

DOI: 10.5846/stxb201403220514

张喜,王莉莉,刘延惠,文弢,崔迎春,姜霞,张佐玉,霍达,李丹.喀斯特天然林植物多样性指数和土壤理化指标的相关性.生态学报,2016,36(12):

Zhang X, Wang L L, Liu Y H, Wen T, Cui Y C, Jiang X, Zhang Z Y, Huo D, Li D. Correlation study on plant diversity indices and soil physical and chemical indicators of karst natural forest, Southern Guizhou Province, China. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(12): - .

喀斯特天然林植物多样性指数和土壤理化指标的相关性

张喜^{1,*}, 王莉莉^{1,2}, 刘延惠¹, 文弢^{1,2}, 崔迎春¹, 姜霞¹, 张佐玉¹, 霍达¹,
李丹^{1,2}

1 贵州省林业科学研究院, 贵阳 550011

2 贵州大学, 贵阳 550005

摘要:植物多样性的土壤生态系统功能是喀斯特生态研究的热点之一。本文在贵州省茂兰国家级自然保护区不同功能区(干扰等级)内采用野外样地调查和实验室分析相结合的方法,分析了 41 个喀斯特森林样地的植物多样性指数和土壤理化指标值的变化规律与相关性。结果表明:(1)依据乔木层物种重要值聚类法划分的 5 个喀斯特森林类型包括小叶栎树-青冈栎林、香叶树-枫香林、香椿-香叶树林、灯台-小花楸木林和榿木-马尾松林,由核心区、缓冲区、实验区至外缘区,乔木层植物多样性指数、林地岩石裸露率、土壤蓄水量、肥力及养分指标呈降低趋势。(2)因子分析表明不同层片植物多样性和不同土层土壤理化因子的相关趋势性各异。相关显著的因子对数量率呈乔木>灌木>草本的趋势,乔木植物多样性因子起主导作用。(3)喀斯特森林乔木层植物多样性指数和土壤理化指标的相关性分 3 种类型。直线型是植物多样性指数和土壤理化指标值相关性中较普遍的一类,相应指标对数量率为 39.84%;曲线型是植物多样性指数和土壤理化指标值相关性中机理较复杂的一类,相应指标对数量率为 46.10%,其中植物多样性指数有拐点值无生态意义的指标对数量率为 11.72%,有拐点值有生态意义且呈先降后升、或先升后降趋势的指标对数量率分别为 17.19%;无关型是植物多样性指数和土壤理化指标值相关性不显著,相应指标对数量率为 54.69%。(4)喀斯特地区水土资源管理为目标的营林措施中,天然林乔木层植物多样性指数对土壤物理、肥力和养分指标响应的拐点值可成为人工造林中物种数量与株数比例选择的参考依据之一。

关键词:茂兰国家级自然保护区;喀斯特天然林;植物多样性;土壤理化指标;相关性

Correlation study on plant diversity indices and soil physical and chemical indicators of karst natural forest, Southern Guizhou Province, China

ZHANG Xi^{1,*}, WANG Lili^{1,2}, LIU Yanhui¹, WEN Tao^{1,2}, CUI Yingchun¹, JIANG Xia¹, ZHANG Zuoyu¹, HUO Da¹, LI Dan^{1,2}

1 Guizhou Provincial Academy of Forestry, Guiyang 550011, China

2 Guizhou University, Guiyang 550005, China

Abstract: Soil ecosystem function and plant diversity is receiving much attention in karst ecological studies. Changes and correlation laws in plant diversity indices and soil physical and chemical indicators of 41 karst forest plots were analyzed on different functional areas in the Maolan National Nature Reserve of southern Guizhou Province, China. This research adopted the combination method of wild field plot investigation and laboratory analysis. Results show: (1) The importance

基金项目:林业公益性行业科研专项(201104002);贵州省科技厅项目(黔省专合字 TZJF2008-17, 2009-2083, 2008-73, 黔科合字 2007-1021, 2010-05)

收稿日期:2014-03-22; 网络出版日期:2015-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhangxigzfa@tom.com

values of the arbor species clustering method resulted in five karst forest types: *Koelreuteria minor*-*Cyclobalanopsis glauca* forest, *Lindera communis*-*Liquidambar formosana* forest, *Toona sinensis*-*Lindera communis* forest, *Cornus controversa*-*Cornus parviflora* forest and *Loropetalum chinense*-*Pinus massoniana* forest. The arbor plant diversity indices, bare rock coverage, soil water storage indicators, soil fertility indicators and nutrient indicators showed a decreasing trend from the core area, to the buffer area, to the experimental area and to the outer area. The Margalef index, Simpson index, Shannon-Wiener index and Pielou index of the arbor and herb layer species showed a significant difference between some forest types. However, the diversity indices differences of the shrub layer were not significant. Significant differences of some indicators between the different forest types confirmed the influence of human disturbance to the karst forest in the natural recovery process. (2) Factor analysis revealed different correlation trends between the plant diversity factors of different layers, and the physical and chemical factors of different soil horizons. The analysis conformed to the general regularity of plant growth in the development of the arbor, shrub and herb layer and the co-evolution between the vegetation and soil system of karst forest in the natural recovery process. The number rate of significant factor-pairs of the soil physical and chemical indicators related to the arbor, shrub and herb plant diversity indices were 36.38%, 27.27% and 18.19%, respectively. The arbor plant diversity factor had the strongest relationship with the soil physical and chemical indicators. (3) The significant correlations between the arbor plant diversity indices and the soil physical and chemical indicators were divided into three types: i) Linear correlation is a general relationship between the plant diversity indices and soil physical and chemical indicators; 39.84% of the indicator-pairs were in this category, where the plant diversity indices increased to raise or lower the soil physical and chemical indicators accordingly. ii) Curve correlation is a complex relationship between the plant diversity indices and soil physical and chemical indicators; 46.10% of indicator-pairs are accounted for in this way. Inflection point values of the plant diversity indices without ecological meaning accounted for 11.72% where the relationship could be explained using straight lines or other models. The ecological inflection points of the plant diversity indices, which periodically impacted on soil physical and chemical indicators between the upwards and downwards trends of the quadratic curves, accounted for 17.19% of the indicator-pairs. The values of these plant diversity indices can be adjusted on the basis of the soil management goal in forest planting. iii) No significant correlation means the plant diversity indices are independent of the soil physical and chemical indicators, and planting measures for plant diversity indices cannot effectively change the soil physical and chemical indicators; 54.69% of indicator-pairs corresponded to this model. The different response modes aid the interpretation of ecosystem function through the plant diversity hypothesis. (4) Inflection points are the top values of the upwards and downwards trends in the quadratic curve response of arbor plant diversity indices to soil physical and chemical indicators. They are in index values of Margalef for 0.71—2.70 and 4.80—9.70, Simpson for 0.57-0.66 and 0.72-0.86, Pielou for 0.50-0.76 and 0.83—0.95 and Shannon-Wiener for 1.35—1.43 and 2.57—3.47, respectively. These values are used for one of the selection references of species and number proportions in artificial forestation.

