

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

王莉莉^{1,2}, 张喜^{2*}

(1. 贵州大学林学院, 贵阳 550025; 2. 贵州省林业科学研究院, 贵阳 550011)

摘要: 为探讨自然恢复过程中喀斯特森林土壤有机质含量(SOM)与土壤理化指标及植物多样性指数的相关性,对贵州省茂兰国家级自然保护区中不同森林类型的 SOM、土壤理化性质和植物多样性进行了研究。根据乔木层物种的重要值,将保护区的 41 个调查样地划分为香叶树-枫香林、榿木-马尾松林、槭树-朴树林、小叶栎树-化香林、灯台-小花楸木林和四照花-青冈栎林类型。结果表明,部分森林类型土壤 A 层或 B 层的 SOM 差异显著,且部分森林类型的植物种数、直径、高度和密度,以及 Margalef 指数、Simpson 指数、Shannon-Wiener 指数和 Pielou 指数也差异显著。土壤孔隙度、蓄水量和主要肥力与养分指标随 SOM 增加而增大。乔木层的植物多样性指数与 SOM 呈正相关,与土壤 A 层 SOM 相关显著、Simpson 指数和 Pielou 指数与土壤 B 层 SOM 相关显著。灌木层、草本层的植物多样性指数与 SOM 相关不显著。多元分析结果表明,植物多样性指数对土壤 A 层 SOM 的总贡献率呈灌木层 > 乔木层 > 草本层,对土壤 B 层 SOM 的总贡献率呈草本层 > 乔木层 > 灌木层的趋势,表明喀斯特地区 SOM 管理的植物多样性措施适宜以乔木树种为主、辅以灌木与草本层植物的复合经营方式。同时,土壤 SOM 不仅受乔木层植物多样性指数的影响,也受林分所处演替阶段与结构指标的影响,植物多样性指数的二次多项式拐点可成为喀斯特石漠化治理工程中物种量化管理的参考依据之一。

关键词: 茂兰自然保护区; 植物多样性; 土壤有机质; 理化性质

doi: 10.3969/j.issn.1005-3395.2014.05.007

Effect of Soil Organic Matter Content on Soil Physical and Chemical Indexes and Plant Diversity Indexes of Nature Secondary Karst Forest in Southern Guizhou Province, China

WANG Li-li^{1,2}, ZHANG Xi²

(1. College of Forestry, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. Guizhou Academy of Forestry, Guiyang 550011, China)

Abstract: In order to understand the correlation between soil organic content (SOM) and soil physical and chemical indicators and plant diversity indexes in nature recovery process of karst forest, the SOM, soil physical and chemical characters and plant diversity indexes of different forest types in Maolan National Nature Reserve of southern Guizhou Province were studied. According to importance values of species in tree layer, 41 surveying plots in the Reserve were divided into 6 types, such as *Lindera communis*-*Liquidambar formosana* forest, *Loropetalum chinense*-*Pinus massoniana* forest, *Acer* sp.-*Celtis tetrandra* subsp. *sinensis* forest, *Koelreuteria minor*-*Platycarya strobilacea* forest, *Cornus controversa*-*C. parviflora* forest and *Dendrobenthamia japonica* var. *chinensis*-*Cyclobalanopsis glauca* forest. The results showed that SOM had significant difference between A or

收稿日期: 2013-08-27 接受日期: 2014-02-28

基金项目: 林业公益性专项(201104002); 贵州省科技厅项目(TZJF2008-17, 2009-2083, 2010-05)资助

作者简介: 王莉莉(1984~),女,硕士研究生,主要研究方向为森林培育。E-mail: 412245938@qq.com。

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

B stratum of soil among forest types, and the species number, diameter, height and density, as well as Margalef index, Simpson index, Shannon-Wiener index and Pielou index of different forest types also had difference significance. The soil porosity, water storage capacity and main fertility indexes increased with SOM increment. Plant diversity indexes of tree layer had positive relationship with SOM, especially significant correlation with SOM in A stratum of soil, and Simpson index and Pielou index with significant correlation to SOM in B stratum of soil, while those in shrub layer and herb layer had no significant correlation with SOM. Multivariate analysis showed that total contribution rate of plant diversity indexes to SOM in A stratum of soil was in the order of shrub layer > tree layer > herb layer, and that to SOM in B stratum of soil was herb layer > tree layer > shrub layer. It was suggested that plant diversity measures of SOM management of vegetation restoration in karst region were suitable for giving priority to with tree species, and combining with shrub and herb species. Meanwhile, the SOM was influenced not only by plant diversity indexes of tree layer, but also by succession stage and structure indexes of forest, the Quadratic polynomial turning point of plant diversity indexes could become to one of reference bases of species quantitative management in karst rocky desertification control engineering.

