

喀斯特常绿落叶阔叶混交林植物与 土壤地形因子的耦合关系

彭晚霞^{1,2,3}, 宋同清^{1,3}, 曾馥平^{1,3}, 王克林^{1,3,*}, 傅伟^{1,3}, 刘璐^{1,3}, 杜虎^{1,3},
鹿士杨^{1,3}, 殷庆仓^{1,3,4}

(1. 中国科学院亚热带农业生态研究所亚热带农业生态过程重点实验室, 长沙 410125; 2. 湖南农业大学生物科学技术学院, 长沙 410128;
3. 中国科学院环江喀斯特生态系统观测研究站, 环江 547100; 4. 广西大学林学院, 南宁 530004)

摘要: 基于中国科学院亚热带农业生态研究所在本论国家级自然保护区借鉴 CTFS 标准建立的 2 hm² 喀斯特常绿落叶阔叶混交林动态监测样地 (50 个 20 m × 20 m 样方), 选取代表木本植物群落、土壤性质和地形因子的 22 个指标, 对其总体特征及三者之间的相互关系进行了经典统计分析、主成分分析、聚类分析与典型相关分析。结果表明, 喀斯特常绿落叶阔叶混交林生态系统的景观异质性强、土壤养分含量高、物种丰富且结构合理, 除海拔、Simpson 指数、均匀度、pH 之外的 18 个指标均呈中、强变异; 综合土壤因子是影响生态系统的主要因子群, 其次是综合群落多样性因子和结构性因子, 综合地形因子的作用相对较弱; 4 种不同类型真实而直观地表征了群落类型、土壤肥力和地形的差异, 相对优化的第 3 种类型主要分布在海拔较高、裸石率较大、坡度较高的阴坡中上部; 植被、土壤、地形两两之间均存在着较高的相关性, 植被与土壤因子之间, 有机质、氮、磷起较大的作用, 主要影响群落结构, 植被和地形之间, 坡向和岩石裸露率影响群落结构和物种丰富度, 而坡向和坡位直接导致了土壤有机质、全氮、有效磷和 pH 的变化。

关键词: 植物; 土壤; 地形; 喀斯特常绿落叶阔叶混交林

The coupling relationships between vegetation, soil, and topography factors in karst mixed evergreen and deciduous broadleaf forest

PENG Wanxia^{1,2,3}, SONG Tongqing^{1,3}, ZENG Fuping^{1,3}, WANG Kelin^{1,3,*}, FU Wei^{1,3}, LIU Lu^{1,3}, DU Hu^{1,3}, LU Shiyang^{1,3}, YIN Qingcang^{1,3,4}

1 Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China

2 College of Bioscience and Biotechnology, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China

3 Huanjiang Observation and Research Station of Karst Ecosystem, Chinese Academy of Sciences, Huanjiang, Guangxi Zhuang Autonomous Region, 547100, China

4 Forestry College of Guangxi University, Nanning 530004, China

Abstract: A monitoring sample site with 2 hm² of karst mixed evergreen and deciduous broadleaf forest in Mulun National Nature Reserve was established according to the standard of CTFS (i. e., the Center of Tropical Forest Sciences) by the Institute of Subtropical Agriculture. 22 indexes covering plant community, soil property, and topography were chosen to study the relationships between the three factors through the analysis of traditional statistics, principal component analysis (PCA), cluster analysis and canonical correlation analysis (CCA). The results indicated that the Mulun karst forest had high landscape heterogeneity, high content of soil nutrients, abundant woody species, and rational community structure. Variations were observed based on the indexes except elevation, Simpson index, evenness, and pH. Soil indexes were the

基金项目: 中国科学院西部行动计划资助项目 (KZCX2-XB2-08); 国家自然科学基金资助项目 (30970508); 国家“十一五”科技支撑计划资助项目 (2006BAC01A10; 2009BAD6C6B008); 中国科学院“西部之光”人才培养计划

收稿日期: 2009-05-12; 修订日期: 2009-10-23

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: kelin@isa.ac.cn

primary factor to the ecosystem, plant community diversity and structure indexes were the second, topographical indexes were the last. Based on the differences from the community types, soil fertility and topography, the forest was divided into four groups through the cluster analysis. The third group with best optimized characteristics was mostly distributed in the middle and upper part of shady slope with larger percentage of exposed rock, larger slope degree and greater elevation. High correlation existed between vegetation, soil and topography. Between vegetation and soil factors, organic matter, nitrogen and phosphorus primarily affected plant community structure. Between vegetation and topography factors, slope direction and percentage of exposed rock were the major factors affected plant community structure and diversity. Between soil and topography factors, slope direction and position directly resulted in the variance of soil organic matter, total nitrogen, available phosphorus, and pH.

Key Words: vegetation; soil; topography; karst mixed evergreen and deciduous broad leaf forest

植物的分布格局是不同尺度上气候、土壤、地形等环境因子综合作用的结果,在区域、全球尺度上,气候、母质、植被区系决定特定的植被类型^[1],而在景观及更小的尺度上,非地带性的环境因子主导着植被的物种组成和群落类型^[2]。在群落演替的前期,土壤的性质影响植被的变化,同时也因植被的变化而变化,这种相互促进作用在经过一段时间的演替,土壤和植被群落均受气候的限制,进化为以生态平衡为标志的顶极群落^[3-4];地形通过控制光照、温度、水分和干扰的频率与强度等自然和人为生态作用过程,对土壤和植物群落具有重要的指示意义^[5-6]。因此,植物、土壤和地形相互关系的研究一直是植物生态学的研究热点,不过多偏重于其中的两两之间关系的研究^[7-9],对三者之间的关系缺乏深入探讨^[10-11]。以贵州为中心连带成片的我国西南喀斯特地区(世界三大岩溶区域之一)受地球内动力、强烈的地质运动、高温多雨且分布不均、碳酸盐岩溶蚀性强、水文二维结构明显,以及其适生植物具有嗜钙性、耐旱性和石生性等限制特点的影响,具有天然的高度异质性和脆弱性,环境容量小,极易退化^[12-13]。近年来,在人口迅速增长和人地矛盾尖锐的影响下,形成了以强烈的人为干扰为驱动力、以植被减少为诱因、以土地生产力退化为本质的复合退化状况,植被-土壤-地形的相互关系极度恶化,大面积的森林已退化成灌丛或草丛,部分地带完全石漠化,生态恢复和重建迫在眉睫^[14-15]。本文基于中国科学院亚热带农业生态研究所在本论国家级自然保护区建立的 2 hm²喀斯特常绿落叶阔叶混交林动态监测样地,利用多元统计手段揭示了喀斯特常绿落叶阔叶混交林相对稳定生态系统的基本特性及木本植物、土壤、地形之间的定量关系,旨在为喀斯特广大退化生态系统的景观优化设计、作物合理布局、植被迅速恢复和生态重建提供理论依据和参考,促进喀斯特森林多样性长期动态监测研究。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本论国家级自然保护区(107°54'01"—108°05'51"E, 25°07'01"—25°12'22"N)位于广西环江毛南族自治县的西北部,总面积 8969 hm²,属隐域性石灰岩森林植被顶极群落,即中亚热带喀斯特常绿落叶阔叶混交林,生境异质性极高,区系成分复杂,生物种类极为丰富,生态系统稳定,是一个保存较好、相对原始的喀斯特森林。维管束植物共计 908 种,隶属 159 科,527 属。其中蕨类植物 67 种,裸子植物 11 种,被子植物 830 种,维管束植物科、属、种分别占广西、贵州、云南石灰岩总数的 78.1%、38.4% 和 12.6%,珍稀濒危植物 27 种,其中国家二、三级重点保护植物 15 种^[16]。保护区的喀斯特地貌极为发育,形态多样,典型景观单元为峰丛洼地,最高海拔为 1028.0 m,相对高差≤500 m,山体陡峭,属中亚热带季风气候区。总辐射(Q)年总量为 3832 MJ/m²;年平均气温 15—18.7 °C,1 月份平均气温 3.4—8.7 °C,7 月份平均气温为 23—26.7 °C,年温差 18.1 °C,≥10 °C 积温 4700—6300 °C,无霜期 235—290 d,年降雨量 1638 mm(以海拔 600 m 为准),雨季(4—8 月份)为 1207.1 mm,占全年降雨量的 73.7%,旱季(9—3 月份)为 430.7 mm,占 26.3%,汛期(6—7 月份)为 635.3 mm,干季(12—1 月份)<30 mm;林内阴湿,相对湿度达 80%—90%;年蒸散总量 874 mm。研究区石山的基岩裸露率达 80%—90%,土被面积不足 20%,土壤发育于白云岩、石灰岩的石灰土,发育不全,较年幼,土层浅