Key Words: Maolan National Natural Reserve; karst natural forest; plant diversity indices; soil physical and chemical indicators; correlation

西南地区是全球三大喀斯特地貌集中分布区之一^[1],也是我国喀斯特石漠化的严重区域,石漠化治理工程中的植被恢复途径^[2-3]已成为喀斯特生态研究的热点之一。植被\土壤系统是不可分割的整体^[4-5],其相互作用机理^[6-7]是控制生态系统过程的重要机制,也是石漠化区水土治理^[8-10]的重要路径之一。虽然喀斯特天然林乔木层植物多样性指数同土壤养分指标值^[11-13]、灌木层植物多样性指数同土壤酶指标值^[14]的相关性已有报道,但不同文献选择的植物多样性指数和土壤指标不同、结论可比性较差,也缺少喀斯特天然林不同层片植物多样性指数和土壤理化指标值的相关性分析,植物多样性的土壤生态系统功能尚存许多疑惑。目前,植物多样性研究更多关注于天然林转化为人工林后^[15-16]、或人工林^[17-19]植物多样性指数和土壤指标值的相

相关性分析,天然林植物多样性指数和土壤理化指标值的相关性报道较少^[11-14,20-21]、二者间的相互关系尚待揭示,天然林和人工林间植物多样性指数同土壤理化指标值间相关性的异同点也有待比较。

茂兰国家级自然保护区近 $2.13 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 喀斯特森林是目前我国乃至世界罕见的中亚热带残存天然林,与其它喀斯特地区现存的大片石漠化景观相比,该片森林和喀斯特地貌组合的生态系统包含着复杂而深奥的科学内容^[1]。本文以该片喀斯特森林为对象,分析不同功能区(干扰等级)自然恢复过程中喀斯特天然林植物多样性指数和土壤理化指标值的变化规律及相关性,探索天然林植被\土壤系统的作用机理。研究对喀斯特石漠化土壤质量的森林经营管理,植被恢复中的物种选择与配置具有较高的理论价值与现实意义。

1 研究区概况

研究在贵州喀斯特森林生态站(CFERN)茂兰试验区进行。试验区位于贵州省荔波县南部的茂兰国家级自然保护区^[22]内,地理位置于 $N25^\circ 09' 20''$ — $25^\circ 20' 50''$ 、 $E107^\circ 52' 10''$ — $108^\circ 05' 40''$ 之间,海拔变幅 430—1078 m、大部分海拔在 800 m 左右。除局部有极少量砂页岩出露外,主要是纯质白云岩和石灰岩构成的裸露型喀斯特峰丛、峰林和峡谷地貌,以及由此发育的石灰土和喀斯特常绿落叶阔叶混交林。试验区属中亚热带山地季风湿润气候,年均温 15.3°C ,1 月均温 5.2°C 、7 月均温 23.5°C , $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温 4598.6°C ,生长期 237 d,年降雨量 1752.5 mm、集中分布于 4—10 月,年均相对湿度 83%,年太阳辐射量 $2.28 \times 10^{11} \text{ J/m}^2$ 。有维管束植物 146 科 408 属 827 种(变种)^[23],如石山木莲(*Manglietia calcarea*)、石生鼠李(*Rhammus calcicolus*)、石山桂(*Cinnamomum calcarea*)、石山楠(*Phoebe calcarea*)、荔波旌节花(*Stachyurus lipoensis*)、荔波瘤果茶(*Camellia rubimuricata*)、荔波大节竹(*Indosasa lipoensis*)、荔波槭(*Acer liponsis*)、五叶漆(*Toxicodendron quinquefoliolatum*)、荔波球兰(*Hoya lipoensis*)和黔苣苔(*Tengia scopulorum*)等钙生植物,以及掌叶木(*Handeliadendron bodimieri*)、穗花杉(*Amentotaxus argotaenia*)、伞花木(*Euryocrymbus cavalierii*)、香果树(*Emmenopterys henryi*)、四药门花(*Tetrathyrium subcordatum*)和翠柏(*Calocedrus macrolepis*)等国家重点保护植物。

2 调查与分析方法

2.1 植被调查

在茂兰国家级自然保护区的池塘和翁昂乡境内,沿核心区、缓冲区和试验区^[24]以及保护区外缘设置调查线路(图 1),不同功能区(干扰等级)系列建立的喀斯特森林调查样地数量分别为 12、17、9 和 3 个。

调查样地面积 $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$,记录海拔高度、坡向、坡位、坡度、母岩和土壤类型。每个样地分别对乔、灌、草三层植物进行调查,乔木幼苗中胸径(Diameter at breast height,缩写为 DBH,下同) $\geq 5 \text{ cm}$ 归为乔木、 $\text{DBH} < 5 \text{ cm}$ 归为灌木。样方面积在乔木层为 $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ 、灌木层为 $5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ 、草本层与枯落物层为 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$,其中灌木层、草本层与枯落物层各设 3 个,分别代表各层片植物发育或林地枯落物数量较好、一般、较差的类型。植被调查指标中,乔木层植物包括树种名、胸径、树高、株数、枝下高、冠幅及盖度,灌木层植物包括种名、地径、高度、株数及盖度,草本层植物包括种名、株数、高度及盖度。野外样地在调查当年 8 月上半月内一次完成。

2.2 土壤样品采集与分析

结合样地调查,在每个样地内按林下植被发育较好、一般、较差 3 个类型设置土壤采样点。由于喀斯特森林土壤剖面发育呈 A\D、A\B\D 型^[22],去除采样点枯枝落叶覆盖层后,仅分别土壤 A 层、或 A 层与 B 层等量取样,每层土壤样品总重量 1 kg 左右,将土样带回实验室在自然条件下风干,剔除肉眼可见根块和碎石之后,再用 1 mm 网筛除去根系和粗砂粒,研磨后测定土壤主要化学指标。同时按土壤剖面分层提取环刀、封口胶密封,带回实验室分析土壤主要物理指标。记录样地岩石裸露率,土层厚度、颜色、质地、根量和石砾量等。

土壤理化指标分析见《森林土壤分析方法》^[25],其中土壤密度、孔隙度、田间持水量和最大持水量采用环刀法,pH 值采用电位法,有机质量采用重铬酸钾氧化\外加加热法,全氮量采用半微量凯氏扩散法,水解氮量采用碱解-扩散法,全磷量采用碱溶-钼锑抗比色法,有效磷量采用盐酸-硫酸浸提法,全钾量采用碱溶-火焰光度

