant communities in South Lùliang Mountains of Shanxi[J]. Chinese Journal of Ecology, 2008, 27(11): 1841-1846. (in Chinese)

[20] 唐志尧,方精云. 植物物种多样性的垂直分布格局[J]. 生物多样性, 2004, 12(1): 20-28.

TANG Z Y, FANG J Y. A review on the elevational patterns of plant species diversity[J]. Biodiversity Science, 2004, 12(1): 20-28. (in Chinese)

[21] 刘秀珍,张峰,张金屯. 管涔山撂荒地植物群落演替过程中物种多样性研究[J]. 武汉植物学研究, 2008, 26(4): 391-396.

LIU X Z, ZHANG F, ZHANG J T. Study on species diversity during the succession of plant communities on abandoned farmlands in Guancen mountains, Shanxi[J]. Journal of Wuhan Botanical Research, 2008, 26(4): 391-396. (in Chinese)

[22] 张丽霞,张峰,上官铁梁. 芦芽山植物群落的多样性研究[J]. 生物多样性, 2000, 8(4): 361-369.

ZHANG L X, ZHANG F, SHANGGUAN T L. Vegetation diversity of Luya mountains[J]. Biodiversity Science, 2000, 8(4): 361-369. (in Chinese)

[23] 岳明,张林静,党高弟,等. 佛坪自然保护区植物群落物种多样性与海拔梯度的关系[J]. 地理科学, 2002, 22(3): 349-354.

YUE M, ZHANG L J, DANG G D, *et al.* The relationships of higher plants diversity and elevation gradient in Foping national reserve[J]. Scientia Geographica Sinica, 2002, 22(3): 349-354. (in Chinese)

[24] 沈泽昊,胡会峰,周宇,等. 神农架南坡植物群落多样性的海拔梯度格局[J]. 生物多样性, 2004, 12(1): 99-107.

SHEN Z H, HU H F, ZHOU Y, *et al.* Altitudinal patterns of plant species diversity on the Southern slope Shennongjia, Hubei, China[J]. Biodiversity Science, 2004, 12(1): 99-107. (in Chinese)

[25] 刘增力,郑成洋,方精云. 河北小五台山北坡植物物种多样性的垂直梯度变化[J]. 生物多样性, 2004, 12(1): 137-145.

LIU Z L, ZHENG C Y, FANG J Y. Changes in plant species diversity along an elevation gradient on Mt. Xiaowutai, Hebei, China[J]. Biodiversity Science, 2004, 12(1): 137-145. (in Chinese)