薄,枯枝落叶较丰富,现有量(干物质)达 3.88—4.25 t/hm²,pH 值一般为 6.5—7.0,有机质含量为 5.0%—7.5%^[16]。

1.2 样地概况

研究样地选择在喀斯特木论国家级自然保护区东部核心区与试验区接壤处的一个典型的峰丛洼地景观单元内,样地面积为 2 hm²,南北长 200 m,东西长 100 m,样地北面的 100 m × 100 m 为较典型的中亚热带石灰岩常绿落叶阔叶混交林,群落发育和保存较好(即原生林区),主要树种有小叶栎树(*Koelreuteria henryi*)、鸭掌木(*Schefflera minutistellata*)、广西密花树(*Rapanea kwangsiensis*)、九里香(*Murraya exotica*)、波叶山黄皮(*Murraya euchretifolia*)、铁榄(*Sinosideroxylon pedunculatum*)、东女贞(*Ligustrum japonicum*)等;南面 100 m × 100 m(含洼地),人为破坏严重,1993 年之前种植玉米后封育至今,次生林与人工林并存(干扰区),主要树种有杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、杜茎山(*Maesa japonica*)、伞花木(*Euryeorymbus cavaleriei*)、鱼藤(*Derris trifoliata*)、枫香(*Liquidambar formosana*)、八角枫(*Alangium chinense*)、白毛长叶紫珠(*Callicarpa longifolia* var. *floccosa*)等。样地地形起伏较大,海拔 440.4—562.4 m,坡度高达 80°,南、西南、东南、西北及东北方向为坡地,岩石裸露率达 85%,少量浅薄的土壤零星分布于岩石缝隙间。北面为洼地,土层较厚,土被面积占 45%。土壤为石灰土。水热条件好,空气相对湿度大。

1.3 样地设置与调查

2007 年 7—12 月借鉴 CTFS 方法^[17]建立了 2 hm²的喀斯特常绿落叶阔叶混交林动态监测样地(图 1),用全站仪将整个样地划分为 50 个 20 m × 20 m 的样方,样方的 4 个角用水泥桩做永久标记。将每个 20 m × 20 m 的样方用插值法细分为 4 个 10 m × 10 m 和 16 个 5 m × 5 m 的小样方。以 5 m × 5 m 小样方为测量基本单元,按顺时针挂牌标记每个胸径(*DBH*)(Diameter at breast height) ≥ 1 cm 的木本植物个体,记录树种名称、胸径、树高、冠幅、三维坐标和生长状况等,同时对 20 m × 20 m 样方进行海拔、坡向、坡位、坡度、岩石裸露率等地形因子调查,其中海拔、坡度用全站仪实测,岩石裸露率为样地内岩石裸露的面积占样地面积估算,坡位、坡向非数值指标进行编码,坡位赋值为 1 洼地、2 下坡、3 中坡、4 上坡,坡向赋值为 0 洼地、1 北坡、2 东北坡、3 西北坡、4 东坡、5 西坡、6 东南坡、7 西南坡、8 南坡,表示越向阳越干热。

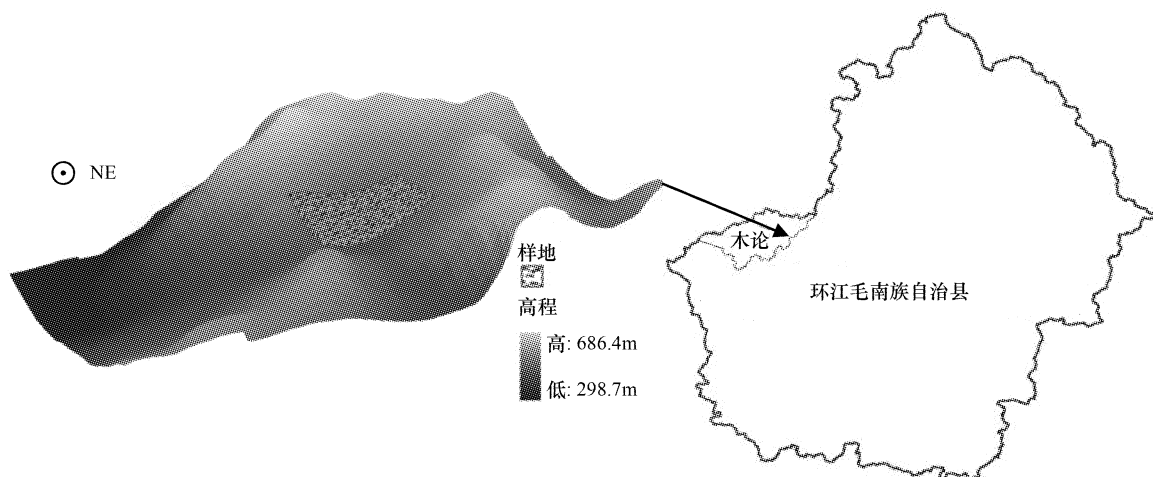


图 1 动态监测样地位置

Fig. 1 Location of the sample plots

1.4 土壤取样及分析

2007 年 11 月 16 日在 20 m × 20 m 样地的 4 个 10 m × 10 m 样方范围内随机采取 5 个样本(0—20 cm)采取 4 分法混合组成待测土样,共计 50 个样本,采样前最后一次降雨为 11 月 4 日晚(约 3.3 mm),干旱比较严重。土壤待测分析指标共 8 个,其中 pH 值用 1:2.5 土液比水提,酸度计测定;有机质用重铬酸钾容量法-外加