Key words: Maolan National Nature Reserve; Plant diversity; SOM; Physical and chemical character

植被-土壤系统中,土壤有机质(Soil organic matter, SOM)主要来源于植物凋落物、死亡的植株残体与根系、动物残体及排泄物以及微生物残体及分泌物,是土壤中普遍存在,非常活跃的组分。土壤有机质长期以来被认为是土壤肥力的标志物质,同土壤主要理化指标相互作用、相互影响,成为影响植被生物量与植物多样性的重要因素之一。对人工杉木纯林和混交林^[1]、不同恢复阶段的人工沙棘林^[2],以及人工树木与草种混作试验林^[3-4]的研究表明,SOM及其组分随物种丰富度的增加而升高。在自然恢复过程中的弃耕坡地^[5]、常绿阔叶林^[6]和喀斯特森林^[7]中部分植物多样性指数和SOM的相关性显著。目前的研究报道主要是SOM与植被中单一层片、单一植物多样性指数的相关性结论,可比性和系统性较差,不能反映SOM和植物多样性指数间的复杂关系、也缺少SOM和土壤理化指标的相关性分析,SOM和土壤理化指标及植物多样性指数的关系仍然存在许多疑惑。本文对自然恢复过程中喀斯特森林的SOM和土壤理化指标及植物多样性的相关性及其演化规律进行研究,可为喀斯特石漠化治理工程中的物种配置与SOM管理提供科学依据。

1 研究区概况

实验研究在贵州喀斯特森林生态站(CFERN)茂兰试验区进行。茂兰国家级自然保护区位于贵州省南部和广西北部交界处,地理位置

为25°09'~25°20' N、107°52'~108°05' E,海拔为430~1078.6 m,一般在800 m左右。成土母岩以中下石炭纪白云岩及石灰岩为主,为典型的喀斯特峰丛地貌,土壤以黑色石灰土为主,土层浅薄,岩石裸露率高。属中亚热带山地季风湿润气候,年均温为15.3℃,7月均温为26.4℃,1月均温为8.3℃,≥10℃的年积温达5727.9℃,年均降雨量为1320.5 mm,年均相对湿度为83%^[8]。

2 材料和方法

2.1 调查方法

沿保护区的核心区、缓冲区、试验区及外缘区建立调查线路,依据变化的森林景观类型设置调查样地41个。

样地调查于夏季1个月内完成,采用常规的群落学方法。每个样地面积20 m×20 m,其中乔木幼苗的DBH≥5 cm归为乔木、<5 cm归为灌木。每个样地分别对乔、灌、草3层植物进行样方调查,乔木层样方面积为10 m×10 m,记载样方中每木的物种名、胸径和高度;灌木层样方为5 m×5 m,记载样方中的物种名、株数、平均地径和高度;草本层样方面积为1 m×1 m,记载物种名、株数和平均高度。每个样地中分别设3个灌木层与草本层样方,分别代表生长较好、一般和较差的灌木层与草本层植物类型。

在样地中3个灌木层与草本层样方内挖取土壤剖面,按土壤自然发生层划分为A与B层,各层

等量提取土样约 1 kg, 带回室内分析土壤主要化学指标; 在土壤剖面的 A 与 B 层提取土壤环刀, 带回室内分析土壤主要物理指标。同时, 调查剖面的土层厚度、石砾量、根量等常规指标。土壤主要理化指标分析参照《森林土壤分析方法》^[9]中的方法。

2.2 数据分析和处理

森林类型划分 以样地乔木层物种的重要值作为森林类型的划分指标。

乔木层物种重要值 $IV=(RD+RP+RF)/3$

其中, 相对密度(RD)、相对显著度(RP)和相对频度(RF)的计算参照《数量生态学》^[10]的方法。

植物多样性分析 选用物种丰富度 Margalef 指数、生态优势度 Simpson 指数、信息多样性 Shannon-Wiener 指数和均匀度 Pielou 指数进行分析^[10]。

