

DOI: 10.11931/guihaia.gxzw201603002

引文格式: 申文辉, 欧芷阳, 庞世龙, 等. 桂西南蚬木群落优势树种分布与环境因子的关系 [J]. 广西植物, 2017, 37(6):694–701

SHEN WH, OU ZY, PANG SL, et al. Relationship between the spatial distributions of dominant arbor species and environmental factors of *Excentrodendron hsienmu* community in Southwest Guangxi, China [J]. Guihaia, 2017, 37(6):694–701

桂西南蚬木群落优势树种分布与环境因子的关系

申文辉¹, 欧芷阳^{1*}, 庞世龙¹, 何琴飞¹, 梁艳²

(1. 广西林业科学研究院, 南宁 530002; 2. 中南林业科技大学, 长沙 410004)

摘要: 蚬木(*Excentrodendron hsienmu*)是广泛分布于桂西南喀斯特山地的优良用材树种,了解影响蚬木群落物种分布的主要环境因子,对蚬木资源的有效保护具有重要意义。该研究基于桂西南蚬木群落的样地调查,测定了样地中乔木树种的重要值以及海拔、坡度、坡向、土壤养分等8个环境因子,采用 Pearson 相关分析研究了地形与土壤等环境因子间的相互关系,运用典范对应分析(CCA)方法对群落主要树种与环境因子间的关系进行了排序。结果表明:调查共记录到胸径 ≥ 1.0 cm、树高 ≥ 1.5 m的立木共176种,隶属于50科128属;群落乔木层以蚬木占绝对优势,主要伴生种有广西澄广花(*Orophea anceps*)、金丝李(*Garcinia paucinervis*)、割舌树(*Walsura robusta*)、苹婆(*Sterculia nobilis*)。相关分析显示海拔与土壤有机质、全氮间呈极显著正相关;除土壤pH之外,其余土壤肥力因子间均呈极显著正相关。CCA分析显示全钾、全磷对群落优势种的分布影响最为显著,坡向、坡度对优势种分布也具有重要作用。该研究结果揭示了影响蚬木群落物种分布的主要环境因子,为该区域的植被恢复措施提供了科学依据。

关键词: 群落生态学, 蚬木, 喀斯特山地, CCA, 土壤肥力, 地形

中图分类号: Q948.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3142(2017)06-0694-08

Relationship between the spatial distributions of dominant arbor species and environmental factors of *Excentrodendron hsienmu* community in Southwest Guangxi, China

SHEN Wen-Hui¹, OU Zhi-Yang^{1*}, PANG Shi-Long¹, HE Qin-Fei¹, LIANG Yan²

(1. Guangxi Forestry Research Institute, Nanning 530002, China; 2. Central South University of Forestry & Technology, Changsha 410004, China)

Abstract: Revealing the relationships between plant distributions and environmental factors is one focus of plant community ecology. *Excentrodendron hsienmu* is the endemic species in tropical limestone area, and the second national key protected plant of China, and it widely distributes in the karst mountains of Southwest Guangxi, China. Exploring factors effecting the dominant arbor trees distribution has significant implication for effectively protecting the *E. hsienmu* population in the study area. Important value of the main arbor species and eight environmental factors were measured based on field surveys in the karst mountains of Southwest Guangxi. And then, correlation analysis was used to detect the relationships between topographic and soil factors. Canonical correspondence analysis (CCA) was used to explore the effects of environmental factors on the distribution of dominant arbor species. A total of 176 woody plant species with diameter at

收稿日期: 2016-06-14 修回日期: 2016-07-26

基金项目: 广西优良用材林资源培育重点实验室开放课题(14B0101); 广西林业科技项目(桂林科学[2014]02号) [Supported by Guangxi Key Laboratory of Superior Timber Trees Cultivation Program (14B0101); Guangxi Forestry Science and Technology Program ([2014]02)]。

作者简介: 申文辉(1972-), 男, 湖南安乡人, 博士研究生, 教授级高级工程师, 主要从事森林生态学研究, (E-mail) shenwenhui2003@163.com。

*通信作者: 欧芷阳, 高级工程师, 主要从事植物生态学研究, (E-mail) ozhiyang@126.com。

breast height ≥ 1.0 cm, and tree height ≥ 1.5 m were recorded, belonging to 50 families, 128 genera. *E. hsienmu* was absolutely dominant in tree layer, while *Orophea anceps*, *Garcinia paucinervis*, *Walsura robusta*, and *Sterculia nobilis* were the main accompanying species. Correlation analysis showed elevation was very significantly positively related to soil organic matter and total nitrogen. Except for soil pH, relationships between all soil factors were markedly positive. Result of CCA revealed that soil total potassium had the most significantly effect and the soil total phosphorus had the second on the distribution patterns of dominant arbor species, while slope aspect and degree also played important roles in the spatial patterns of them. This study revealed the main factors influencing on the spatial patterns of dominant arbor trees of *E. hsienmu* community, and provides scientific information for the vegetation restoration in the study area.