热法;全 N 用半微量开氏法;全 P 用 NaOH 熔融-钼锑抗比色法;全 K 用 NaOH 熔融-火焰光度法;碱解氮用扩散吸收法;速效 P 用 NaHCO₃提取-钼锑抗比色法;速效 K 用中性醋酸铵提取-火焰光度法测定。

1.5 数据处理

将所有 22 个指标划分为 3 组变量,其中,植被指标为第一类变量(V),包括丰富度(X_1)、Simpson 指数(X_2)、Shannon 指数(X_3)、均匀度(X_4)、密度(X_5)、盖度(X_6)、平均冠幅(X_7)、平均胸径(X_8)、平均树高(X_9);土壤化学指标为第二类变量(u),包括 pH(Y_1)、有机质(Y_2)、全 N(Y_3)、全 P(Y_4)、全 K(Y_5)、碱解 N(Y_6)、速效 P(Y_7)、速效 K(Y_8);地形因子为第三变量(T),包括海拔(Z_1)、坡向(Z_2)、坡位(Z_3)、坡度(Z_4)、岩石裸露率(Z_5)。盖度为所有林木树冠的椭圆形面积之和占地面面积的比例,群落多样性指标的计算方法为^[18]:丰富度 $R = S$, Shannon 指数 $H = - \sum_{i=1}^S P_i \log P_i$, 均匀度 $E = H / \ln S$, Simpson 优势度指数 $D = \sum_{i=1}^S P_i^2$, 式中, S 为物种数目, P_i 为种 i 的相对重要值, 即 $P_i = N_i / N$, N_i 为第 i 个物种的重要值, N 为所有重要值之和, 重要值 = $RDE + RDO + RFE$ 式中, RDE 为相对密度, RDO 为相对优势度(胸高断面积), RFE 为相对频度。所有数据处理和主成分分析、聚类分析与典范相关分析均在 SPSS13.0 软件中完成。

2 结果与分析

2.1 喀斯特常绿落叶阔叶混交林生态系统总体特征经典统计分析

本文采用样本均值加减 3 倍标准差来识别特异值,在此区间外的数据均定为特异值,分别用最大和最小值代替^[19],后续计算均采用处理后的原始数据。经典统计分析表明(表 1),喀斯特峰丛洼地常绿落叶阔叶混交林生态系统的地形变化较大,景观异质性强,土壤养分含量均很高(除全 K 外),木本植物的多样性较大,结构相对合理。海拔、Simpson 指数、均匀度、pH 变异很小($CV < 10\%$),坡位、裸石率、Shannon 指数、冠幅、树高呈中等变异($10\% \leq CV \leq 30\%$),其他 13 个指标均为强度变异($CV > 30\%$),其中土壤养分均呈强变异^[20],尤以全氮和速效磷变异最大。

表 1 喀斯特常绿落叶阔叶混交林各指标的经典统计分析
Table 1 Traditional statistic analysis for indexes in the karst mixed forest of evergreen and deciduous broad leaf

因子 Factors	样本数 No. of samples	最小值 Min	最大值 Max	均值 Mean	标准差 Std. Deviation	中位数 Median	变异系数 CV/%
海拔 Elevation/m	50	440.0	562.4	474.4	24.4	471.0	5.14
坡向 Slope direction	50	1	5	2.9	1.9	3	64.85
坡位 Slope position	50	1	4	3.0	0.8	3	26.33
坡度 Slope degree/(°)	50	5	80	49.2	18.1	52.5	36.86
裸石率 Percentage of Exposed rock/%	50	10.0	98.0	77.3	20.1	85.0	26.00
丰富度 Abundance	50	4.0	61.0	27.5	11.1	26.5	40.32
Simpson 指数 Simpson index	50	0.33	0.97	0.90	0.09	0.91	9.70
Shannon 指数 Shannon index	50	0.99	5.22	3.98	0.65	3.99	16.41
均匀度 Evenness	50	0.50	0.92	0.85	0.07	0.86	7.58
密度 Density/(plant/m ²)	50	0.07	1.01	0.44	0.19	0.44	42.84
盖度 Coverage/%	50	6.70	364.36	179.42	97.24	167.18	54.20
平均冠幅 Breadth of crown/m	50	1.00	2.82	1.85	0.44	1.84	23.93
平均胸径 Diameter at breast height/cm	50	7.24	39.21	19.19	6.34	19.93	33.01
平均树高 Height/m	50	2.27	7.61	4.47	0.98	4.57	21.87
pH	50	5.76	7.68	6.96	0.48	7.10	6.94
有机质 Organic matter/(g/kg)	50	32.38	213.17	108.40	49.18	92.78	45.37
全 N Total N/(g/kg)	50	0.28	11.16	2.57	3.02	0.72	117.28
全 P Total P/(g/kg)	50	0.38	2.27	1.17	0.50	1.22	42.78
全 K Total K/(g/kg)	50	2.00	11.66	5.39	2.34	5.10	43.35
碱解 N Available N/(mg/kg)	50	206.98	1139.65	491.84	235.40	436.52	47.86
速效 P Available P/(mg/kg)	50	1.96	36.01	11.44	7.68	9.42	66.94
速效 K Available K/(mg/kg)	50	45.07	268.12	122.77	60.15	103.07	48.99

2.2 喀斯特常绿落叶阔叶混交林生态系统的主成分分析

主成分分析是研究如何将多指标问题转化为较少指标问题的一种方法,综合后的新指标彼此不相关,能综合反映原来多个指标的信息。以喀斯特峰丛洼地为尺度,石灰岩常绿落叶阔叶混交林 50 个 20 m×20 m 样方的植被(9 个)、土壤(8 个)和地形(5 个)共计 22 个指标的主成分分析表明(表 2),前 9 个主成分对方差解释的贡献率超过 85%,达到 90.15%,能够全面地反映所有信息。各主成分的贡献率都较低,表明喀斯特森林生态系统具有高度异质性,研究因子之间的相互作用要重视各因子的分异,全面考虑植被、土壤和地形三者之间的关系。第一主成分的载荷量以有机质(0.760)、全磷(0.824)、速效氮(0.905)和速效 P(0.908)最大,表明它们在喀斯特常绿落叶阔叶混交林生态系统中处于主导地位,是重要的指示因子,综合第三、四主成分的载荷量最大的 pH、全氮、全钾和速效钾,可归纳为综合土壤化学因子;第二主成分的载荷量以 Simpson 指数、Shannon 指数和均匀度指数最大,第五主成分的丰富度载荷量也比较大,达 0.759,称它们为森林群落多样性综合因子,它们在生态系统中也处于比较重要的地位;第五主成分的密度和第六主成分中冠幅、胸径、树高的载荷量最大,称它们为群落结构性综合因子,在生态系统中处于次要地位;所有地形因子的最大载荷量均出现在第七、八、九主成分中,表明地形对喀斯特峰丛洼地常绿落叶阔叶混交林生态系统稳定性的影响相对较小。