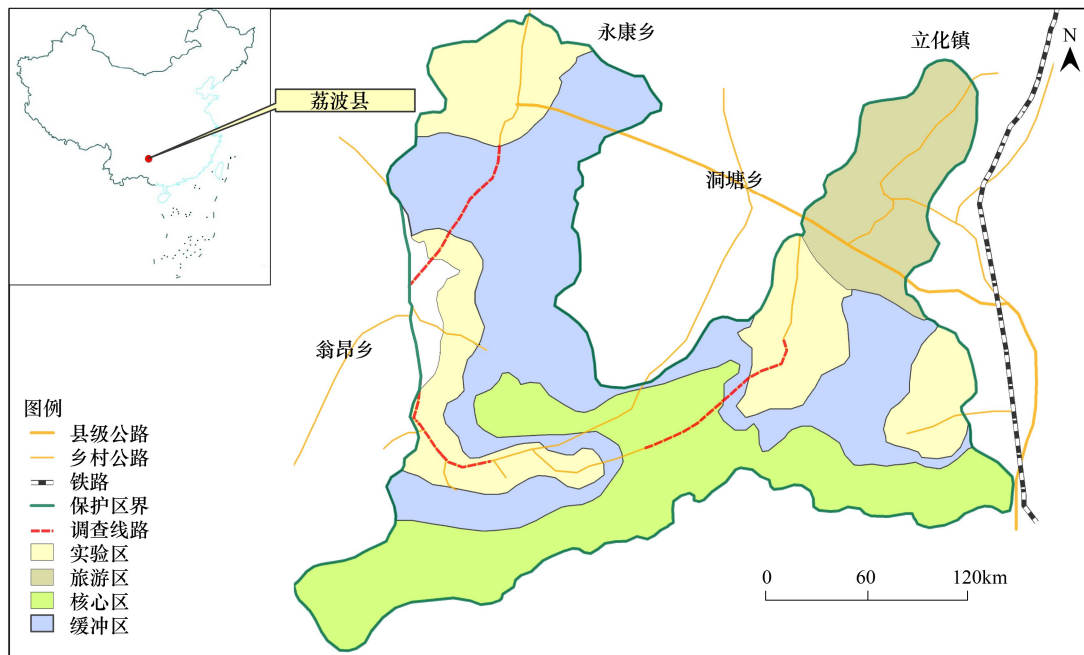


图1 喀斯特森林调查线路示意图

Fig.1 Sketch map of the karst forest field investigation transects in the Maolan experimental area

法,速效钾量采用乙酸铵浸提-火焰光度法,阳离子交换量采用乙酸铵交换法,交换性盐基量采用乙酸铵交换-中和滴定法。

2.3 数据处理

2.3.1 植物多样性指数^[26]计算

$$\text{乔木层物种重要值 } IV = \frac{RD + RF + RT}{300}$$

其中: RD 为相对优势度, RF 为相对频度, RT 为相对密度。

物种丰富度 Margalef 指数:

$$\text{Mar} = \frac{S - 1}{\ln N}$$

生态优势度 Simpson 指数:

$$\text{Sim} = 1 - \sum_{s=1}^S \frac{N_i(N_i - 1)}{N(N - 1)}$$

信息多样性 Shannon-Wiener 指数:

$$\text{Sha} = - \sum_{s=1}^S P_i \ln P_i, \text{均匀度 Pielou 指数: } \text{Pie} = \frac{H}{\ln S}$$

其中, S 为物种数, N_i 、 N 为某物种、所有物种株数, $P_i = N_i/N$ 。

2.3.2 数据统计分析

分析运用 SPSS 17.0^[27] 和 EXCEL 2003 软件。

3 结果分析

3.1 森林类型划分与植物多样性指数值变化

用调查样地乔木层物种重要值和层次聚类 (Hierarchical Cluster Analysis) 中最长距离法 (Furthest

Neighbor) 的欧氏距离 (Euclidean Distance) 聚类, 取距离值 15, 将 41 个调查样地划分成 5 个森林类型 (表 1, 图 2)。类型 I 为香叶树 (*Lindera communis*, IV=19.33, 下同。)-枫香 (*Liquidambar formosana*, 44.17) 林, 主要分布于洞塘乡板寨村黎明关和翁昂乡拉夯村坡林一带; 类型 II 为香椿 (*Toona sinensis*, 28.28)-香叶树 (31.04) 林, 主要分布于洞塘乡板寨村黎明关一带; 类型 III 为欆木 (*Loropetalum chinense*, 16.53)-马尾松 (*Pinus massoniana*, 32.35) 林, 主要分布于翁昂乡拉夯村肯岬一带; 类型 IV 为灯台 (*Cornus controversa*, 12.46)-小花楸木 (*Cornus parviflora*, 18.61) 林, 主要分布于洞塘乡板寨村白鹇山侧和翁昂乡拉夯村外内一带; 类型 V 为栲树 (*Koelreuteria minor*, 3.92)-青冈栎 (*Cyclobalanopsis glauca*, 4.86) 林, 主要分布于洞塘乡板寨村白鹇山和洞夜、以及翁昂乡拉夯村的拉桥-翁昂公路沿途一带。对照保护区功能区划^[22,24]和样地调查线路分析, 类型 I、II 和 IV 位于缓冲区和试验区, 类型 III 位于外缘区, 类型 V 位于核心区和缓冲区, 森林类型跨功能区分布同茂兰自然保护区的功能区呈相嵌性分布有关。

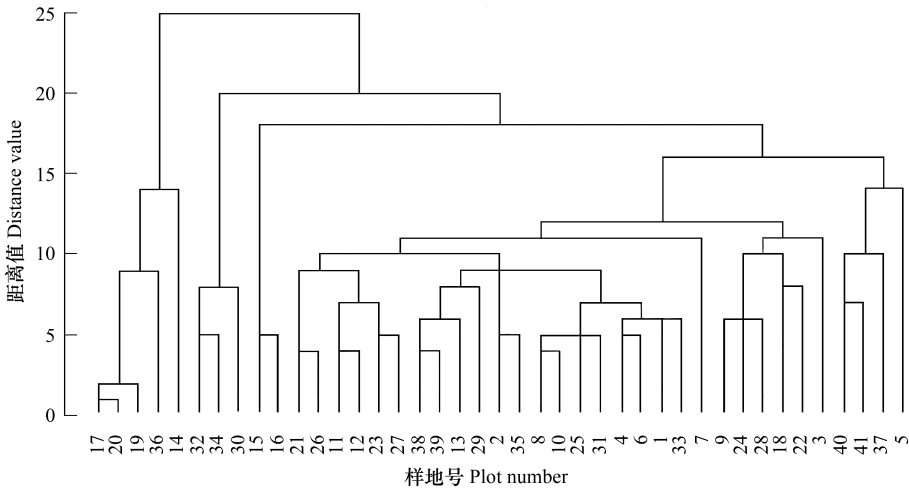


图 2 喀斯特森林调查样地聚类图

Fig.2 Cluster diagram from the karst forest plots in the Maolan experimental area

表 1 不同喀斯特森林类型植物多样性指数值变化

类型 Types	乔木层 Arbor layer				灌木层 Shrub layer				草本层 Herb layer			
	Margalef 指数 Mar	Simpson 指数 Sim	Pielou 指数 Pie	Shannon- Wiener 指数 Sha	Margalef 指数 Mar	Simpson 指数 Sim	Pielou 指数 Pie	Shannon- Wiener 指数 Sha	Margalef 指数 Mar	Simpson 指数 Sim	Pielou 指数 Pie	Shannon- Wiener 指数 Sha
I 香叶树-枫香林 LCLF forest	2.45 ^e	0.69 ^e	0.74 ^{cde}	1.68 ^e	4.63	0.88	0.92	2.72	2.57	0.77	0.88	2.20
II 香椿-香叶树林 TSLC forest	2.98	0.65 ^e	0.80 ^e	1.96 ^e	3.50	0.80	0.88	2.41	2.27	0.83	0.91	2.30
III 欆木-马尾松林 LCPM forest	3.31	0.78	0.82 ^{ac}	2.17 ^e	6.64	0.90	0.92	3.13	1.31 ^d	0.49	0.79	1.52 ^d
IV 灯台-小花楸木林 CCCP forest	2.95	0.77 ^e	0.85 ^{ac}	2.12 ^e	3.88	0.86	0.92	2.48	2.96 ^c	0.79	0.88	2.41 ^{ce}
V 栲树-青冈栎林 KMCG forest	4.76 ^a	0.91 ^{abd}	0.92 ^{abcd}	2.71 ^{abcd}	5.54	0.88	0.92	2.91	2.02	0.63	0.87	1.80 ^d