$$\text{Margalef 指数 } Ma = \frac{S-1}{\ln N} \quad (1)$$

$$\text{Simpson 指数 } D = 1 - \frac{\sum_{i=1}^s N_i(N_i-1)}{N(N-1)} \quad (2)$$

$$\text{Shannon-Wiener 指数 } H = -\sum_{i=1}^s P_i \ln P_i \quad (3)$$

式中 $P_i = N_i/N$

$$\text{Pielou 指数 } J = \frac{H}{\ln S} \quad (4)$$

其中, S 为样方中的物种数量, N 为样方所有物种的总株数, N_i 是第 i 物种的个体数, P_i 为第 i 物种的株数占总株数的比例。

数据的统计分析采用 SPSS 17.0^[11]和 Excel 2003 软件进行。

3 结果和分析

3.1 森林类型划分及林分结构

调查结果表明, 研究区内主要以喀斯特常绿落叶阔叶混交林^[12]为主。调查样地中有乔木植物 251 种, 隶属 131 属 66 科; 灌木植物 373 种, 隶属 188 属 93 科; 草本植物 163 种, 隶属 91 属 56 科。应用乔木层物种重要值和层次聚类法^[11], 将调查样地划分为 6 个森林类型, 每种类型的样地数量为 3~12 个(表 1)。其中类型 A 为槭树(*Acer* sp.)-朴树(*Celtis tetrandra* ssp. *sinensis*)林, 包括掌叶木(*Handeliodendron bodinieri*)、榉木(*Zelkora schneideriana*)、伞花木(*Eurycorymbus cavaleriei*)、

楠木(*Phoebe zhennan*)和圆果罗伞(*Ardisia depressa*)等; 类型 B 为小叶栎树(*Koelreuteria minor*)-化香(*Platycarya strobilacea*)林, 包括石楠(*Photinia* sp.)、水丝梨(*Sycopsis dunnii*)、鹅耳枥(*Carpinus* sp.)、山茶(*Camellia* sp.)和藤山柳(*Clematoclethra scandens*)等; 类型 C 为四照花(*Dendrobenthamia japonica* var. *chinensis*)-青冈栎(*Cyclobalanopsis glauca*)林, 包括樟树(*Cinnamomum* sp.)、圆果化香(*Platycarya longipes*)、润楠(*Machilus* sp.)、卫矛(*Euonymus alatus*)和黄棉木(*Metadina trichotoma*)等; 类型 D 为灯台(*Cornus controversa*)-小花株木(*Cornus parviflora*)林, 包括漆树(*Toxicodendron vericifluum*)、梅(*Prunus* sp.)、荚蒾(*Viburnum dilatatum*)、皂角(*Aeschynomene indica*)和柿树(*Diospyros kaki*)等; 类型 E 为香叶树(*Lindera communis*)-枫香(*Liquidambar formosana*)林, 包括香椿(*Toona sinensis*)、黄果厚壳桂(*Cryptocarya concinna*)、小叶朴(*Celtis bungeana*)、黄连(*Coptis chinensis*)和八角枫(*Alangium chinense*)等; 类型 F 为榿木(*Loropetalum chinense*)-马尾松(*Pinus massoniana*)林, 包括青冈栎、榿木石楠(*Photinia davidsoniae*)、川钓樟(*L. pulcherima* var. *hemsleyana*)、小叶虎皮楠(*Daphniphyllum salicifolium*)和齿叶黄皮(*Clausena dunniana*)等。

不同森林类型的物种组成不同, 林分结构指标也有较大差异。乔木层植物密度为 1233~1469 ind. hm⁻², 类型间的差异不显著, 灌木层和草本层的分别为 7200~14038 ind. hm⁻²、84444~368519 ind. hm⁻², 部分类型间的差异显著。乔木层植物的胸径与灌木层植物的地径分别为 10.04~11.58 cm、0.79~1.28 cm, 部分类型间的差异显著。乔木层、灌木层与草本层植物的高度分别为 7.13~8.57 m、1.18~1.72 m、0.06~0.34 m, 乔木层、灌木层与草本层的物种数分别为 11~23 种、18~37 种、7~14 种, 部分类型间的差异显著。不同森林类型中, 植物的平均密度为草本层 > 灌木层 > 乔木层, 平均高度为乔木层 > 灌木层 > 草本层, 物种数量为灌木层 > 乔木层 > 草本层, 平均直径为乔木层 > 灌木层。

3.2 植物多样性指数

从表 2 可看出, 植物多样性指数在不同森林类型的相同层片间差异显著性不同。乔木层的 Margalef 指数、Simpson 指数、Pielou 指数和 Shannon-Wiener 指数分别为 2.52~5.44、0.65~0.94、