表 2 主成分分析的因子负荷量、特征根与贡献率

Table 2 Factor loading, eigenvalues and cumulative contribution percentage of principal component analysis

因子 Factors	主成分 Primary components								
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
海拔 Elevation/m	0.081	-0.031	-0.014	-0.092	0.316	0.037	-0.100	-0.001	0.892
坡向 Slope direction	-0.324	-0.003	0.422	-0.070	-0.445	-0.441	0.239	-0.031	-0.209
坡位 Slope position	0.180	0.011	0.384	-0.046	0.102	-0.149	-0.542	0.031	0.609
坡度 Slope degree/(°)	0.018	-0.006	0.248	0.093	0.109	-0.095	-0.867	0.093	0.149
裸石率 Percentage of Exposed rock/%	0.271	0.087	-0.148	0.006	0.369	0.252	-0.690	-0.238	0.033
丰富度 Abundance	-0.051	0.386	-0.066	-0.160	0.759	0.081	-0.332	-0.054	0.161
Simpson 指数 Simpson index	0.120	0.895	0.008	0.110	0.298	0.191	0.049	-0.0401	-0.022
Shannon 指数 Shannon index	0.081	0.785	-0.022	-0.041	0.514	0.164	-0.213	-0.024	0.073
均匀度 Evenness	0.110	0.954	-0.041	0.086	-0.085	0.121	0.026	0.060	-0.057
密度 Density/(plant/m ²)	-0.024	0.111	0.034	-0.046	0.939	-0.029	-0.051	0.055	0.175
盖度 Coverage/%	0.253	0.180	0.064	-0.144	0.532	0.613	-0.162	0.279	0.155
平均冠幅 Breadth of crown/m	0.280	0.223	0.045	-0.089	-0.046	0.878	0.025	0.207	0.051
平均胸径 Diameter at breast height/cm	0.202	0.140	-0.187	-0.039	-0.079	0.839	-0.042	-0.177	-0.060
平均树高 Height/m	0.270	0.080	-0.145	0.003	0.186	0.871	0.081	-0.039	-0.064
pH	0.290	0.054	-0.856	-0.051	-0.061	0.161	0.139	-0.057	-0.014
有机质 Organic matter/(g/kg)	0.760	0.098	-0.221	0.187	0.081	0.250	-0.263	0.294	-0.027
全 N Total N/(g/kg)	-0.330	0.016	-0.602	-0.075	0.156	0.053	0.277	0.414	-0.384
全 P Total P/(g/kg)	0.824	0.123	-0.159	0.187	0.020	0.323	-0.030	-0.050	-0.090
全 K Total K/(g/kg)	0.107	0.038	0.079	0.757	-0.189	-0.092	0.009	-0.388	-0.305
碱解 N Available N/(mg/kg)	0.905	0.110	0.148	-0.012	-0.031	0.155	-0.132	-0.148	0.172
速效 P Available P/(mg/kg)	0.908	0.040	-0.097	-0.039	0.043	0.246	0.044	-0.009	0.121
速效 K Available K/(mg/kg)	0.084	0.107	0.005	0.928	-0.026	-0.051	-0.078	0.158	0.064
特征根 Eigenvalues	3.622	2.660	1.685	1.615	2.674	3.278	1.976	0.693	1.631
累积贡献率 Accumulative percentage/%	16.46	28.55	36.21	43.55	55.70	70.60	79.59	82.74	90.15

2.3 喀斯特常绿落叶阔叶混交林生态系统的聚类分析

选取各个主成分中负荷量较大的因子,采用离差平方和法对 50 个 20 m × 20 m 样地进行聚类分析得图 2 所示的树状图。以重标距离 39 处作为异质性划分水平,正好可划分为次生林人工林干扰区(北面 24 个样地)和原生林(南面 26 个样地)2 种类型,真实地表征了植被类型的分异状况。以重标距离 19 处为水平,可划分为 4 个类型,结合野外调查资料,相邻样地属于同种类型居多,说明分类比较合理。直观体现了植被群落、土壤肥力、地形的综合差异。其中,第一类地处东北角坡地,共有样地 15 块,连片面积 6000 m²,1993 年火烧之后自然恢复了 18a,形成了以白毛长叶紫珠、朴树(*Celtis sinensis*)、苦楝(*Melia azedaeach*)、菜豆树(*Radermachera sinica*)、杜茎山、盐肤木(*Rhus chinensis*)等为主的次生林群落类型;第二类地处北面的洼地,9 块样地,面积 3600 m²,1993 年之前种植玉米后封育 18a,形成了以杉木、八角枫、枫香、野桐(*Mallotus barbatus*)、杜茎山为主的人工林次生林并存状态;第三类几乎包括了南面整个坡地(除 4 块样地外),共有样地 22 块,面积达 8800 m²,人为干扰较少,植被保存较好,铁榄为样地建群种,重要值为 48.15,东女贞、小叶栎树、广西密花树等为共优种,重要值依次为 34.06、23.81 和 21.81,远大于位居第 5 位的濒危植物掌叶木(*Handeli dendron bodinieri*),重要值为 9.61;第四类面积仅为 1600 m²,地处西南角最高处,地势险要,主要树种有广西密花树、欒木(*Loropetalum chinense*)、青檀(*Pteroceltis tatarinowii*)、圆果化香(*Platycarya longipes*)、青冈(*Cyclobalanopsis glauca*)、小叶栎树等。

进一步统计分析可定量描述 4 种类型之间的差别和组间差异显著性程度。表 3 显示,除 pH 值之外,其他化学指标差别均很大,不同的化学指标在不同类型之间的差异不同,表明土壤养分是喀斯特常绿落叶阔叶混交林生态系统的敏感指标。其中第Ⅲ类型除全 N 和全 K 之外的所有指标的均值均最高,土壤的肥力水平最高,而第Ⅳ类型除有机质、全 N 和速效 P 之外,其他指标的均值均比较小,特别是钾。组间差异除速效 K 不显著、全钾显著外,其他均达到极显著水平,表明各指标