森林类型中 LCLF forest、TSLC forest、LCPM forest、CCCP forest 和 KMCG forest 分别是 *Lindera communis*-*Liquidambar formosana* forest、*Toona sinensis*-*Lindera communis* forest、*Loropetalum chinens*-*Pinus massoniana* forest、*Cornus controversa*-*Cornus parviflora* forest 和 *Koelreuteria minor*-*Cyclobalanopsis glauca* forest 的缩写, 各类型样地数量分别为 5、2、3、4 和 27。植物多样性指数中 Mar、Sim、Pie 和 Sha 分别是 Margalef index、Simpson index、Pielou index 和 Shannon-Wiener index 的缩写。a、b、c、d 和 e 为相应罗马字母代表顺序的森林类型中, 相同层片植物相同多样性指数值间 S 检验在 0.05 水平上差异显著的符号

不同喀斯特森林类型乔木层与草本层植物部分多样性指数差异显著, 灌木层植物多样性指数差异不显

著。不同森林类型中灌木层植物 Margalef 指数、Simpson 指数、Pielou 指数和 Shannon-Wiener 指数较高,乔木层与草本层植物多样性指数在不同类型间变化的趋势性不一致。乔木层植物多样性指数在类型 V 较高,其次是类型 III,类型 I、II 和 IV 的变幅较大。

3.2 土壤主要物理指标值变化

不同喀斯特森林类型间土壤主要物理指标差异不显著(表 2)。土壤密度,毛管孔隙度和总孔隙度,以及最大持水量和田间持水量值呈 A 层>B 层的趋势。非毛管孔隙度值在类型 I、III 和 V 呈 A 层>B 层的趋势,符合一般性规律;分析类型 II 和 IV 呈 B 层>A 层趋势的原因是其中 50%样地中部分土壤取样点母岩裂隙较多,B 层土壤的地下侵蚀现象^[22]致非毛管孔隙度值较高,另外 50%样地量仍呈 A 层>B 层的趋势。类型 V 林地岩石裸露率高,土壤密度值低,非毛管孔隙度和总孔隙度、以及最大持水量和田间持水量值高;类型 III 林地岩石裸露率低,土层薄,土壤密度值较小,非毛管孔隙度和总孔隙度、以及最大持水量和田间持水量值较大;类型 I、II 和 IV 林地岩石裸露率和土壤理化指标值居中,变幅较大。

表 2 不同喀斯特森林类型土壤主要物理指标值变化
Table 2 Soil physical indicators of different karst forest types in the Maolan experimental area

类型 Types	剖面特性 Profile property				孔隙度 Porosity			持水量 Water holding capacity	
	坡度 Slope / ⁰	裸岩率 RC /%	厚度 PD /cm	密度 Density/ (g/cm ³)	毛管孔 隙度 CP/%	非毛管 孔隙度 NCP/%	总孔隙度 TP/%	田间持水量 FWHC / (×10 ² g/kg)	最大持水量 MWHC/ (×10 ² g/kg)
I 香叶树-枫香林 LCLF forest	13.66	34.40	17.80	1.138/1.212	45.95/42.32	7.50/4.84	53.45/47.16	4.172/3.520	4.927/3.989
II 香椿-香叶树林 TSLC forest	11.22	25.96	11.48	1.281/1.331	41.80/36.70	6.00/7.85	47.80/44.55	3.138/2.639	3.740/3.347
III 榿木-马尾松林 LCPM forest	15.67	15.67	11.33	1.086/1.360	48.70/40.00	6.57/5.83	55.27/45.83	4.353/2.921	5.107/3.420
IV 灯台-小花楸木林 CCCP forest	16.25	69.50	12.25	0.958/1.203	56.30/44.78	3.08/4.50	59.38/49.28	5.743/3.810	6.384/4.106
V 栲树-青冈栎林 KMCG forest	13.28	60.70	13.63	0.808/1.090	49.18/44.62	11.21/6.10	60.39/50.72	6.325/4.168	8.205/4.940

土壤物理指标中 RC、PD、CP、NCP、TP、FWHC 和 MWHC 分别是 Rock coverage of plot、Profile depth of A horizon、Capillary porosity、Non-capillary porosity、Total porosity、Field water holding capacity 和 Maximum water holding capacity 的缩写。分式值中分子为土壤 A 层、分母为土壤 B 层,相应样本量值为 37、28。森林类型的英文缩写和 S 检验临界值同表 1

3.3 土壤主要化学指标值变化

不同喀斯特森林类型间土壤主要化学指标差异不显著(表 3—4)。土壤 pH 值和全钾量呈 A 层<B 层的趋势,土壤有机质量、阳离子交换量、交换性盐基量、全氮量、全磷量、水解氮量、有效磷量和速效钾量呈 A 层>B 层的趋势。类型 IV 中土壤全磷量和全钾量在 A 层与 B 层的变化趋势相异于其它类型,其中 50%样地中土壤全磷量和 75%的样地土壤全钾量变化有违一般规律,与样地土壤取样点小生境和土壤异质性以及母岩裂隙形成的地下侵蚀^[22]有关。类型 V 土壤肥力和养分指标较高,类型 III 土壤肥力和养分指标较低,类型 I、II 和 IV 土壤肥力和养分指标居中,变幅较大。

3.4 植物多样性指数和土壤主要理化指标值的因子分析

植物多样性指数和土壤主要物理指标值的降维性规律明显(因子提取值>1.0),乔木、灌木、草本植物多样性因子和其它因子在土壤 A 层与 B 层的累计方差贡献率为 90.00%、91.49%;由土壤密度、最大持水量和田间持水量主导的持水量因子,以及由非毛管孔隙度、毛管孔隙度和总孔隙度主导的孔隙度因子在土壤 A 层与 B 层的累计方差贡献率为 95.75%、94.63%。土壤主要化学指标值的降维分异较大(因子提取值>0.5),共性因子包括由有机质量、全氮量和水解氮量主导的肥力因子,由阳离子交换量、交换性盐基量和全磷量主导的养分因子,由全氮量、交换性盐基量和 pH 值主导的氮因子,土壤 A 层还有由全磷量、有效磷量和阳离子交换量主

导的磷因子,由全钾量、有机质量和水解氮量主导的钾因子,土壤 B 层还有由有效磷量和交换性盐基量主导的磷因子,由全钾量、速效钾量和阳离子交换量主导的钾因子。肥力、养分、氮、磷和钾因子在土壤 A 层与 B 层的累计方差贡献率为 83.06%、87.60%。

表 3 不同喀斯特森林类型土壤主要肥力指标值变化

Table 3 Soil fertility indicators of different karst forest types in the Maolan experimental area				
类型 Types	pH 值 pH	有机质量 OMC / (×10 g/kg)	阳离子交换量 CEC/ (×10 cmol ⁺ /kg)	交换性盐基量 EBA / (×10 cmol ⁺ /kg)
I 香叶树-枫香林 LCLF forest	6.55/6.62	6.23/3.34	3.89/2.44	1.08/1.07
II 香椿-香叶树林 TSLC forest	6.38/6.41	2.49/1.89	2.22/1.30	0.86/0.86
III 榿木-马尾松林 LCPM forest	6.05/6.22	6.14/2.16	4.24/2.82	1.50/1.18
IV 灯台-小花楸木林 CCCP forest	6.46/6.63	5.95/3.40	6.30/4.63	3.34/3.08
V 栲树-青冈栎林 KMCG forest	6.56/6.65	9.26/4.60	6.47/4.29	3.34/2.42