Key words: community ecology, *E. hsienmu*, karst mountain, CCA, soil fertility, topography

揭示植物的分布规律与环境因子之间的关系及其生态学意义,是当前植物群落生态学研究的主要目的之一(Zare et al, 2011)。研究表明,植物分布格局受多种因素影响。在全球或区域尺度上,植被分布主要受纬度和地带性气候所影响(Engler et al, 2009);在群落尺度上,土壤和地形差异主导着植物的空间分布(邵方丽等,2012;谢玉彬等,2012)。地形控制着光、温、水的空间再分配,其变化导致异质性微生境的形成(宋轩等,2011;张娜等,2012),进而影响着植物分布格局。多数研究显示山地森林的植物分布存在着地形差异(刘海丰等,2013;卢纪元等,2016),植物多样性一般随海拔梯度呈规律性的变化趋势(张昌顺等,2012;刘哲等,2015)。此外,地形是重要的土壤成土因子之一,其变化可造成土壤养分异质性,植被恢复和演替又可以显著改善土壤质量(王昭艳等,2011;魏强等,2012;Wang et al, 2012)。因此,地形、土壤、植物三者在不同尺度上存在密切联系,对三者间关系进行研究,可以深入诠释植物分布与环境的关系。

喀斯特地貌在我国主要分布于以贵州为中心的西南各省区,拥有丰富的峰丛、峰林、洼地和漏斗等地貌形态,对小尺度上土壤分布影响极大。喀斯特地表岩石与浅薄土层相互镶嵌,导致土壤呈斑块化分布,为植物生存提供了多样性的生境。该区域植物群落种类组成相对丰富,空间分布复杂,是植物群落学者关注的重点区域之一(刘玉国等,2011;张忠华等,2011)。其中,蚬木作为热带石灰岩特有植物,广泛分布于桂西南岩溶山地。受历史上人类活动和采伐的影响,蚬木的分布范围逐渐缩小,种群更新和扩展困难,目前被列为国家 II 级保护植物。蚬木的濒危原因和濒危机制早前引起了 Tang et al (2005) 的关注,近几年研究者对蚬木的种群结构、更新以及群落与环境因子之间的定量耦合关系进行

了探讨(欧芷阳等,2013a,b;向悟生等,2013a,b),但对蚬木群落物种分布与环境因子间的关系认识仍然十分有限,不利于这一区域植被的保护和恢复。地形、土壤环境异质性对蚬木群落的物种分布及多样性维持起着重要作用,群落的恢复与扩展又可以减少岩溶山地的水土流失、提高土壤质量。因此,本研究以桂西南岩溶山地的蚬木群落为研究对象,应用 CCA 方法对群落优势树种分布与地形和土壤养分因子间的数量关系进行分析,揭示影响群落物种分布的主要环境因子,以期为该区域的植被恢复措施及树种配置提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于广西西南部喀斯特山地,包括大新、靖西、龙州、隆安、那坡、平果、天等、武鸣 8 个县份(地处 $22^{\circ}8.9' \sim 23^{\circ}54'N$, $105^{\circ}31' \sim 108^{\circ}37'E$ 之间)。该区域分布着典型的亚热带裸露型岩溶地貌。气候类型多属亚热带季风性气候,部分区域地处我国热带北缘。全年光照充足、雨量充沛。年平均气温在 $19.1 \sim 22.0^{\circ}C$ 之间,年均降水量为 $1150 \sim 1550$ mm,年日照时数 $1411.2 \sim 1660$ h,年均相对湿度在 79% 以上(戴月和薛跃规,2008;于明含和孙保平,2012;郭屹立等,2015)。土壤为砂页岩赤红壤、黄红壤、黑色石灰土、棕色石灰土和红色石灰土等。代表性植被为热带石灰岩季节性雨林(苏宗明等,2014),研究区蚬木群落乔木层以蚬木占优势,金丝李(*Garcinia paucinervis*)、南酸枣(*Cherospondias axillaris*)、山榄叶柿(*Diospyros siderophylla*)、榕树(*Ficus microcarpa*)、圆叶乌柏(*Sapium rotundifolium*)、广西密花树(*Rapanea kwangsiensis*)以及广西澄广花(*Orophea anceps*)等较为常见。灌木

层常见红背山麻杆 (*Alchornea trewioides*)、灰毛浆果楝 (*Cipadessa cinerascens*)、岩柿 (*Diospyros dumetorum*)、石山棕 (*Guihaia argyrata*)、龙州细子龙 (*Ameiodendron integrifoliolatum*) 和米扬噎 (*Streblus tonkinensis*) 等。草本层常见肾蕨 (*Nephrolepis auriculata*)、假鞭叶铁线蕨 (*Adiantum malesianum*)、石生铁角蕨 (*Asplenium saxicola*)、荇草 (*Arthraxon hispidus*)、疏毛楼梯草 (*Elatostema albopilosum*) 和麒麟叶 (*Epipremnum pinnatum*) 等。藤本植物发达,以老虎刺 (*Pterolobium punctatum*)、柔毛网脉崖爬藤 (*Tetrastigma retinervium*) 和龙须藤 (*Bauhinia championii*) 较为常见。

1.2 样地调查

对上述 8 个县份的蚬木群落进行调查。考虑到大新、靖西、龙州,以及隆安、天等、武鸣的调查地点较为接近,这 6 个县份各设置 3 个样方,那坡为调查的最西端、平果蚬木林为经严重干扰形成的次生林,这两个县份设置的调查样方多一些。样方面积为 $20\text{ m} \times 20\text{ m}$,总共设置 38 个样方。每个样方划分为 4 个 $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ 的测量单元,对单元内胸径 $\geq 1.0\text{ cm}$ 、树高 $\geq 1.5\text{ m}$ 的立木进行每木检尺,记录立木的物种名、胸径 (Diameter at breast height, DBH)、树高、枝下高等数据,利用手持式 GPS 在样方中心位置记录其地理坐标和海拔高度 (elevation, Elv),并记录样方所在的坡向 (slope aspect, Aspect) 和坡度 (Slope)。样地基本概况见表 1。