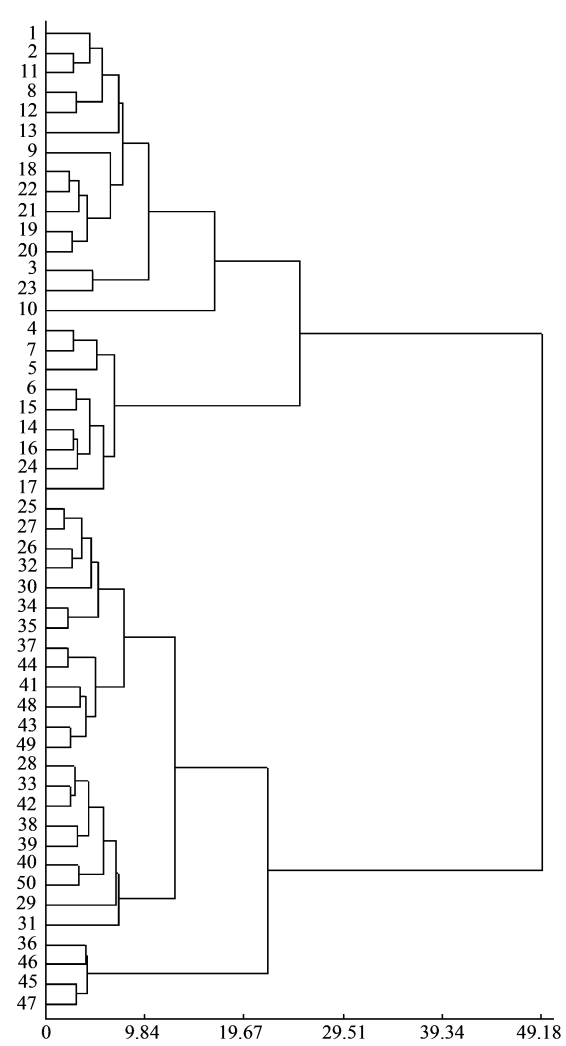


图 2 喀斯特常绿落叶阔叶混交林生态系统聚类分析
Table 2 The dendrogram result of cluster analysis of karst evergreen defoliate and latifoliate mixed forest

表 3 4 种类型土壤化学指标值的平均值与标准差

Table 3 Mean and standard deviation of soil chemical index in the four vegetation groups

类型 Groups	pH	有机质 SOM/(g/mg)	全 N TN/(g/mg)	全 P TP/(g/mg)	全 K TK/(g/mg)	碱解 N AN/(mg/mg)	速效 P AP/(mg/mg)	速效 K AK/(mg/mg)
I	6.42 ± 0.10	63.53 ± 5.87	0.54 ± 0.04	0.73 ± 0.07	6.08 ± 0.80	385.01 ± 29.87	5.18 ± 1.05	128.26 ± 19.38
II	7.48 ± 0.04	85.72 ± 3.64	7.21 ± 0.91	1.09 ± 0.07	5.88 ± 0.54	288.93 ± 23.25	7.99 ± 1.01	115.87 ± 11.38
III	7.11 ± 0.06	151.87 ± 8.32	1.49 ± 0.31	1.62 ± 0.07	5.26 ± 0.38	690.40 ± 42.84	17.95 ± 1.39	129.21 ± 13.13
IV	7.01 ± 0.13	88.56 ± 5.56	5.71 ± 1.32	0.60 ± 0.06	2.37 ± 0.22	256.92 ± 30.64	7.33 ± 0.32	82.37 ± 9.73
F	27.35 **	29.50 **	38.97 **	36.30 **	3.20 *	23.03 **	21.69 **	0.76

的分异很大,异质性很强;4 种类型的群落结构特点(表 4)除 Simpson 指数和均匀度之外,其他指标也存在较大的差异;而表 5 的景观特点显示,海拔较高、裸石率较大、坡度较高的阴坡中上部,因人为干扰较少,植被保存完好,土壤肥力较高,成为群落多样性高和群落结构比较合理的第Ⅲ类型主要分布区。

2.4 喀斯特常绿落叶阔叶混交林生态系统的典型相关分析

植被与土壤因子、植被与地形因子、土壤与地形因子之间的典型相关分析结果见表 6,前 4 个特征值的方差累积贡献率才分别达到 74.67%、80.71%、78.10%,基本能反映出大部分的变量信息,由此而建立了两两之间的四对典型变量构成(表 7),由于三、四对典型变量的影响较小,因此只取第一、二对典型变量进行分析。

表 4 4 种类型的植被群落结构特点

Table 4 Features of vegetation communities in the four vegetation groups

类型 Groups	丰富度 Abundance	Simpson 指数 Simpson index	Shannon 指数 Shannon index	均匀度 Evenness	密度 /(株/m ²) Density	盖度/% Coverage	冠幅/m Breadth of crown	胸径/cm Diameter at breast height	树高/m Height
I	23.00 ± 2.55	0.87 ± 0.034	3.69 ± 0.23	0.84 ± 0.03	0.36 ± 0.04	104.61 ± 21.07	1.55 ± 0.12	14.49 ± 2.07	3.51 ± 0.21
II	18.33 ± 0.94	0.89 ± 0.01	3.57 ± 0.06	0.85 ± 0.01	0.32 ± 0.04	114.21 ± 15.47	1.76 ± 0.12	19.79 ± 1.70	4.59 ± 0.17
III	29.50 ± 1.09	0.93 ± 0.00	4.20 ± 0.07	0.86 ± 0.01	0.46 ± 0.02	240.80 ± 15.24	2.13 ± 0.07	22.44 ± 0.76	5.06 ± 0.16
IV	54.00 ± 2.86	0.93 ± 0.02	4.80 ± 0.24	0.83 ± 0.03	0.87 ± 0.08	269.13 ± 26.26	1.62 ± 0.10	17.64 ± 1.30	4.54 ± 0.36
F	29.35 **	1.72	6.84 **	0.67	20.05 **	16.10 **	8.50 **	6.36 **	13.47 **

表 5 4 种类型的景观特点

Table 5 Landscape features of the four vegetation groups

类型 Groups	海拔 Elevation	坡度 Slope	裸石率/% Percentage of exposed rock	不同坡位样地数目 No. of samples in the slope position				不同坡向样地数目 No. of samples in the slope direction			
				上 Upper	中 Middle	下 Bottom	洼地 Depression	阳 South	半阳 Semi- south	半阴 Semi- north	阴 North
I	471.6 ± 6.9	54.0 ± 3.0	65.7 ± 3.6	5	10	0	0	0	15	0	0
II	444.8 ± 1.7	26.1 ± 7.1	62.2 ± 8.9	0	0	6	3	0	4	4	1
III	483.0 ± 3.3	53.4 ± 3.2	88.3 ± 2.8	6	16	0	0	0	2	2	18
IV	503.9 ± 7.7	60.0 ± 2.0	93.8 ± 1.3	2	2	0	0	0	0	0	4
F	12.6 **	9.1 **	10.1 **								

表 6 植被、土壤和地形的典范相关系数的卡方检验

Table 6 Chi-square tests of canonical correlation coefficients among vegetation, soil and topography factors