土壤化学指标中 OMC、CEC 和 EBA 分别是 Organic matter content、Cation exchange capacity 和 Exchangeable base amount 的缩写;分式值意义同表 2;森林类型的英文缩写和 S 检验临界值同表 1

表 4 不同喀斯特森林类型土壤主要养分指标值变化

Table 4 Soil nutrient indicators of different karst forest types in the Maolan experimental area						
类型 Types	全 N 量 TNC/ (g/kg)	全 P 量 TPC/(g/kg)	全 K 量 TKC/ (×10 g/kg)	水解 N 量 HNC/ (×10 ² mg/kg)	有效 P 量 APC/ (mg/kg)	速效 K 量 AKC/ (×10 ² mg/kg)
I 香叶树-枫香林 LCLF forest	2.63/2.52	0.30/0.29	3.99/4.02	2.65/1.64	2.76/1.85	1.68/0.91
II 香椿-香叶树林 TSLC forest	2.25/1.28	0.29/0.27	3.75/3.97	1.59/1.21	5.02/3.51	1.22/1.00
III 榿木-马尾松林 LCPM forest	4.87/0.98	0.22/0.13	4.15/4.38	2..97/0.90	1.65/1.46	2.54/1.32
IV 灯台-小花楸木林 CCCP forest	4.92/2.02	0.35/0.40	4.53/4.38	3.10/1.51	2.13/1.56	2.49/1.51
V 栲树-青冈栎林 KMCG forest	5.13/3.13	0.36/0.33	4.45/4.53	4.36/2.35	3.14/1.75	2.30/1.56

土壤化学指标中 TNC、TPC、TKC、HNC、APC 和 AKC 分别是 Total N content、Total P content、Total K content、Hydrolysis N content、Available P content 和 Available K content 的缩写;分式值意义同表 2;森林类型的英文缩写和 S 检验临界值同表 1

不同层片植物多样性因子和不同土层土壤理化因子间相关显著性的趋势各异,符合乔木、灌木与草本层植物自然恢复过程中生长发育互为消长的一般特性(表 5)。相关显著的因子对数量率呈乔木层(36.38%)>灌木层(27.27%)>草本层(18.19%)、土壤 A 层(45.45%)<B 层(54.55%)的趋势,乔木层植物多样性因子起主导作用。

3.5 乔木层植物多样性指数和土壤理化指标值的相关性

喀斯特森林乔木层植物多样性指数和土壤理化指标间相关系数值呈二次多项式(QC)≥直线式(SL)的趋势,相关显著的指标对数量率分别为 46.09%、39.84%,呈土壤 A 层(QC=21.88%,SL=18.75%,下同。)<B 层(24.22%,21.09%)、Pielou 指数(14.06%,13.28%)>Simpson 指数(12.50%,10.94%)>Shannon-Wiener 指数(10.16%,8.59%)>Margalef 指数(9.38%,7.03%)的趋势(表 6)。相关显著的指标对数量率中,土壤物理指标呈二次多项式(66.67%)>直线式(62.50%)、A 层>B 层,土壤肥力指标呈二次多项式(37.50%)>直线式(31.25%)、A 层>B 层,土壤养分指标呈二次多项式(31.25%)>直线式(22.92%)、土壤 A 层<B 层,乔木层植物多样性指数和土壤物理、肥力及养分指标值间相关显著的指标对数量率因多样性指数种类、土壤层次及理化指标类型而异,趋势性不因模型类型而改变。

表 5 喀斯特森林植物多样性指数和土壤理化指标的因子相关分析

Table 5 Factor straight line correlation analysis of plant diversity indices and soil physical and chemical indicators of karst forest in the Maolan experimental area

因子 Factors		植物多样性 Plant diversity			
		乔木因子 <i>AF</i>	灌木因子 <i>SF</i>	草本因子 <i>HF</i>	其它因子 <i>OF</i>
土壤 A 层 A horizon of soil	持水量因子 <i>WHF</i>	0.551 **	-0.269	0.038	0.061
	孔隙度因子 <i>POF</i>	-0.100	-0.364 *	-0.093	0.117
	肥力因子 <i>FEF</i>	0.414 *	-0.267	0.068	0.064
	养分因子 <i>NUF</i>	0.098	-0.359 *	0.131	0.047
	氮因子 <i>NF</i>	0.186	0.116	-0.028	0.395 *
	钾因子 <i>KF</i>	0.079	-0.152	-0.184	0.032
	磷因子 <i>PF</i>	0.180	0.102	-0.212	0.123
土壤 B 层 B horizon of soil	持水量因子 <i>WHF</i>	0.513 **	0.146	0.378 *	0.073
	孔隙度因子 <i>POF</i>	-0.021	-0.005	0.110	-0.046
	肥力因子 <i>FEF</i>	0.414 *	0.083	0.123	-0.058
	养分因子 <i>NUF</i>	0.300	0.258	0.446 *	-0.207
	氮因子 <i>NF</i>	0.008	0.460 *	0.257	0.029
	磷因子 <i>PF</i>	0.151	-0.281	0.246	-0.399 *
	钾因子 <i>KF</i>	0.359	0.219	-0.323	-0.008

植物多样性因子中 *AF*、*SF*、*HF* 和 *OF* 分别是 Arbor factor、Shrub factor、Herb factor 和 Other factor 的缩写,土壤理化因子中 *WHF*、*POF*、*FEF*、*NUF*、*NF*、*PF* 和 *KF* 分别是 Water-holding factor、Porosity factor、Fertility factor、Nutrient factor、N factor、P factor 和 K factor 的缩写。直线式相关显著性检验临界值在土壤 A 层为 $R_{(37-2,0.05)} = 0.325$ 和 $R_{(37-2,0.01)} = 0.418$,土壤 B 层为 $R_{(28-2,0.05)} = 0.375$ 和 $R_{(28-2,0.01)} = 0.479$

表 6 喀斯特森林乔木层植物多样性指数和土壤理化指标的相关性

Table 6 Correlation analysis of straight line and quadratic curve of arbor plant diversity indices and soil physical and chemical indicators of karst forest in the Maolan experimental area