表 1 不同森林类型的主要林分结构指标

Table 1 Stand structure indexes in different forest types

	森林类型 Forest type						
	A	B	C	D	E	F	
样地数量 Number of plots	3	12	7	9	6	4	
乔木层 Tree layer	密度 Density ($\times 10^3$ ind. hm^{-2})	1.24	1.23	1.30	1.37	1.30	1.47
	胸径 DBH (cm)	11.58	11.46 ^F	11.22	10.92	10.1	10.04 ^B
	高度 Height (m)	8.48	8.06 ^{DF}	8.35 ^F	8.57 ^{BF}	7.83	7.13 ^{BCD}
	种数 Number of species	19 ^E	17 ^{CE}	23 ^{BDEF}	17 ^{CE}	11 ^{ABCDF}	16 ^{CE}
灌木层 Shrub layer	密度 Density ($\times 10^4$ ind. hm^{-2})	1.05	0.89 ^{CF}	1.40 ^{BDE}	0.72 ^{CF}	0.86 ^{CF}	1.40 ^{BDE}
	地径 Diameter at base (cm)	1.26 ^F	1.26 ^{CF}	0.89 ^{BD}	1.28 ^{CF}	1.23 ^F	0.79 ^{ABDE}
	高度 Height (m)	1.57	1.47 ^C	1.18 ^{BD}	1.72 ^C	1.60	1.47
	种数 Number of species	21 ^C	22 ^{CDF}	31 ^{ABDE}	18 ^{BCF}	18 ^{CF}	37 ^{BDE}
草本层 Herb layer	密度 Density ($\times 10^5$ ind. hm^{-2})	0.84 ^{DEF}	1.33 ^{DEF}	1.54 ^{DEF}	3.69 ^{ABC}	3.51 ^{ABC}	3.18 ^{ABC}
	高度 Height (m)	0.34 ^{BCDEF}	0.14 ^{AE}	0.13 ^{AE}	0.14 ^{AE}	0.06 ^{ABCDF}	0.17 ^{AE}
	种数 Number of species	7 ^{DE}	7 ^{CDE}	9 ^{BDEF}	14 ^{ABCEF}	12 ^{ABCDF}	7 ^{CDE}

数据右上角的字母是相应的森林类型代码,表示差异显著(*t*-检验)的森林类型。下表同。

Letter in the top right corner of data is forest type code, indicate significant difference among forest types by *t*-test. The same is following Tables.

表 2 不同森林类型的植物多样性指数

Table 2 Plant diversity in different forest types

		森林类型 Forest type					
		A	B	C	D	E	F
乔木层 Tree layer	<i>Ma</i>	4.99 ^E	4.14 ^{CE}	5.44 ^{BDEF}	4.03 ^{CE}	2.51 ^{ABCDF}	3.56 ^{CE}
	<i>D</i>	0.87 ^E	0.90 ^{CDEF}	0.94 ^{BDEF}	0.84 ^{BCE}	0.65 ^{ABCDF}	0.81 ^{BCE}
	<i>J</i>	0.90 ^E	0.92 ^{DEF}	0.93 ^{DEF}	0.88 ^{BCE}	0.74 ^{ABCDF}	0.84 ^{BCE}
	<i>H</i>	2.68 ^E	2.57 ^{CEF}	2.87 ^{BDEF}	2.44 ^{CE}	1.72 ^{ABCDF}	2.29 ^{BCE}
灌木层 Shrub layer	<i>Ma</i>	4.64 ^C	4.97 ^{CEF}	6.62 ^{ABDE}	4.44 ^{CF}	4.06 ^{BCF}	7.73 ^{BCE}
	<i>D</i>	0.82	0.88	0.89	0.89 ^E	0.84 ^{DF}	0.91 ^E
	<i>J</i>	0.91	0.93	0.92	0.93 ^E	0.90 ^D	0.92
	<i>H</i>	2.76 ^C	2.78 ^{CF}	3.14 ^{ABDE}	2.67 ^{CF}	2.57 ^{CF}	3.28 ^{BDE}
草本层 Herb layer	<i>Ma</i>	2.07 ^{DF}	1.87 ^{DEF}	2.09 ^{DF}	2.78 ^{ABCEF}	2.41 ^{BDF}	1.21 ^{ABCDE}
	<i>D</i>	0.70	0.56 ^{CDE}	0.74 ^{BF}	0.70 ^{BEF}	0.79 ^{BDF}	0.55 ^{CDE}
	<i>J</i>	0.94 ^{BD}	0.84 ^{ACE}	0.90 ^{BDF}	0.85 ^{ACE}	0.89 ^{BD}	0.83 ^C
	<i>H</i>	1.82 ^{DE}	1.66 ^{CDE}	1.92 ^{BDEF}	2.24 ^{ABCF}	2.22 ^{ABCF}	1.52 ^{CDE}

Ma: Margalef 指数; *D*: Simpson 指数; *J*: Pielou 指数; *H*: Shannon-Wiener 指数。表 6 和图 1、2 同。

Ma: Margalef index; *D*: Simpson index; *J*: Pielou index; *H*: Shannon-Wiener index. The same is Table 6, Figures 1 and 2.