因子 Factors	典型向量 Typical vector	典型相关系数 Canonical correlation coefficient	特征值 Eigenvalue	卡方值 Chi-square value	自由度 Freedom degree	显著水平 Significant level	累积贡献率/% Accumulative percentage
植被与土壤因子 Vegetation and soil factors	1	0.749	5.891	84.953	72	0.141	34.65
	2	0.627	3.035	52.086	56	0.624	52.51
	3	0.572	2.092	32.148	42	0.864	64.81
	4	0.449	1.676	16.275	30	0.980	74.67
植被与地形因子 Vegetation and topography factors	1	0.771	5.413	72.753	45	0.006	38.67
	2	0.616	2.867	35.302	32	0.315	59.15
	3	0.489	1.911	15.525	21	0.796	72.80
	4	0.257	1.107	4.191	12	0.980	80.71
土壤与地形因子 Soil and topography factors	1	0.764	4.379	93.431	40	0.000	33.69
	2	0.721	2.670	56.566	28	0.001	54.43
	3	0.546	1.870	25.709	18	0.107	68.81
	4	0.427	1.207	10.836	10	0.370	78.10

植被因子与土壤因子的第一、二对典型相关系数分别为 0.749、0.627,表明土壤第一、二典型变量相对植被第一、二典型变量的影响较大,但由于喀斯特常绿落叶阔叶混交林顶极群落的生态系统相对稳定,在气候的调节下,植被和土壤的相互作用已经处于一种比较平衡的状态,典型相关系数均不显著。由表 7 可看出,植被因子中,平均冠幅、平均胸径、平均树高 3 个群落结构性指标载荷较高,土壤因子中土壤全磷含量较高,其次为碱解氮、有机质和有效 P,说明群落结构和土壤有机质、氮、磷的相互影响最大,尤以平均胸径和全磷的关系最密切。

植被与地形因子的第一、二对典型相关系数分别为 0.771 和 0.616,说明地形第一、二典型变量均对植被第一、二典型变量的影响较大,且第一对典型变量达到了极显著水平。地形因子中坡向和裸石率的载荷较大,其次为坡位和海拔。植被因子中以密度、盖度、平均冠幅、平均胸径和平均树高等 5 个结构因子的载荷较大,其次为物种丰富度。说明地形因子中坡向和岩石裸露率通过对雨、热、土壤养分的再分配植被的影响较大,海拔和坡位次之,主要影响群落结构和物种丰富度。

土壤和地形因子的第一、二对典型相关系数分布为 0.764 和 0.721,均达到了极显著水平,可见土壤和地形之间存在很高的相关性。土壤因子中全氮和有机质载荷较大,其次为有效磷和 pH 值。地形因子中坡向和坡位的载荷很大,其次为坡度和海拔,说明它们通过对水土流失的控制对土壤的影响较大,主要影响有机质、全氮、有效磷和 pH 值。

表 7 植被、土壤和地形之间的典型变量构成

Table 7 The composition of canonical variables among vegetation, soil and topography

植被与土壤的第一、二、三、 四典型变量 The 1 st , 2 nd , 3 rd and 4 th canonical variables of vegetation and soil	$V_1 = 0.0035X_1 + 0.0876X_2 + 0.0746X_3 + 0.0502X_4 + 0.0009X_5 + 0.1073X_6 + 0.1912X_7 + 0.196X_8 + 0.1733X_9$ $V_2 = 0.1135X_1 + 0.0005X_2 + 0.0474X_3 + 0.0002X_4 + 0.0971X_5 + 0.2312X_6 + 0.0697X_7 + 0.0033X_8 + 0.0106X_9$ $V_3 = 0.0001X_1 + 0.0009X_2 + 0.0001X_3 + 0.0041X_4 + 0.0057X_5 + 0.0273X_6 + 0.0694X_7 + 0.1175X_8 + 0.1708X_9$ $V_4 = 0.0074X_1 + 0.0251X_2 + 0.0002X_3 + 0.0066X_4 + 0.0072X_5 + 0.0116X_6 + 0.0093X_7 + 0.0004X_8 + 0.0051X_9$ $U_1 = 0.0137Y_1 + 0.191Y_2 + 0.0356Y_3 + 0.4514Y_4 + 0.004Y_5 + 0.2196Y_6 + 0.1483Y_7 + 0.0269Y_8$ $U_2 = 0.0046Y_1 + 0.055Y_2 + 0.0003Y_3 + 0.0001Y_4 + 0.2591Y_5 + 0.0142Y_6 + 0.0263Y_7 + 0.0378Y_8$ $U_3 = 0.2453Y_1 + 0.052Y_2 + 0.0636Y_3 + 0.0447Y_4 + 0.0135Y_6 + 0.1026Y_7 + 0.0092Y_8$ $U_4 = 0.0119Y_1 + 0.0004Y_2 + 0.0112Y_3 + 0.0015Y_4 + 0.0098Y_5 + 0.0062Y_6 + 0.0186Y_7 + 0.0061Y_8$
植被与地形第一、二、三、 四典型变量 The 1 st , 2 nd , 3 rd and 4 th canonical variables of vegetation and topography	$V_1 = 0.2206X_1 + 0.0826X_2 + 0.1997X_3 + 0.023X_4 + 0.114X_5 + 0.363X_6 + 0.1583X_7 + 0.2047X_8 + 0.3146X_9$ $V_2 = 0.1385X_1 + 0.0004X_2 + 0.0316X_3 + 0.0199X_4 + 0.1436X_5 + 0.0502X_6 + 0.0045X_7 + 0.0422X_8 + 0.0417X_9$ $V_3 = 0.0011X_1 + 0.0081X_2 + 0.0001X_3 + 0.0009X_4 + 0.0274X_5 + 0.006X_6 + 0.0174X_7 + 0.0174X_8 + 0.0488X_9$ $V_4 = 0.0059X_1 + 0.0049X_2 + 0.0044X_3 + 0.0023X_4 + 0.0001X_5 + 0.0055X_6 + 0.0089X_7 + 0.0004X_8 + 0.0001X_9$ $T_1 = 0.0255Z_1 + 0.5015Z_2 + 0.0156Z_3 + 0.0207Z_4 + 0.3799Z_5$ $T_2 = 0.2758Z_1 + 0.0021Z_2 + 0.2306Z_3 + 0.1601Z_4 + 0.0323Z_5$ $T_3 = 0.0247Z_1 + 0.0172Z_2 + 0.0765Z_3 + 0.0397Z_4 + 0.0063Z_5$ $T_4 = 0.0052Z_1 + 0.0034Z_2 + 0.0023Z_3 + 0.0072Z_4 + 0.0145Z_5$
土壤与地形第一、二、三、 四典型变量 The 1 st , 2 nd , 3 rd and 4 th canonical variables of soil and topography	$U_1 = 0.4209Y_1 + 0.0319Y_2 + 0.5498Y_3 + 0.075Y_4 + 0.0076Y_5 + 0.093Y_6 + 0.0035Y_7 + 0.0087Y_8$ $U_2 = 0.0808Y_1 + 0.5758Y_2 + 0.0569Y_3 + 0.2674Y_4 + 0.1409Y_5 + 0.2776Y_6 + 0.4345Y_7 + 0.0111Y_8$ $U_3 = 0.0094Y_1 + 0.1929Y_2 + 0.0042Y_3 + 0.0322Y_4 + 0.1824Y_5 + 0.0351Y_7 + 0.0829Y_8$ $U_4 = 0.0457Y_1 + 0.1841Y_2 + 0.0033Y_3 + 0.4639Y_4 + 0.0942Y_5 + 0.5603Y_6 + 0.4556Y_7 + 0.0072Y_8$ $T_1 = 0.1241Z_1 + 0.1175Z_2 + 0.8194Z_3 + 0.3644Z_4 + 0.0129Z_5$ $T_2 = 0.3564Z_1 + 0.8387Z_2 + 0.01695Z_3 + 0.064Z_4 + 0.2376Z_5$ $T_3 = 0.1073Z_1 + 0.0251Z_2 + 0.5175Z_4 + 0.2161Z_5$ $T_4 = 0.138Z_1 + 0.0052Z_2 + 0.0084Z_3 + 0.0089Z_4 + 0.2802Z_5$