1.3 土样收集与指标测定

在调查样方内按 S 形线路取 0~15 cm 的表层土壤 10~20 点,混合为约 1 kg 待测土样,带回实验室。土壤因子测定包括土壤 pH 值、有机质 (Soil Organic Matter, SOM)、全氮 (Total Nitrogen, TN) 等 5 个指标。其中,土壤 pH 采用酸度计法测定,有机质采用重铬酸钾-外加热法、全氮采用扩散法、全磷 (Total Phosphorus, TP) 采用 NaOH 熔融-钼锑抗显色-紫外分光光度法、全钾 (Total Potassium, TK) 采用 NaOH 熔融-火焰光度法进行测定。分析测定方法参照《土壤农化分析》(鲍士旦, 2000)。

1.4 数据处理与分析

采用 STATISTICA 8.0 进行 Pearson 相关分析,显著性水平为 $\alpha=0.05$ 。采用 PC-ORD 5.0 计算群落优势种的重要值 (importance value, IV)。重要值计算公式如下:

重要值 = (相对多度 + 相对频度 + 相对显著度) / 3;

相对频度 = (某种的频度 / 所有种的频度总和) $\times 100$; 相对多度 = (某种的个体数之和 / 所有种的个体数总和) $\times 100$; 相对显著度 = (某种的胸高断面积之和 / 所有种的胸高断面积总和) $\times 100$ 。

以重要值 ≥ 1.0 的 20 个优势树种作为研究对象,以重要值表征物种多度,建立群落优势种多度主矩阵_[32×20],并建立由地形和土壤因子组成的环境变量次矩阵数据表_[32×8]。运用 CANOCO 4.5 软件进行典范对应分析 (canonical correspondence analysis, CCA),分析植被与环境的关系,用蒙特卡罗法 (Monte Carlo) 进行显著性检验 ($\alpha=0.05$);采用前向选择法分析环境因子对群落物种分布的影响力及显著性,显著性水平为 $\alpha=0.05$ 。分析时地形因子采用实测值。

2 结果与分析

2.1 群落物种组成

在所涉及的 32 个样方中,共记录到胸径 $\geq 1.0\text{ cm}$ 、树高 $\geq 1.5\text{ m}$ 的立木 176 种,隶属于 50 科、128 属。各样地立木的胸径、个体数、丰富度以及 Shannon-Wiener 多样性指数见表 2。记录到的物种中,重要值 $IV \geq 1$ 的立木共计 20 种,分属于 17 科 20 属,优势树种组成见表 3。乔木层以蚬木占绝对优势,其重要值为 34.54,主要伴生种有金丝李、广西澄广花、苹婆、割舌树、圆叶乌桕以及鱼骨木等,乔木下层以九里香、清香木、榔榆及潺槁树等较为常见。

2.2 环境因子间的相关性

地形因子和土壤因子相关分析结果见表 4。表中显示,地形因子中的海拔与土壤有机质和全氮间呈极显著正相关 ($P<0.01$),与其他因子间的相关性未达到显著水平。除土壤 pH 外,其他土壤肥力因子间均呈极显著正相关关系,并以土壤有机质与全氮间相关系数最大,为 0.938 ($P<0.01$)。

2.3 环境因子对群落优势种分布的影响

2.3.1 环境因子与排序轴的关系 排序结果显示,前三个排序轴的特征值分别为 0.756、0.308 和 0.103,环境因子与物种前三个排序轴的相关系数分别为 0.956、0.912 和 0.911,均呈极显著相关 ($P<0.01$, 表 5)。前三轴物种—环境相关性的累计比例达 85.6%,说明排序效果理想,环境因子对群落物种分布的影响显著。

第一、第二排序轴特征值数值较大,与这两轴相

表 1 样地基本概况

Table 1 General situation of the sample plots

研究区域 Study area	地点 Site	样方数 Plot number	海拔 Elevation (m)	坡度 Slope (°)	坡向 Aspect (°)	干扰程度 Disturbing degree
大新 Daxin	硕龙镇那崖屯 Naya of Shuolong Town	3	400	40	193	较少 Less
靖西 Jingxi	邦亮黑冠长臂猿自然保护区 Bangliang Black Crested Gibbons National Nature Reserve	3	353	40	353	较少 Less
龙州 Longzhou	弄岗国家级自然保护区 Longgang National Nature Reserve	3	198	45	207	很少 Rarely
隆安 Longan	布泉乡新盏村 Xinzhan of Buquan Township	3	432	48	108	少 Little
那坡 Napo	平孟镇规叫屯 Guijiao of Pingmeng Town	7	830	25	153	较少 Less
平果 Pingguo	马头镇 Matou Town	13	332	42	115	频繁 Frequently
天等 Tiandeng	骆堪乡告屯 Gao Tun of Tuokan Township	3	429	40	75	频繁 Frequently
武鸣 Wuming	三十六弄-陇均自然保护区 Shanshiliunong-Longjun Regional Nature Reserve	3	270	35	194	频繁 Frequently