0.75~0.93 和 1.72~2.87, 灌木层的分别为 4.06~7.73、0.82~0.91、0.90~0.93 和 2.57~3.14, 草本层的分别为 1.21~2.78、0.55~0.79、0.83~0.94 和 1.52~2.24。可见, Margalef 指数和 Simpson 指数呈灌木层>乔木层>草本层, Pielou 指数呈灌木层>草本层>乔木

层, Shannon-Wiener 指数呈灌木层>乔木层>草本层的变化趋势。

3.3 不同森林类型的SOM变化

不同森林类型中(表 3), 土壤 A 层的 SOM 为

38.36~104.62 g kg⁻¹、B层为 19.74~59.40 g kg⁻¹,可见 A 层>B 层。土壤 A 层或 B 层 SOM 在不同森林类型间的差异显著性不同。

3.4 SOM和土壤理化指标的相关性

SOM 和土壤主要物理指标在土壤生态系统中相互作用,相互影响。从表 4 可见, SOM 同土壤容重、质量含水量、最大持水量、毛管持水量、田间持水量和总孔隙度的相关性达显著水平。SOM 和土壤容重呈负相关、和土壤孔隙度及持水量指标呈正相关。除土壤容重外, A 层的 SOM 与土壤物理指标间的相关系数均大于 B 层,表明 SOM 对 A 层土壤物理指标的影响较大。

从表 5 可见, SOM 除与土壤有效磷含量呈负相关外,与土壤其它化学指标均呈正相关关系。SOM 与土壤全氮量、水解氮量、全磷量、速效钾量、阳离子交换量和交换性盐基量均呈显著正相关关系,表明 SOM 是土壤主要肥力指标的综合指示者。喀斯特森林的土壤磷、钾含量较低^[13],是造成 SOM

和土壤磷、钾含量相关性不显著的原因之一。土壤中 SOM 在腐殖化过程中保存了养分,腐殖质的矿质化过程再度释放养分,这种复杂的吸附与解吸过程是喀斯特森林 SOM 和土壤有效磷量^[14]呈负相关的原因之一。从相关系数的绝对值来看,除土壤全氮量与水解氮量、全磷量外,其它指标均是土壤 A 层>B 层。

3.5 SOM和植物多样性指数的相关性

研究表明(表 6), 不同土层的 SOM 与乔木层、灌木层与草本层的植物多样性指数有不同程度的相关性,土壤 A 层的 SOM 与乔木层的 Margalef 指数、Simpson 指数、Shannon-Wiener 指数和 Pielou 指数呈显著正相关,而 B 层的 SOM 与乔木层植物的 Simpson 指数和 Pielou 指数呈显著正相关,同 Margalef 指数和 Pielou 指数虽呈正相关关系,但未达到显著水平。土壤 A 层与 B 层 SOM 同灌木与草本层植物多样性指数相关不显著、无规律。这说明茂兰试验区森林的 SOM 受乔木层植物多样性

表 3 不同森林类型的 SOM (g kg⁻¹)

Table 3 SOM (g kg⁻¹) in different forest types

土壤层 Soil stratum	森林类型 Forest type					
	A	B	C	D	E	F
A	92.63 ^{EF}	96.10 ^{DEF}	104.62 ^{DEF}	76.49 ^{BCEF}	38.36 ^{ABCD}	50.38 ^{ABCD}
B	59.40 ^E	42.72 ^{EF}	48.79	43.74 ^E	19.74 ^{ABD}	21.55 ^B

表 4 SOM 和土壤主要物理指标的相关性

Table 4 Correlation between SOM and soil physical indicators

	土壤层次 Soil layer	
	A	B
容重 Volume weight	-0.60 ^{**}	-0.45 [*]
质量含水量 Mass water content	0.53 ^{**}	0.43 [*]
体积含水量 Volume water content	0.19	0.12
最大持水量 Maximum water-holding capacity	0.61 ^{**}	0.46 [*]
毛管最大持水量 Capillary water-holding capacity	0.55 ^{**}	0.47 ^{**}
田间持水量 Field water-holding capacity	0.58 ^{**}	0.49 ^{**}
非毛管孔隙度 Non-capillary porosity	0.50 ^{**}	0.18
毛管孔隙度 Capillary porosity	0.36 ^{**}	0.34 [*]
总孔隙度 Total porosity	0.53 ^{**}	0.38 [*]