3 结论和讨论

“南石(石漠化)北沙(沙漠化)”是制约我国西部地区可持续发展的两大生态环境问题^[21],西南喀斯特是青藏高原隆起在南亚大陆亚热带气候区一个海拔梯度大、地势格局复杂、生态脆弱的独特环境单元^[22]。可溶

岩成土速率缓慢、土层浅薄且不连续、水文过程变化迅速、旱涝时常发生,水热土资源空间分布不均且时空异质性强、环境容量小等而导致生态系统可恢复性低。又加上喀斯特地区的植被大都生长在石灰岩石块上、缝隙中或悬崖陡壁处,一旦退化难以恢复,形成非地带性顶极群落即亚热带石灰岩常绿落叶阔叶混交林少则几十年,多则数百年甚至上千年^[23]。近现代以来,由于人类不合理的土地利用,绝大部分森林基本退化成灌丛和草坡,水土流失严重,生境质量下降,许多地带甚至石漠化,且快速发展的总体趋势并未能得到有效的遏止。

木论与茂兰是两个国家级自然保护区,连片构成当今世界上分布面积最广、保护最好、原生性最强的喀斯特非地带性顶极植被类型即亚热带常绿落叶阔叶混交林,是一个物种丰富、类型多、可更新森林资源突出、结构复杂、功能稳定、综合性强和稳定性强的生态系统。本文基于木论 2 hm² 动态监测样地,以典型峰丛洼地景观单元为尺度,用多元统计分析手段揭示了喀斯特峰丛洼地生态系统的总体特征及植被、土壤、地形的相互作用机制,以便指导喀斯特广大不同退化区域植被的迅速恢复和生态重建。

喀斯特常绿落叶阔叶混交林生态系统错综复杂,土壤浅薄、覆盖面很少且不连续,但养分含量很高。植被、土壤和地形的 22 个指标中,除海拔、Simpson 指数、均匀度、pH 变异不大外,其他 18 个指标均呈中、强度变异。主成分分析表明,综合土壤化学因子是该生态系统的主导因子,具有重要的指示作用,森林群落多样性综合因子的地位也比较重要,群落结构性综合因子在系统中则处于次要地位,而峰丛洼地的海拔及相对高差不大,景观效应不很明显。

采用离差平方和法将 50 个样地聚类,以重标距离 19 处为水平划分的 4 个类型,直观体现了群落类型、土壤肥力、地形的综合差异。其中第 1 类为地处东北角坡地、火烧之后自然恢复的次生林群落类型,第 2 类为地处北面洼地退耕还林的次生林人工林类型,第 3 类为地处南面中上坡、面积 8800 m² 的原生林,群落结构合理,土壤肥沃。第 4 类为西南坡顶端面积很小的原生矮林,地形陡峭,土壤贫瘠,密度和盖度大,但冠幅、胸径和树高均很小,耐旱性极强。

喀斯特常绿落叶阔叶混交林生态系统的土壤形成与发育,极大程度上受土壤母质和生物的影响,岩石的风化过程形成了土壤的物质基础,旺盛的生物累积过程是土壤提高肥力的基础,而较好的土壤肥力促进了植物的生长。地形通过对水热资源的重新分配影响土壤肥力,从而调控植被的物种组成和群落类型。因此,植物-土壤-地形三者之间相互作用,共同演替发展。典型相关分析表明,土壤因子第一、二典型变量对植被因子第一、二典型变量的相关系数达 0.749 和 0.627,土壤有机质、氮、磷主要影响森林群落的结构,土壤和植物之间形成了物质的良性循环,又加上土被极少,许多植被直接穿插于岩石缝隙中,被迫吸收岩石风化物中的某些过量元素,因此土壤和植被之间的典型相关系数虽大,但相关性不显著。植被与地形因子的第一对典型相关系数为 0.771,呈极显著水平,主要是坡向和岩石裸露率影响森林的群落结构和物种丰富度。土壤和地形之间第一、二对典型相关系数均达到了极显著水平,坡向和坡位对土壤全氮和有机质的影响最大,处于南面中上部的土壤肥力水平最高。

致谢:感谢魏文学博士对本文写作的帮助。

References:

- [1] Woodward F I, McKee I F. Vegetation and climate. *Environment International*, 1991, 17: 535-546.
- [2] Burke A. Classification and ordination of plant communities of the Naukluft Mountain, Namibia. *Journal of Vegetation Science*, 2001, 12: 53-60.
- [3] Jiao J Y, Ma X H, Bai W J, Jiao F, Wen Z M. Correspondence analysis of vegetation communities and soil environmental factors on abandoned cropland on hilly-gullied Loess Plateau. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(5): 744-752.
- [4] Yang X B, Wu Q S. The characteristics of secondary vegetation restoration on abandoned cropland in Hainan island tropical region. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000, 24(4): 477-482.
- [5] Shen Z H, Zhang X S, Jin Y X. Gradient analysis of the influence of mountain topography on vegetation pattern. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000, 24(4): 430-435.
- [6] McDonald D J, Cowling R M, Boucher C. Vegetation-environment relationships on a species-rich coastal mountain range in the fynbos biome (South Africa). *Plant Ecology*, 1996, 123: 165-182.
- [7] Gong G Q, Cheng J M, Mi X C, Chen S W, Fang T. Habitat association of wood species in the Gutianshan subtropical broad-leaved evergreen