指标 Indicators		Margalef 指数		Simpson 指数		Shannon-Wiener 指数		Pielou 指数		
		Mar		Sim		Sha		Pie		
		A 层 A horizon	B 层 B horizon	A 层 A horizon	B 层 B horizon	A 层 A horizon	B 层 B horizon	A 层 A horizon	B 层 B horizon	
土壤物理指标	密度 <i>Density</i>	<i>SL</i>	-0.512 **	-0.405 *	-0.526 **	-0.436 *	-0.553 **	-0.405 **	-0.568 **	-0.413 *
Physical indicators		<i>QC</i>	-0.514 **	-0.534 **	-0.569 **	-0.512 **	-0.553 **	-0.506 **	-0.574 **	-0.484 **
	毛管孔隙度 <i>CP</i>	<i>SL</i>	-0.148	0.290	0.191	0.431 *	-0.058	0.325	0.170	0.387 *
		<i>QC</i>	-0.243	0.292	0.246	0.439 *	-0.264	0.326	0.229	0.387 *
	非毛管孔隙度 <i>NC</i>	<i>SL</i>	0.433 **	0.049	0.245	-0.075	0.402 *	0.029	0.301	-0.003
		<i>QC</i>	0.476 **	0.352	0.379 *	-0.328	0.433 **	0.088	0.315	-0.046
	总孔隙度 <i>TP</i>	<i>SL</i>	0.252	0.286	0.421 **	0.328	0.314	0.303	0.452 **	0.336
		<i>QC</i>	0.252	0.351	0.436 **	0.354	0.334 *	0.311	0.457 **	0.337
	田间持水量 <i>FWHC</i>	<i>SL</i>	0.351 *	0.400 *	0.465 **	0.453 *	0.391 *	0.389 *	0.462 **	0.426 *
		<i>QC</i>	0.359 *	0.447 *	0.478 **	0.474 *	0.396 *	0.455 *	0.470 **	0.435 *
	最大持水量 <i>MWHC</i>	<i>SL</i>	0.439 **	0.411 *	0.419 **	0.415 *	0.449 **	0.392 *	0.445 **	0.402 *
<i>QC</i>		0.443 **	0.490 **	0.456 **	0.474 *	0.453 **	0.465 *	0.450 **	0.439 **	
土壤肥力指标	pH 值 <i>SL</i>	0.186	0.080	0.186	0.070	0.231	0.127	0.228	0.159	
Fertility indicators		<i>QC</i>	0.195	0.094	0.266	0.244	0.305	0.260	0.313	0.280
	有机质量 <i>OMC</i>	<i>SL</i>	0.348 *	0.272	0.474 **	0.424 *	0.338 *	0.302	0.452 **	0.381 *
		<i>QC</i>	0.368 *	0.277	0.476 **	0.443 *	0.381 *	0.306	0.453 **	0.382 *
	阳离子交换量 <i>CEC</i>	<i>SL</i>	0.182	0.362	0.313	0.365	0.277	0.416 *	0.393 *	0.430 *
		<i>QC</i>	0.273	0.382 *	0.313	0.376	0.359 *	0.419 *	0.410 *	0.435 *
	交换性盐基量 <i>EBA</i>	<i>SL</i>	0.105	0.122	0.272	0.178	0.182	0.174	0.361 *	0.279
		<i>QC</i>	0.120	0.130	0.283	0.181	0.215	0.183	0.387 *	0.279

续表

指标 Indicators		Margalef 指数		Simpson 指数		Shannon-Wiener 指数		Pielou 指数		
		Mar		Sim		Sha		Pie		
		A 层 A horizon	B 层 B horizon	A 层 A horizon	B 层 B horizon	A 层 A horizon	B 层 B horizon	A 层 A horizon	B 层 B horizon	
土壤养分指标 Nutrient indicators	全氮量 TNC	SL	0.112	0.207	0.290	0.440 *	0.184	0.290	0.351 *	0.417 *
		QC	0.197	0.270	0.295	0.451 *	0.307	0.302	0.378 *	0.421 *
	全磷量 TPC	SL	-0.221	0.098	-0.095	0.232	-0.164	0.160	0.022	0.299
		QC	-0.238	0.201	-0.101	0.313	-0.215	0.197	0.027	0.333
	全钾量 TKC	SL	0.049	0.147	0.193	0.293	0.158	0.235	0.259	0.360
		QC	0.249	0.453 *	0.302	0.430 *	0.192	0.321	0.305	0.399 *
	水解氮量 HNC	SL	0.230	0.369	0.337 *	0.456 *	0.230	0.384 *	0.268	0.434 *
		QC	0.283	0.378	0.363 *	0.538 **	0.313	0.387 *	0.287	0.436 *
	有效磷量 APC	SL	-0.094	-0.008	-0.202	-0.099	-0.142	-0.074	-0.156	-0.114
		QC	-0.190	-0.203	-0.205	-0.112	-0.171	-0.103	-0.159	-0.176
	速效钾量 AKC	SL	0.145	0.381 *	0.227	0.494 **	0.160	0.490 **	0.201	0.609 * *
		QC	0.365 *	0.569 **	0.242	0.505 **	0.300	0.536 **	0.309	0.635 **

QC、SL 分别是 Quadratic curve 和 Straight line 的缩写。表中植物多样性指数的英文缩写同表 1,土壤理化指标的英文缩写同表 2—4。直线相关显著性检验临界值同表 5。二次多项式相关显著性检验临界值在土壤 A 层为 $R_{(37-3,0.05)} = 0.330$ 和 $R_{(37-3,0.01)} = 0.424$,土壤 B 层为 $R_{(28-3,0.05)} = 0.381$ 和 $R_{(28-3,0.01)} = 0.487$

根据植物多样性指数和土壤理化指标间二次多项式和直线式的相关显著性差异可划分为 3 个类型。①相关性不显著类型。包括土壤 pH 值、全磷量和有效磷量等,指标对数量率为 53.91%,呈土壤 A 层(28.13%)>B 层(25.78%)、Margalef 指数(15.63%)>Shannon-Wiener 指数(14.84%)>Simpson 指数(12.50%)>Pielou 指数(10.94%)的趋势。②仅曲线相关性显著类型。包括土壤 B 层全钾量等,指标对数量率为 5.47%,呈土壤 A 层(2.34%)<B 层(3.13%)、Pielou 指数(0.78%)<Simpson 指数(1.56%)=Shannon-Wiener 指数(1.56%)<Margalef 指数(2.34%)的趋势。③相关性显著类型。指直线式和二次多项式相关均显著,包括土壤密度、田间持水量和最大持水量,土壤 A 层有机质量和 B 层速效钾量等,指标对数量率为 40.63%,呈土壤 A 层(19.53%)<B 层(21.09%)、Margalef 指数(7.03%)<Shannon-Wiener 指数(8.59%)<Simpson 指数(10.94%)<Pielou 指数(13.28%)的趋势。

3.6 乔木层植物多样性指数对土壤理化指标的响应

基于以上分析,乔木层植物多样性指数(D)对土壤理化指标(S)的响应模式为:

$$D = \int(s) = \begin{pmatrix} D_1 = bs + c; a = 0 \text{ 呈直线相关} \\ D_2 = c; a = 0, b = 0 \text{ 无相关} \\ D_3 = as^2 + bs + c \begin{pmatrix} b^2 - 4ac < 0 \text{ 无解} \\ b^2 - 4ac > 0 \begin{pmatrix} ab > 0 \text{ 拐点值在 } y \text{ 轴左侧无生态意义} \\ ab < 0 \begin{pmatrix} S_h > S_{\max}, \text{ 有拐点值无生态意义} \\ S_h < S_{\max} \begin{pmatrix} a > 0, D_{\min} \\ a < 0, D_{\max} \end{pmatrix} \end{pmatrix} \end{pmatrix} \end{pmatrix} \end{pmatrix}$$

式中, a 、 b 和 c 为 $\int(s)$ 系数, $S_h = \frac{b}{2a}$ 为对称轴, $S_{\max}$ 为相应土壤理化指标最大值, $D_{\min}$ 和 $D_{\max}$ 为拐点值、 $D = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$ 。

土壤理化指标和乔木层植物多样性指数间二次多项式相关显著的 59 对指标中,植物多样性指数拐点值

无生态意义的指标对数量率为 25.42%,随植物多样性指数升高而土壤理化指标呈先降后升或先升后降型的指标对数量率分别为 37.29%(表 7)。土壤物理、肥力和养分指标中,无生态意义(31.25%、25.00%、13.33%)和先降后升型(46.88%、16.67%、33.33%)的指标对数量率呈降低趋势,先升后降型(21.88%、58.33%、53.33%)的指标对数量率呈增加趋势;Margalef 指数(25.00%、25.00%、50.00%)和 Shannon-Wiener 指数(15.38%、30.77%、53.85%)呈增加趋势,Pielou 指数(38.89%、27.78%、33.33%)呈降低趋势,Simpson 指数(18.75%、62.50%、18.75%)呈先升后降趋势。