表 2 蚬木群落立木的胸径、个体数及多样性 (平均值 ± 标准误)

Table 2 DBH, number of stems and diversity indexes of standings in *Excentrodendron hsienmu* community ($\bar{x} \pm s_x$)

研究区域 Study area	胸径 DBH			个体数 No. of stems	丰富度 Richness	Shannon-Wiener 多样性指数 Shannon-Wiener index
	平均值 Mean	最小值 Minimum	最大值 Maximum			
大新 Daxin	4.9 ± 0.2	1.00	24.50	409	31	1.225
靖西 Jingxi	4.8 ± 0.3	1.00	36.40	382	25	1.818
龙州 Longzhou	5.3 ± 0.4	1.00	48.50	412	36	1.951
隆安 Longan	4.7 ± 0.3	1.00	24.50	326	26	1.957
那坡 Napo	11.7 ± 1.5	1.30	95.00	94	22	2.474
平果 Pingguo	3.6 ± 0.1	1.00	91.08	2329	101	2.597
天等 Tiandeng	7.5 ± 0.5	1.00	130.10	290	21	1.561
武鸣 Wuming	10.4 ± 0.8	1.10	36.50	125	12	0.885

关性较强的环境因子对群落优势种空间分布的影响较大。表 5 显示,8 个环境因子中,与第一排序轴的相关系数(按绝对值大小)以全钾最大(0.773)、全磷次之(0.586),坡度与第一排序轴的相关系数也达到了显著水平(-0.541);与第二排序轴的相关系数以坡向最大(0.757),其他因子与第二排序轴的相关性不显著。数据显示,土壤全钾是对调查区域蚬木群落优势种空间分布影响最为重要的肥力因子,地

形因子中的坡度、坡向对群落优势种的空间分布也具有重要影响。

2.3.2 环境因子对物种分布的影响 因第一、二排序轴的特征值大于第 3 轴,它们的累计比例达特征值总和的 78.8%,集中反映了植被—环境因子相互关系的大部分信息,本文以 CCA 第一、第二排序轴的二维排序图来分析调查区域蚬木群落优势种空间分布与环境因子的关系,结果见图1。图1显示,CCA

表 3 研究区蚬木群落优势树种
Table 3 Dominant arbor species of *Excentrodendron hsienmu* community in study area

编号 Code	物种 Species	重要值 Important value	编号 Code	物种 Species	重要值 Important value
1	蚬木 <i>Excentrodendron hsienmu</i>	34.54	11	球核荚蒾 <i>Viburnum propinquum</i>	1.46
2	广西澄广花 <i>Orophea anceps</i>	2.98	12	圆叶乌柏 <i>Sapium rotundifolium</i>	1.44
3	九里香 <i>Murraya exotica</i>	2.3	13	榔榆 <i>Ulmus parvifolia</i>	1.28
4	清香木 <i>Pistacia weinmannifolia</i>	1.77	14	岩柿 <i>Diospyros dumetorum</i>	1.27
5	金丝李 <i>Garcinia paucinervis</i>	1.71	15	榕树 <i>Ficus microcarpa</i>	1.25
6	荃花山柚 <i>Champereia manillana</i> var. <i>longistaminea</i>	1.62	16	鱼骨木 <i>Canthium dicoccum</i>	1.19
7	割舌树 <i>Walsura robusta</i>	1.62	17	潺槁树 <i>Litsea glutinosa</i>	1.16
8	苹婆 <i>Sterculia nobilis</i>	1.6	18	赤楠 <i>Syzygium buxifolium</i>	1.11
9	岩樟 <i>Cinnamomum saxatile</i>	1.48	19	海金子 <i>Pittosporum illicioides</i>	1.07
10	南酸枣 <i>Choerospondias axillaris</i>	1.47	20	龙眼 <i>Dimocarpus longan</i>	1.06

表 4 环境因子间的相关系数
Table 4 Correlation coefficients among environmental factors

	海拔 Elevation	坡度 Slope	坡向 Aspect	土壤 pH	土壤有机质 SOM	全氮 TN	全磷 TP	全钾 TK
海拔 Elevation	1.000							
坡度 Slope	-0.216	1.000						
坡位 Aspect	-0.143	-0.021	1.000					
土壤 pH	-0.185	-0.099	0.235	1.000				
土壤有机质 SOM	0.545 **	-0.140	-0.125	0.043	1.000			
全氮 TN	0.649 **	-0.263	-0.121	-0.059	0.938 **	1.000		
全磷 TP	0.110	-0.199	-0.148	-0.173	0.560 **	0.649 **	1.000	
全钾 TK	-0.132	-0.107	0.051	0.121	0.323	0.283	0.575 **	1.000

注：* $P<0.05$, ** $P<0.01$ 。下同。
Note: * $P<0.05$, ** $P<0.01$. The same below.