相关系数临界值在土壤 A 层为 $R_{(41-2, 0.05)}=0.30$ 和 $R_{(41-2, 0.01)}=0.39$, 土壤 B 层为 $R_{(30-2, 0.05)}=0.36$ 和 $R_{(30-2, 0.01)}=0.46$, *: $P<0.05$; **: $P<0.01$ 。

Threshold of the correlation coefficient is $R_{(41-2, 0.05)}=0.30$ and $R_{(41-2, 0.01)}=0.39$ in A stratum, and $R_{(30-2, 0.05)}=0.36$ and $R_{(30-2, 0.01)}=0.46$ in B stratum of soil. *: $P<0.05$; **: $P<0.01$.

表 5 SOM 和土壤主要化学指标的相关性

Table 5 Correlation between SOM and soil chemical indicators

	土壤层次 Soil stratum	
	A	B
全氮 Total nitrogen	0.58 ^{**}	0.73 ^{**}
水解氮 Hydrolysis nitrogen	0.60 ^{**}	0.84 ^{**}
全磷 Total Phosphorus	0.36 [*]	0.51 ^{**}
有效磷 Effective Phosphorus	-0.11	-0.22
全钾 Total potassium	0.06	0.01
速效钾 Available potassium	0.33 [*]	0.24
pH	0.18	0.12
阳离子交换量 Cation exchangeable capacity	0.41 ^{**}	0.39 ^{**}
交换性盐基 Exchangeable base	0.53 ^{**}	0.40 ^{**}

*: $P<0.05$; **: $P<0.01$.

表 6 SOM 和植物多样性指数的相关性

Table 6 Correlation between SOM and plant diversity indexes

土壤层次 Soil stratum	乔木层 Tree layer				灌木层 Shrub layer				草本层 Herb layer			
	<i>Ma</i>	<i>D</i>	<i>H</i>	<i>J</i>	<i>Ma</i>	<i>D</i>	<i>H</i>	<i>J</i>	<i>Ma</i>	<i>D</i>	<i>H</i>	<i>J</i>
A	0.30*	0.44**	0.34*	0.43**	-0.11	0.02	-0.03	0.06	0.03	-0.03	-0.13	0.07
B	0.29	0.45**	0.32	0.40*	0.06	0.06	0.10	0.17	0.21	0.10	0.04	0.21

*: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$.

指数的影响显著,灌木层与草本层植物多样性指数对 SOM 影响不显著。多元回归分析表明,土壤 A 层的 SOM 和不同层片植物多样性指数的复相关达显著水平($R=0.652^{**}$),植物多样性指数的因子总贡献率^[15]在乔木层、灌木层与草本层分别为 33.72%、45.79% 和 20.49%;土壤 B 层的 SOM 和不同层片植物多样性指数的复相关达显著水平($R=0.662^{**}$),植物多样性指数的因子总贡献率分别为 21.95%、15.06% 和 63.00%。这些表明在近自然经营中,除了要重视乔木层的植物多样性培育外,也不应忽视灌木层与草本层植物多样性维护对提高 SOM 的作用。乔木层、灌木层与草本层植物多样性指数的贡献率中, Margalef 指数、Simpson 指数、Shannon-Wiener 指数和 Pielou 指数对土壤 A 层 SOM 的相应值为 -1.55%、-1.15%、2.73%、16.16%、8.34%、1.73%、4.11%、3.80%、-6.17%、-11.90%、-32.50%、9.85%;对土壤 B 层 SOM 的相应值为 0.12%、0.80%、

9.54%、18.39%、-6.67%、5.55%、-1.11%、-1.85%、-18.66%、-2.32%、5.74%、29.25%。贡献率呈 Pielou 指数>Simpson 指数>Shannon-Wiener 指数>Margalef 指数的趋势,这为生产上选择植物多样性指数类型调控土壤 SOM 提供了参考依据。