土壤物理、肥力和养分指标中,Simpson 指数和 Pielou 指数中先降后升型拐点值(D_{min})变幅 0.57–0.66、0.50–0.76,变动于中间值附近;先升后降型拐点值(D_{max})变幅 0.72–0.86、0.83–0.95,趋于极大值 1。Margalef 指数和 Shannon-Wiener 指数的相应值为 0.71–2.70、1.35–1.43、4.80–9.70、2.57–3.47。植物多样性指数拐点值变幅为 $D_{min} < D_{max}$,其变幅($D_{max} - D_{min}$)内的土壤相应理化指标呈增加趋势。

表 7 喀斯特森林乔木层植物多样性指数和土壤理化指标的二次多项式拐点值分析

Table 7 Mathematical inflection points analysis of the quadratic curve of arbor plant diversity indices and soil physical and chemical indicators of karst forest in the Maolan experimental area

指标 Indicators		Margalef 指数 Mar		Simpson 指数 Sim		Shannon-Wiener 指数 Sha		Pielou 指数 Pie	
		A 层	B 层	A 层	B 层	A 层	B 层	A 层	B 层
		A horizon	B horizon	A horizon	B horizon	A horizon	B horizon	A horizon	B horizon
土壤物理指标 Physical indicators	密度 <i>Density</i>	=▲*	=▲*	0.65▼*	0.69▼*	—▲*	1.97▼*	—▲*	0.78▼*
	毛管孔隙度 <i>CP</i>	3.68▼	12.27▼	0.85▼	—▼*	2.25▼	—▲	0.88▼	—▼*
	非毛管孔隙度 <i>NC</i>	2.52▲*	—▲	0.74▲*	0.79▲	1.62▲*	2.17▲	0.73▲	0.83▲
	总孔隙度 <i>TP</i>	9.99▼	3.06▲	0.58▲*	0.64▲	3.10▼*	1.21▲	—▼*	0.82▲
	田间持水量 <i>FWHC</i>	8.11▼*	2.62▲*	0.56▲*	0.59▲*	4.15▼*	1.81▲*	—▼*	0.74▲*
	最大持水量 <i>MWHC</i>	=▲*	2.96▲*	0.66▲*	0.68▲*	0.26▲*	1.83▲*	—▼*	0.76▲*
土壤化学指标 Chemical indicators	有机质量 <i>OMC</i>	5.06▼*	8.24▼	—▼*	0.60▲*	2.85▼*	3.95▼	—▼*	0.50▲*
	阳离子交换量 <i>CEC</i>	5.03▼	6.37▼*	—▼	0.55▲	2.65▼*	4.43▼*	0.96▼*	—▼*
	交换性盐基量 <i>EBA</i>	5.79▼	2.00▲	0.59▲	0.49▲	2.75▼	1.43▲	0.93▼*	—▼
	全氮量 <i>TNC</i>	4.86▼	5.03▼	—▼	0.53▲*	2.52▼	3.19▼	0.93▼*	0.61▲*
	全钾量 <i>TKC</i>	4.47▼	4.39▼*	0.83▼	0.83▼*	2.72▼	2.56▼	0.90▼	0.90▼*
	水解氮量 <i>HNC</i>	5.44▼	0.71▲	0.65▲*	0.69▲*	2.61▼	=▲*	0.93▼	0.55▲*
	速效钾量 <i>AKC</i>	4.66▼*	4.81▼*	0.93▼	—▼*	2.49▼	2.88▼*	0.87▼	0.94▼*

植物多样性指数的英文缩写同表 1,土壤理化指标的英文缩写同表 2—4。表内数值为植物多样性指数拐点值,一和=表示现有土壤理化指标值范围内的植物多样性指数无解。▲和▼分别表示二次多项式开口向上和向下,*为相关性显著符号

4 结论与讨论

4.1 植物多样性指数和土壤主要理化指标对自然保护区的功能分区响应

茂兰国家级自然保护区^[22]成立 20 多年来,先后纳入联合国教科文组织国际人与生物圈保护区网络(MAB,1996)和世界自然遗产地(WNHS,2007)管理,森林生态系统得到了良好保护。由核心区^[24]、缓冲区、实验区至外缘区,乔木层植物多样性指数和土壤主要理化指标由类型 V→类型(I、II、IV)→类型 III 呈降低趋势,与不同功能区的干扰强度呈负相关。不同森林类型间乔木层与草本层植物多样性指数差异的显著性印证了功能区干扰等级的差异性。本文采用乔木层物种重要值划分森林类型存在同一类型跨相邻功能区分布现象,由于重要值仅反映物种在群落中的优势程度、不反映其生长发育阶段,且有不同功能区相嵌性分布的现实,划分的类型依然可以解译。应用其它划分指标或许更能表达不同功能区的森林类型,但植被-土壤系统主要指标变化及相关的趋势性是不会变化的。

4.2 植物多样性指数和土壤主要理化指标相关性研究中指标选择及相关趋势的多样性

黔南喀斯特天然林^[12]内槽谷、漏斗和坡地表层土壤(0—5 cm)pH 值、全磷量和全钾量同乔木层植物多样

性指数的直线式相关不显著,与本研究结论相同;土壤有机质量、全氮量、水解氮量、有效磷量和速效钾量的相关显著性因植物多样性指数种类有同有异,这种差异与引用文献中乔木胸径($DBH \geq 15$ cm)入界值划分较高和样地数量($n=9$)较少有关。黔中山地喀斯特次生林^[11]表层土壤(A层)pH值、有效磷量和速效钾量同乔木层植物多样性指数相关不显著,与本研究结论相同;土壤有机质量和水解氮量的相关显著性因植物多样性指数种类不同而异,有别于黔南喀斯特天然林的研究结论,这种差异与森林起源和成土岩组不同有关。黄土高原子午岭天然次生林^[21]不同植物多样性指数同表层土壤(0—20 cm)有机质量和全氮量的正相关显著、有效氮量的正相关不显著,同土壤密度负相关不显著,与本研究结论相似或相异。表明不同地区与天然林类型的植物多样性指数增加有利于表层土壤部分理化指标的改善,森林类型和成土母质等是影响相关显著性的重要因素。除土壤理化指标外,土壤生物指标^[14-17,9]也是土壤质量评价的重要指标,有必要进一步探讨植物多样性指数和土壤生物指标的相关性及作用机理。

喀斯特森林乔木层植物多样性指数同土壤理化指标值的相关系数随土层厚度增加呈降低、或升高趋势,相关显著的指标对数量呈A层<B层的趋势,相异于非喀斯特天然次生林^[20-21],相似于其它喀斯特天然次生林^[11,13]。表明喀斯特森林植物多样性指数和土壤理化指标值的相关性规律在土层间具有特异性。

毫无疑问,灌木^[3,14]与草本^[2-3,13]层植物多样性指数不仅受乔木层植物影响,对土壤理化指标也有影响,其变化规律有待分析。

4.3 土壤主要理化指标和植物多样性指数间相互作用的层次性与乔木层植物多样性指数的响应模式

喀斯特森林不同层片植物多样性因子和不同土层土壤理化因子相关的趋势性各异,相关显著的因子对数量率呈乔木层>灌木层>草本层、土壤A层<B层的趋势,以水土资源管理为目标的营林措施宜以乔木为主,灌木与草本植物立体配置、拟自然经营,才能有效改善喀斯特地区的土壤质量。