第一排序轴从左到右主要表示坡度逐渐减小,土壤全钾、全磷含量逐渐增加的趋势。金丝李和蚬木一般分布于坡度较大、土壤全钾和全磷含量相对贫瘠的地段,南酸枣和小叶榕则主要分布于坡度平缓、土壤全钾和全磷含量相对丰富的地段。CCA 第二排序轴从下至上,主要表示坡向从阳坡(南坡)向阴坡(北坡)的变化趋势。图 1 显示,除岩樟主要分布于阴坡之外,其余优势种趋向分布于向阳坡面。

2.3.3 环境因子的解释力度 前向选择分析结果如表 6 所示。表中显示,环境因子对群落优势树种分布的解释力度顺序为全钾>全磷>坡向>坡度>土壤 pH>土壤有机质>海拔>全氮,结果与 CCA 分析基本

一致。其中,全钾、全磷、坡向三者的影响均达极显著水平($P<0.01$),坡度的影响达显著水平($P<0.05$),其余 4 个因子对优势种分布格局的影响均不显著。土壤肥力对蚬木群落优势种分布格局的影响大于地形因子。

3 讨论与结论

地形是影响着小尺度上土壤养分空间分布的重要因子。本研究相关分析发现海拔与土壤有机质、全氮间均呈极显著正相关;张忠华等(2011)对茂兰喀斯特森林的研究也显示土壤有机质与海拔呈显著

表 5 环境因子与 CCA 排序轴间的相关系数、特征值和累积贡献率

Table 5 Correlation coefficients of environmental factors with CCA ordination axes, eigenvalues and cumulative percentages of variance explained from CCA ordinations

参数 Parameter	第一排序轴 AX1	第二排序轴 AX2	第三排序轴 AX3
海拔 Elevation	-0.127	-0.040	0.057
坡度 Slope	-0.541 * *	0.004	0.156
坡向 Aspect	-0.318	0.757 * *	-0.004
土壤 pH	-0.247	0.266	-0.474
土壤有机质 SOM	-0.027	-0.055	0.450
全氮 TN	0.027	-0.024	0.302
全磷 TP	0.586 * *	0.063	0.497
全钾 TK	0.773 * *	0.286	0.368
特征值 Eigenvalue	0.756	0.308	0.103
物种-环境相关性 Species-environmental correlation	0.956	0.912	0.911
累积贡献率 Cumulative percentages of variance (%)	55.5	78	85.6

表 6 CCA 分析中环境因子的前向选择

Table 6 Forward selection of environmental factors in CCA analysis

参数 Parameter	解释力度 Explanatory power	P 值 P value
全钾 TK	9.636	0.002
全磷 TP	5.164	0.002
坡向 Aspect	4.656	0.002
坡度 Slope	3.989	0.024
土壤 pH	2.034	0.072
土壤有机质 SOM	0.822	0.348
海拔 Elevation	0.682	0.382
全氮 TN	0.616	0.47

正相关关系。然而,陈晓琳等(2011)发现中亚热带红壤丘陵区松林生态系统表层土壤活性有机碳与海拔间呈显著负相关关系;李孝良等(2010)的研究也表明喀斯特山地有机质含量以山坡中下部最高,山顶最低。喀斯特山地土壤有机质的海拔或坡位差异

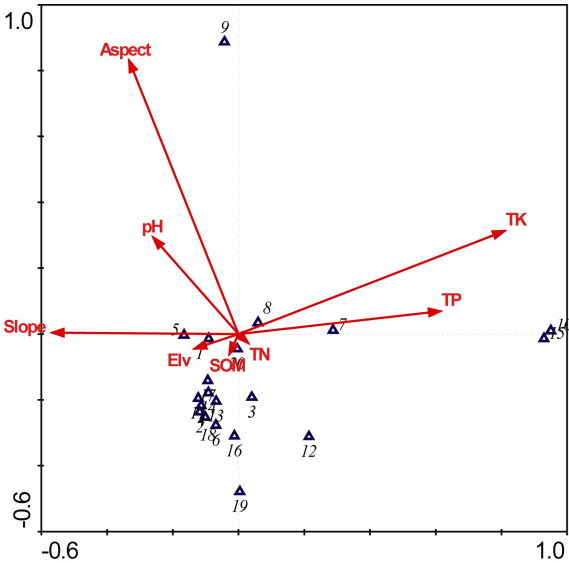


图 1 蚬木群落优势树种与环境因子的典范对应分析排序
图中序号所代表物种见表 3。

Fig. 1 CCA ordination of dominant arbor species of *E. hsienm* community in relation to environmental factors Species codes are the same in Table 3.

与人为干扰程度的大小有着重要关系,在没有人干扰的坡地存在养分的“洼积效应”,但在人为干扰较强的地段存在上坡高于下坡位的“倒置”现象(刘淑娟等,2011)。本研究部分调查样方分布于海拔较低的中下坡位,受人为干扰较强,造成土壤有机质大量分解与流失;分布于海拔较高的上坡位样方受干扰较少,土壤有机质有所积累。

土壤是植物的生存基质,地形是造成土壤环境异质性的主要因子之一,两者共同决定着群落尺度上物种的组成与分布(Chahouki et al, 2012; 余敏等, 2013; Siddiqui et al, 2014)。如龙成等(2016)的研究发现,在海南热带常绿季雨林,土壤温度、坡度及坡位对物种多样性和周转率限制显著; Gholinejad et al(2012)对伊朗 Kamyaran 半干旱牧场的研究则显示土壤结构、氮含量、坡度及海拔是影响研究区域植物群落分布的最有效因子。喀斯特陡峭的峰丛地貌导致土壤资源分布不均,影响着植物的空间格局。研究区域土壤全钾、全磷是影响植物群落物种分布的主要环境因子,坡向和坡度也具有重要作用。张忠华等(2011)发现土壤全钾、全镁等养分的空间异质性显著影响着茂兰喀斯特森林的树种组成与分布;欧芷阳等(2014)的研究表明土壤全氮、碱解氮含量及坡度变化对桂西南喀斯特森林的