进一步分析发现不同土层 SOM 同乔木层植物多样性指数间的相关系数值呈二次多项式 > 直线式的趋势,表明二次多项式更能反映二者间的相互关系(图 1~2)。土壤 A 层的 SOM 与乔木层植物的多样性指数间二次多项式和直线式的相关性均达显著或极显著水平,土壤 B 层的 SOM 与 Simpson 指数和 Pielou 指数间二次多项式和直线式的相关性达显著水平。曲线解析表明乔木层植物 Margalef 指数、Simpson 指数、Shannon-Wiener 指数和 Pielou 指数对土壤 A 层 SOM 的响应呈先升后降趋势,拐点值分别为 4.97、0.97、2.76 和 0.95。Simpson 指数和 Pielou 指数对土壤 B 层 SOM 的响

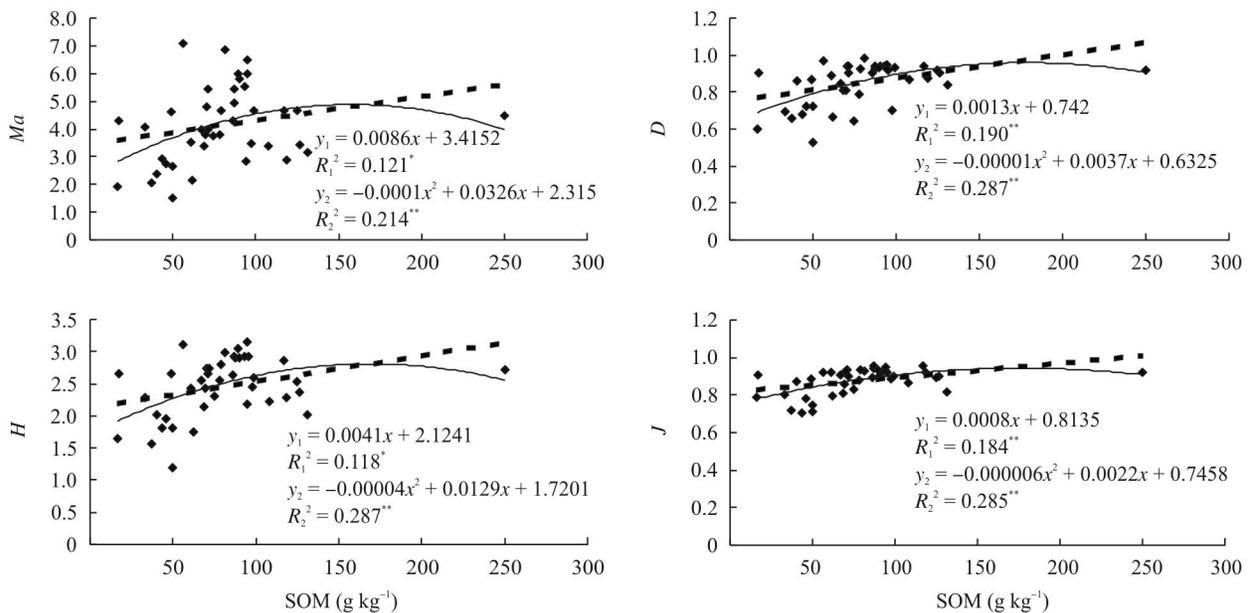


图 1 土壤 A 层 SOM 同乔木层植物多样性指数的二次多项式和直线式

Fig. 1 Quadratic polynomial and straight line regression between SOM in A stratum of soil and plant diversity indexes of tree layer