乔木层植物多样性指数和土壤理化指标值的相关性分3种类型。直线型是植物多样性指数和土壤理化指标相关性研究中较普遍的一类^[10-13,19-21],植物多样性指数增加有利于提高或降低土壤相应理化指标;曲线型是植物多样性指数和土壤理化指标相关性研究中报道较少且机理较复杂的一类^[13,20-21],有拐点值无生态意义型的相互关系需用直线等其它模型解译,有拐点值有生态意义且呈先降后升、或先升后降型的相互关系表明植物多样性和土壤理化指标间的相互作用具有阶段性;无关型的土壤理化指标变化受乔木层植物多样性指数影响不显著。乔木层植物多样性指数和土壤理化指标值的不同相关模式彰显了植物多样性的土壤生态系统功能复杂性,可用植物多样性的生态系统功能多种假说^[6-7]解译。

物种多样性增加势必导致营林成本上升,直线型不符合林业生产中的经济规律。曲线型可应用于喀斯特地区的水土保持林经营。天然林乔木层植物多样性指数拐点值变幅($D_{max}-D_{min}$)可成为拟自然经营人工林和次生林改造中物种数量、总株数与株数比例选择的参考依据之一,培育物种的生态经济学指标评价、配置模式与种间关系分析还需相应的人工试验林^[18-19]验证。无关型的土壤理化指标不受乔木植物多样性指数调控。植物多样性指数和土壤理化指标分别代表了植被-土壤系统^[2-5]的部分指标类型,二者的相关性还受其它类型指标^[7-8,18]的影响,有必要从生态系统角度研究植被-土壤间其它指标的变化规律与相关性,进一步阐述喀斯特天然林植被-土壤系统相互作用机理,为石漠化治理的植被恢复路径提供决策参考。

参考文献(References):

- [1] Sweeting M M. Limestone landscape of south China. *Geology Today*, 1986, 2(1): 11-16.
- [2] 喻理飞, 朱守谦, 叶镜中, 魏鲁明, 陈正仁. 退化喀斯特森林自然恢复过程中群落动态研究. *林业科学*, 2002, 38(1): 1-7.
- [3] Zhang X, Lian B, Yin J, Liu Y H, Cui Y C. Study on influences of different land use types on soil qualities in plateau karst depression. *Agricultural Science & Technology*, 2010, 11(2): 173-178, 182-182.
- [4] Wardle D A, Bardget R D, Klironomos J N, Setälä H, Van Der Putten W H, Wall D H. Ecological linkages between aboveground and belowground biota. *Science*, 2004, 304(5677): 1629-1633.
- [5] Wang G L, Liu G B, Xu M X. Above-and belowground dynamics of plant community succession following abandonment of farmland on the Loess

- Plateau, China. *Plant and Soil*, 2009, 316(1/2): 227-239.
- [6] 黄建辉, 白永飞, 韩兴国. 物种多样性与生态系统功能: 影响机制及有关假说. *生物多样性*, 2001, 9(1): 1-7.
- [7] Midgley G F. Biodiversity and ecosystem function. *Science*, 2012, 335(6065): 174-175.
- [8] Carvalho F, Godoy E L, Lisboa F J G, Moreira F M S, Souza F A, Berbara R L L, Fernandes G W. Relationship between physical and chemical soil attributes and plant species diversity in tropical mountain ecosystems from Brazil. *Journal of Mountain Science*, 2014, 11(4): 875-883.
- [9] LeGrand H E. Hydrological and ecological problems of karst regions-hydrological actions on limestone regions cause distinctive ecological problems. *Science*, 1973, 179(4076): 859-864.
- [10] 盛茂银, 熊康宁, 崔高仰, 刘洋. 贵州喀斯特石漠化地区植物多样性与土壤理化性质. *生态学报*, 2015, 35(2): 434-448.
- [11] 王莉莉, 张喜. 黔中山地喀斯特次生林乔木层植物多样性对土壤养分的响应. *中国林副特产*, 2013, (3): 1-5.
- [12] 郎华林, 龙翠玲. 茂兰自然保护区喀斯特森林物种多样性与土壤因子的关系. *湖北农业科学*, 2012, 51(18): 3987-3990.
- [13] 王莉莉, 张喜. 土壤有机质含量对黔南喀斯特天然次生林土壤理化指标与植物多样性的影响. *热带亚热带植物学报*, 2014, 22(5): 463-470.
- [14] 李媛媛, 周运超, 邹军, 周玮, 房小晶, 王瑶. 黔中石灰岩地区典型灌木林土壤酶活性与植物物种多样性研究. *水土保持研究*, 2010, 17(3): 245-249.
- [15] Nashimana D, Haynes R J, Wallis F M. Size, activity and catabolic diversity of the soil microbial biomass as affected by land use. *Applied Soil Ecology*, 2004, 26(2): 81-92.
- [16] Stark C, Condon L M, Stewart A, Hong J D, O'Callaghan M. Effects of past and current crop management on soil microbial biomass and activity. *Biology and Fertility of Soils*, 2007, 43(5): 531-540.
- [17] Eisenhauer N, Beler H, Engels C, Gleixner G, Habekost M, Milcu A, Partsch S, Sabais A C W, Scherber C, Steinbeiss S, Weigelt A, Weisser W W, Scheu S. Plant diversity effects on soil microorganisms supports the singular hypothesis. *Ecology*, 2010, 91(2): 485-496.
- [18] David T, David W, Johannes K. Productivity and sustainability influenced by biodiversity in grassland ecosystems. *Nature*, 1996, 379(6567): 718-721.
- [19] 张丹桔, 张健, 杨万勤, 吴福忠, 黄玉梅, 张志伟, 王旭, 王小强, 朱琳. 一个年龄序列巨桉人工林植物和土壤生物多样性. *生态学报*, 2013, 33(13): 3947-3962.
- [20] 徐学华, 张金柱, 张慧, 郭素萍, 许玉娟. 太行山片麻岩区植被恢复过程中物种多样性与土壤水分效益分析. *水土保持学报*, 2007, 21(2): 133-174.
- [21] 王凯博, 陈美玲, 秦娟, 刘勇, 安慧, 上官周平. 子午岭植被自然演替中植物多样性变化及其与土壤理化性质的关系. *西北植物学报*, 2007, 27(10): 2089-2096.
- [22] 周政贤. 茂兰喀斯特森林科学考察集. 贵阳: 贵州科技出版社, 1987: 1-23.
- [23] 张喜, 李克之, 连宾, 魏鲁明, 郑文志. 黔南和黔中喀斯特天然林植物区系研究. *热带和亚热带植物学报*, 2009, 17(2): 114-121.
- [24] 中华人民共和国国务院. 中华人民共和国自然保护区条例. (1994-12-01)[2014-03-30]. http://www.gov.cn/ziliao/flfg/2014-03/30/content_70636.htm.
- [25] 国家林业局. 森林土壤分析方法(LY/T1210—1275-1999). 北京: 中国标准出版社, 1999.
- [26] 张金屯. 数量生态学. 北京: 科学出版社, 2004.
- [27] 余建英, 何旭宏. 数据统计分析与SPSS应用. 北京: 人民邮电出版社, 2003.