群落分布影响最为显著;宋同清等(2010)的研究显示坡向、岩石裸露率、有机质等在桂西北木论喀斯特森林群落分布格局中起着主导作用。然而,Zhang et al(2013)研究显示,在岩石大量裸露的陡坡,海拔显著影响着植物分布;而在土层相对较厚的缓坡,土壤养分在植物的空间分布中扮演着重要角色。研究结果的差异表明,在喀斯特山地土壤钾、磷素相对缺乏的区域,这两种元素可能是限制植物群落种类组成和分布的主要因子。地形因子中,海拔是控制地表水、热资源空间分配的主要因子,对山地植物种类空间格局起着主导作用。但在海拔梯度较小的山地,坡向从水平方向上影响着局部微生境的小气候,坡度、坡位从垂直方向上影响着土壤水分、养分流向及土层厚度,它们对植物分布的解释力度比海拔强。桂西南岩溶区海拔高差不大,坡向、坡度甚至坡位是导致本区域植物群落特征产生差异的重要间接环境因子。

喀斯特生态系统脆弱,部分地段因植被退化、水土流失形成石漠化景观,严重影响着区域生态安全。广西喀斯特山地石漠化现象相当普遍,制约着地方经济社会的发展(卢峰,2012),进行植被恢复是区域生态重建的重中之重。在本区域进行退化植被的生态修复时,可根据植物分布特点及生境差异,选择适合的乡土树种进行合理配置。

参考文献:

- BAO SD, 2000. The agro-chemical analysis of soil [M]. Beijing: China Agriculture Press. [鲍士旦, 2000. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社.]
- CHAHOUKI MAZ, KHOJASTEH F, TAVILI A, 2012. Distribution of vegetation type according to edaphic properties and topography in Iran [J]. Pol J Environ Stud, 21(4):1071-1077.
- CHEN XL, LI ZW, WANG XY, et al, 2011. Spatial distribution of topsoil labile organic carbon of *Pinus elliottii* ecosystem in the central subtropical region [J]. Geographical Res, 30(10): 1825-1834. [陈晓琳, 李忠武, 王晓燕, 等, 2011. 中亚热带红壤丘陵区松林生态系统表层土壤活性有机碳空间分异规律 [J]. 地理研究, (30)10:1825-1834.]
- DAI Y, XUE YG, 2008. Population structure of endangered species *Camellia terminalis* [J]. Chin J Ecol, 27(1):1-7. [戴月, 薛跃规, 2008. 濒危植物顶生金花茶的种群结构 [J]. 生态学杂志, 27(1):1-7.]
- ENGLER R, RANDIN CF, VITTOZ P, et al, 2009. Predicting future distributions of mountain plants under climate change: does dispersal capacity matter? [J] Ecography, 32: 34-45.
- GHOLINEJAD B, FARAJOLLAHI A, POUZESH H, 2012. Environmental factors affecting on distribution of plant communities in semiarid area (Case study: Kamyaran rangelands, Iran) [J]. Ann Biol Res, 3(8): 3990-3993.
- GUO YL, WANG B, XIANG WS, et al, 2015. Sprouting characteristics of tree species in 15 hm² plot of northern tropical karst seasonal rain forest in Nonggang, Guangxi, southern China [J]. Chin J Ecol, 34(4): 955-961. [郭屹立, 王斌, 向悟生, 丁涛, 等, 2015. 弄岗北热带喀斯特季节性雨林 15 hm² 样地木本植物萌生特征 [J]. 生态学杂志, 34(4): 955-961.]
- GUO YL, WANG B, XIANG WS, et al, 2016. Responses of spatial pattern of woody plants' basal area to topographic factors in a tropical karst seasonal rainforest in Nonggang, Guangxi, southern China [J]. Biodivers Sci, 24(1): 30-39. [郭屹立, 王斌, 向悟生, 等, 2016. 喀斯特季节性雨林木本植物胸高断面积分布格局及其对地形因子的响应 [J]. 生物多样性, 24(1): 30-39.]
- LI XL, CHEN XM, ZHOU LC, et al, 2010. Study on soil organic carbon fractions and their influential factors in rocky desertification process in southwest of China [J]. J Mount Sci, 28(1): 56-62. [李孝良, 陈效民, 周炼川, 等, 2010. 西南喀斯特石漠化过程中土壤有机质组分及其影响因素 [J]. 山地学报, 28(1): 56-62.]
- LIU SJ, ZHANG W, WANG KL, et al, 2011. Spatiotemporal heterogeneity of topsoil nutrients in Karst Peak-Cluster depression area of Northwest Guangxi, China [J]. Acta Ecol Sin, 31(11): 3036-3043. [刘淑娟, 张伟, 王克林, 等, 2011. 桂西北喀斯特峰丛洼地表层土壤养分时空分异特征 [J]. 生态学报, (31) 11: 3036-3043.]
- LIU YG, LIU CC, WEI YF, et al, 2011. Species composition and community structure at different vegetation successional stages in Puding, Guizhou Province, China [J]. Chin J Plant Ecol, 35(10): 1009-1018. [刘玉国, 刘长成, 魏雅芬, 等, 2011. 贵州普定县不同植被演替阶段的物种组成与群落结构特征 [J]. 植物生态学报, 35(10): 1009-1018.]
- LIU HF, SANG WG, XUE DY, 2013. Topographical habitat variability of dominant species populations in a warm temperate forest [J]. Chin J Ecol, 32(4): 795-801. [刘海丰, 桑卫国, 薛达元, 2013. 暖温带森林优势种群的地形生境变异性 [J]. 生态学杂志, 32(4): 795-801.]
- LIU Z, LI Q, CHEN DD, et al, 2015. Patterns of plant species diversity along an altitudinal gradient and its effect on above-ground biomass in alpine meadows in Qinghai-Tibet Plateau [J]. Biod Sci, 23(4): 451-462. [刘哲, 李奇, 陈懂懂, 等, 2015. 青藏高原高寒草甸物种多样性的海拔梯度分布格局及对地上生物量的影响 [J]. 生物多样性, 23(4): 451-462.]
- LONG C, WU TT, YANG XB, et al, 2016. Effects of environmental factors on plant diversity during succession processes of tropical secondary forest [J]. J NE For Univ, 44(1): 37-43. [龙成, 吴庭天, 杨小波, 等, 2016. 热带次生林演替过程中环境因子对物种多样性的影响 [J]. 东北林业大学学报, 44(1): 37-43.]
- LU F, 2012. Analysis on karst land status and rocky desertification control model in Guangxi [J]. Guangxi For Sci, 41(2): 183-185. [卢峰, 2012. 广西岩溶土地现状与石漠化治理模式探析 [J]. 广西林业科学, 41(2): 183-185.]
- LU JY, ZHU QK, CHEN WS, et al, 2016. Response of vegetation characteristics to slope micro-topography in loess area of north Shaanxi Province [J]. Sci Soil Water Conser, 14(1): 53-60. [卢纪元, 朱清科, 陈文思, 等, 2016. 陕北黄土区植被特征对坡面微地形的影响 [J]. 中国水土保持科学, 14(1): 53-60.]
- OU ZY, SU ZY, PENG YH, et al, 2013a. Natural regeneration of