- forest. *Science of Soil and Water Conservation*, 2007, 5(3): 79-83.
- [8] Wu Y, Liu Q, Qiao Y K, Pan K W, Zhao C M, Chen Q H. Species diversity changes in subalpine coniferous forests of different restoration stages and their effects on soil properties. *Acta Phytocologica Sinica*, 2001, 25(6): 648-655.
- [9] Yue Y M, Wang K L, Zhang W, Chen H S, Wang M. Relationships between soil and environment in peak-cluster depression areas of karst region based on canonical correspondence analysis. *Environmental Science*, 2008, 29(5): 1400-1405.
- [10] Liu S L, Ma K M, Fu B J, Kang Y X, Zhang J Y, Zhang Y X. The relationship between landform, soil characteristics and plant community structure in the Donglingshan Mountain region, Beijing. *Acta Phytocologica Sinica*, 2003, 27(4): 496-502.
- [11] Ye M S, Guan W B, Tan H, Ma K M, Liu G H, Wang X L. The α diversity of shrubs community in the arid valley of the Minjiang River. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(6): 1123-1130.
- [12] Peng W X, Wang K L, Song T Q, Zeng F P, Wang J R. Controlling and restoration models of complex degradation vulnerable Karst ecosystem. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(2): 811-820.
- [13] Lan A J, Zhang B P, Xiong K N, An Y L. Spatial pattern of the fragile karst environment in southwest Guizhou Province. *Geographical Research*, 2003, 22(6): 733-741.
- [14] Wu H Y, Peng W X, Song T Q, Zeng F P, Li X H, Song X J, Ouyang Z W. Changes of soil nutrients in process of natural vegetation restoration in karst disturbed area in northwest Guangxi. *Journal of soil and Water Conservation*, 2008, 22(4): 143-147.
- [15] Song T Q, Peng W X, Zeng F P, Wang K L, Ouyang Z W. Vegetation succession rule and regeneration strategies in disturbed karst area, northwest Guangxi. *Journal of Mountain Research*, 2008, 26(5): 597-604.
- [16] Zheng Y W. Introduction to Mulun Karst Forest Region. Beijing: Science Press, 1999: 1-9.
- [17] Condit R. Research in large, long-term tropical forest plots. *Trends in Ecology & Evolution*, 1995, 10: 18-22.
- [18] Ma K P, Huang J H, Yu S L, Chen L Z. Plant community diversity in Dongling Mountain Beijing, China: species richness, evenness and species diversity. *Acta Ecologica Sinica*, 1995, 15(3): 268-277.
- [19] Liu F C, Shi X Z, Yu D S, Pan X Z. Characteristics of spatial variability of total soil nitrogen in the typical area of Taihu Lake basin. *Geographical Research*, 2004, 23(1): 163-170.
- [20] Xue Z P, Yang X W, Duan X S, Lu X. Spatial variability of soil nutrient and reasonable sampling number. *Transaction of the CSAE*, 2002, 18(4): 6-9.
- [21] Wang S J, Li Y B. Problems and development trends about researches on karst rocky desertification. *Advances in Earth Science*, 2007, 22(6): 573-582.
- [22] Zhang Z G. Karst types in China. *Geo Journal*, 1980, 46: 541-570.
- [23] Zeng F P, Peng W X, Song T Q, Wang K L, Wu H Y, Song X J, Zeng Z X. Changes in vegetation after 22 years' natural restoration in the karst disturbed area in Northwest Guangxi. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(12): 5110-5119.

参考文献:

- [3] 焦菊英, 马祥华, 白文菊, 焦峰, 温仲明. 黄土丘陵沟壑区退耕地植物群落与土壤环境因子的对应分析. *土壤学报*, 2005, 42(5): 744-752.
- [4] 杨小波, 吴庆书. 海南岛热带地区弃荒农田次生植被恢复特点. *植物生态学报*, 2000, 24(4): 477-482.
- [5] 沈泽昊, 张新时, 金义兴. 地形对亚热带山地景观尺度植被格局影响的梯度分析. *植物生态学报*, 2000, 24(4): 430-435.
- [7] 宫贵权, 程积民, 米湘成, 陈声文, 方滕. 古田山常绿阔叶林木本植物与生境的相关性. *中国水土保持科学*, 2007, 5(3): 79-83.
- [8] 吴彦, 刘庆, 乔永康, 潘开文, 赵常明, 陈庆恒. 亚高山针叶林不同恢复阶段群落物种多样性变化及其对土壤理化性质的影响. *植物生态学报*, 2001, 25(6): 648-655.
- [9] 岳跃民, 王克林, 张伟, 陈洪松, 王敏. 基于典范对应分析的喀斯特峰丛洼地土壤-环境关系研究. *环境科学*, 2008, 29(5): 1400-1405.
- [10] 刘世梁, 马克明, 傅伯杰, 康永祥, 张洁瑜, 张育新. 北京东灵山地区地形土壤因子与植物群落关系研究. *植物生态学报*, 2003, 27(4): 496-502.
- [11] 冶民生, 关文彬, 谭辉, 马克明, 刘国华, 汪西林. 岷江干旱河谷灌丛 α 多样性分析. *生态学报*, 2004, 24(6): 1123-1130.
- [12] 彭晚霞, 王克林, 宋同清, 曾馥平, 王久荣. 喀斯特脆弱生态系统复合退化控制与重建模式. *生态学报*, 2008, 28(2): 811-820.
- [13] 兰安军, 张百平, 熊康宁, 安裕伦. 黔西南脆弱喀斯特生态环境空间格局分析. *地理研究*, 2003, 22(6): 733-741.
- [14] 吴海勇, 彭晚霞, 宋同清, 曾馥平, 黎星辉, 宋希娟, 欧阳资文. 桂西北喀斯特人为干扰区植被自然恢复与土壤养分变化. *水土保持学报*, 2008, 22(4): 143-147.
- [15] 宋同清, 彭晚霞, 曾馥平, 王克林, 欧阳资文. 桂西北喀斯特人为干扰区植被的演替规律与更新策略. *山地学报*, 2008, 26(5): 597-604.
- [16] 郑颖吾. 木论喀斯特林区概论. 北京: 科学出版社, 1999: 1-9.
- [18] 马克平, 黄建辉, 于顺利, 陈灵芝. 北京东灵山地区植物群落多样性的研究 II. 丰富度、均匀度和物种多样性指数. *生态学报*, 1995, 15(3): 268-277.
- [19] 刘付程, 史学正, 于东升, 潘贤章. 太湖流域典型地区土壤全氮的空间变异特征. *地理研究*, 2004, 23(1): 163-170.
- [20] 薛正平, 杨卫星, 段项锁, 陆贤. 土壤养分空间变异及合理取样数研究. *农业工程学报*, 2002, 18(4): 6-9.
- [21] 王世杰, 李阳兵. 喀斯特石漠化研究存在的问题与发展趋势. *地球科学进展*, 2007, 22(6): 573-582.
- [23] 曾馥平, 彭晚霞, 宋同清, 王克林, 吴海勇, 宋希娟, 曾昭霞. 桂西北喀斯特人为干扰区植被自然恢复 22 年后群落特征. *生态学报*, 2007, 27(12): 5110-5119.