- young *Excentrodendron hsienmu* in karst mountainous region in Southwest Guangxi, China [J]. *Chin J Appl Ecol*, 24(9): 2440–2446. [欧芷阳, 苏志尧, 彭玉华, 等, 2013a. 桂西南喀斯特山地蚬木幼龄植株的天然更新 [J]. *应用生态学报*, 24(9): 2440–2446.]
- OU ZY, ZHU JY, CAO YY, et al, 2013b. Coupling relationships between woody plants in *Excentrodendron hsienmu* community and related edaphic and topographic factors [J]. *Chin J Ecol*, 32(12): 3182–3189. [欧芷阳, 朱积余, 曹艳云, 等, 2013b. 蚬木生存群落木本植物与土壤和地形因子的耦合关系 [J]. *生态学杂志*, 32(12): 3182–3189.]
- OU ZY, SU ZY, YUAN TX, et al, 2014. Effect of soil fertility and topographic factors on woody plant communities in the karst mountains of Southwest Guangxi, China [J]. *Acta Ecol Sin*, 34(13): 3672–3681. [欧芷阳, 苏志尧, 袁铁象, 等, 2014. 土壤肥力及地形因子对桂西南喀斯特山地木本植物群落的影响 [J]. *生态学报*, 34(13): 3672–3681.]
- PENG WX, SONG TQ, ZENG FP, et al, 2010. The coupling relationships between vegetation, soil, and topography factors in karst mixed evergreen and deciduous broadleaf forest [J]. *Acta Ecol Sin*, 30(13): 3472–3481. [彭晚霞, 宋同清, 曾馥平, 等, 2010. 喀斯特常绿阔叶阔叶混交林植物与土壤地形因子的耦合关系 [J]. *生态学报*, 30(13): 3472–3481.]
- SHAO FL, YU XX, ZHENG JK, et al, 2012. Relationships between dominant arbor species distribution and environmental factors of shelter forests in the Beijing mountain area [J]. *Acta Ecol Sin*, 32(19): 6092–6099. [邵方丽, 余新晓, 郑江坤, 等, 2012. 北京山区防护林优势树种分布与环境的关系 [J]. *生态学报*, 32(19): 6092–6099.]
- SIDDIQUI MF, SHAUKAT SS, HAMED M, 2014. Topographic and edaphic control of arboreal vegetation and the distribution and growth of tree species in moist temperate areas of Himalayan and Hindukush regions of Pakistan [J]. *Pak J Bot*, 46(4): 1187–1196.
- SONG X, LI D, KOU C, et al, 2011. Soil nutrient distribution and its relations with topography in Huangshui River drainage basin [J]. *Chin J Appl Ecol*, 22(12): 3163–3168. [宋轩, 李立东, 寇长林, 等, 2011. 黄水河小流域土壤养分分布及其与地形的关系 [J]. *应用生态学报*, 22(12): 3163–3168.]
- SU ZM, LI XK, DING T, et al, 2014. The vegetation of Guangxi [M]. Beijing: China Forestry Publishing House. [苏宗明, 李先琨, 丁涛, 等, 2014. 广西植被 [M]. 北京: 中国林业出版社.]
- TANG Y, MAO LH, GAO H, 2005. Over-exploitation and lack of protection is leading to a decline of a protected calcicolous tree species *Excentrodendron hsienmu* (Tiliaceae) in China [J]. *Biol Conserv*, 126(1): 14–23.
- WANG L, MU Y, ZHANG QF, et al, 2012. Effects of vegetation restoration on soil physical properties in the wind-water erosion region of the northern loess plateau of China [J]. *Clean-Soil Air Water*, 40(1): 7–15.
- WANG ZY, ZUO CQ, CAO WH, et al, 2011. Physical and chemical properties of soils under different vegetation restoration models in red soil hilly region [J]. *Acta Pedol Sin*, 48(4): 715–724. [王昭艳, 左长清, 曹文洪, 等, 2011. 红壤丘陵区不同植被恢复模式土壤理化性质相关分析 [J]. *土壤学报*, 48(4): 715–724.]
- WEI Q, LING L, CHAI CH, et al, 2012. Soil physical and chemical properties in forest succession process in Xingling Mountain of Gansu [J]. *Acta Ecol Sin*, 32(15): 4700–4713. [魏强, 凌雷, 柴春山, 等, 2012. 甘肃兴隆山森林演替过程中的土壤理化性质 [J]. *生态学报*, 32(15): 4700–4713.]
- XIANG WS, WANG B, DING T, et al, 2013a. Age structure and quantitative dynamics of *Excentrodendron hsienmu* population in a karst seasonal rain forest in South China [J]. *Chin J Ecol*, 32(4): 825–831. [向悟生, 王斌, 丁涛, 等, 2013a. 喀斯特季节性雨林蚬木种群结构和数量动态 [J]. *生态学杂志*, 32(4): 825–831.]
- XIANG WS, NONG CG, WANG B, et al, 2013b. Growth models of *Excentrodendron hsienmu* population in a karst seasonal rain forest [J]. *Guihaia*, 33(3): 285–290. [向悟生, 农重刚, 王斌, 等, 2013b. 喀斯特季节性雨林蚬木种群的增长模型 [J]. *广西植物*, 33(3): 285–290.]
- XIE YB, MA Z, YANG QS, et al, 2012. Coexistence mechanisms of evergreen and deciduous trees based on topographic factors in Tiantong region, Zhejiang Province, eastern China [J]. *Biod Sci*, 20(2): 159–167. [谢玉彬, 马遵平, 杨庆松, 等, 2012. 基于地形因子的天童地区常绿树种和落叶树种共存机制研究 [J]. *生物多样性*, 20(2): 159–167.]
- YU MH, SUN BP, 2012. Environmental effect of returning farmland to forest and its ecological value estimation in Pingguo County, Guangxi Zhuang Autonomous Region [J]. *Acta Agric Zhejiang*, 24(1): 114–119. [于明含, 孙保平, 2012. 广西平果县退耕还林土壤环境效应及生态效益价值估算 [J]. *浙江农业学报*, 24(1): 114–119.]
- YU M, ZHOU ZY, KANG FF, et al, 2013. Gradient analysis and environmental interpretation of understory herb-layer communities in Xiaoshengou of Lingkong Mountain, Shanxi, China [J]. *Chin J Plant Ecol*, 37(5): 373–383. [余敏, 周志勇, 康峰峰, 等, 2013. 山西灵空山小蛇沟林下草本层植物群落梯度分析及环境解释 [J]. *植物生态学报*, 37(5): 373–383.]
- ZHANG CS, XIE GD, BAO WK, et al, 2012. Effects of topographic factors on the plant species richness and distribution pattern of alpine meadow in source region of Lancang River, Southwest China [J]. *Chin J Ecol*, 31(11): 2767–2774. [张昌顺, 谢高地, 包维楷, 等, 2012. 地形对澜沧江源区高寒草甸植物丰富度及其分布格局的影响 [J]. *生态学杂志*, 31(11): 2767–2774.]
- ZHANG N, WANG XH, ZHENG ZM, et al, 2012. Spatial heterogeneity of soil properties and its relationships with terrain factors in broadleaved forest in Tiantong of Zhejiang Province, East China [J]. *Chin J Appl Ecol*, 23(9): 2361–2369. [张娜, 王希华, 郑泽梅, 等, 2012. 浙江天童常绿阔叶林土壤的空间异质性及其与地形的关系 [J]. *应用生态学报*, 23(9): 2361–2369.]
- ZHANG ZH, HU G, ZHU JD, et al, 2011. Spatial heterogeneity of soil nutrients and its impact on tree species distribution in a karst forest of Southwest China [J]. *Chin J Plant Ecol*, 35(10): 1038–1049. [张忠华, 胡刚, 祝介东, 等, 2011. 喀斯特森林土壤养分的空间异质性及其对树种分布的影响 [J]. *植物生态学报*, 35(10): 1038–1049.]
- ZHANG ZH, HU G, NI J, 2013. Effects of topographical and edaphic factors on the distribution of plant communities in two subtropical karst forests, Southwestern China [J]. *J Mt Sci*, 10: 95–104.
- ZARE S, JAFARI M, TAVILI A, et al, 2011. Relationship between environmental factors and plant distribution in arid and semiarid area (case study: Shahriyar Rangelands, Iran) [J]. *Am Eur J Agric & Environ Sci*, 10(1): 97–105.