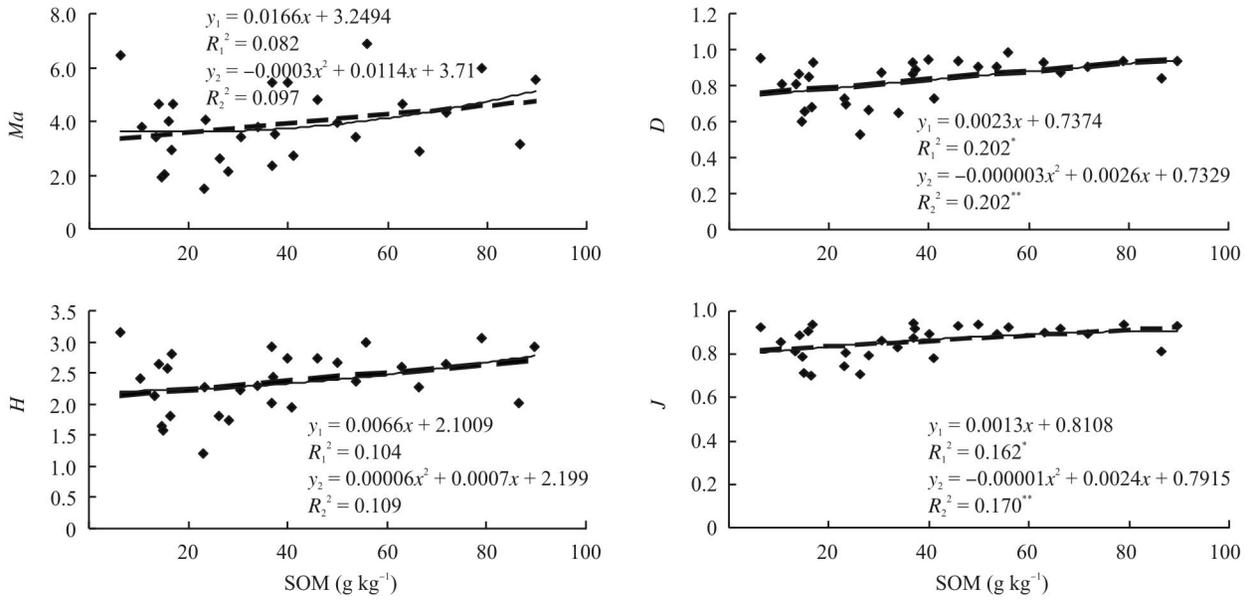


图 2 土壤 B 层 SOM 同乔木层植物多样性指数的二次多项式和直线式

Fig. 2 Quadratic polynomial and straight line regression between SOM in soil B stratum and plant diversity indexes of tree layer

应呈先升后降、Margalef 指数和 Shannon-Wiener 指数的响应呈先降后升趋势,拐点值无生态意义。表明乔木层植物不同多样性指数对不同土层 SOM 的响应具有非线性化现象。

4 结论和讨论

用乔木层物种重要值与层次聚类法将茂兰试验区 41 个森林调查样地划分为 6 个森林类型:香叶树-枫香林、榿木-马尾松林、槭树-朴树林、小叶栎树-化香林、灯台-小花栎木林和四照花-青冈栎林。部分森林类型的土壤 A 层或 B 层间的 SOM 差异显著,而且部分森林类型各层片植物的种数、粗度、高度和密度,以及 Margalef 指数、Simpson 指数、Shannon-Wiener 指数和 Pielou 指数也差异显著。这与以前的研究^[16]结论相似。

SOM 主要源于植被-土壤系统中的植被部分,并归于土壤,其组成与数量既受土壤主要理化指标影响、又是土壤主要理化指标的影响者,其对土壤 A 层的影响大于 B 层。研究表明土壤孔隙度、蓄水量和主要肥力与养分指标随 SOM 增加而增大,提高 SOM 有利于喀斯特地区土壤的水源涵养与肥力保育。

选用物种丰富度 Margalef 指数、生态优势度 Simpson 指数、信息多样性 Shannon-Wiener 指数和均匀度 Pielou 指数综合评判植物多样性和 SOM 的

关系,结果表明乔木层的植物多样性指数与 SOM 呈正相关,且与土壤 A 层 SOM 的相关性显著。这与以前的研究^[1-2,5,7]结论相似。而灌木层与草本层的植物多样性指数与 SOM 的相关性不显著。多元分析结果表明,植物多样性指数对土壤 A 层 SOM 的总贡献率呈灌木层>乔木层>草本层、对土壤 B 层 SOM 的总贡献率呈草本层>乔木层>灌木层,表明喀斯特地区植被恢复的 SOM 管理中植物多样性措施适宜以乔木树种为主,辅以灌木层与草本层植物复合经营的方式。

除植物凋落物、死亡的植物残体与根系外,SOM 中还包括土壤真菌、土壤酶等的多样性与生物量,这些因子与植物多样性指数的相关性已有研究报告^[1,3-4]。本文仅研究了自然恢复过程中喀斯特森林 SOM 总量与植被层植物多样性指数的相关性,还有必要进一步研究 SOM 组分及数量和植物多样性指数的相关性。另一方面,不同植物及不同年龄段的枯落物、凋亡根系及分泌物数量与成分不同,植物多样性指数影响已构建森林土壤微生物区系与活力^[1,3-4],进而影响 SOM 组分与数量,SOM 的影响因素包括了植物多样性指数在内的多种因素。

自然恢复过程中喀斯特森林乔木层植物多样性指数与 SOM 的相关系数为二次多项式>直线式,它们的直线相关性与已有的研究报告一致^[2,5,7]。分析二次多项式的形成原因,认为 SOM 不仅受乔

木层植物多样性指数的影响,而且也受所处演替阶段与林分结构指标的影响。在 $SOM > 100 \text{ g kg}^{-1}$ 的 7 个样地中,小叶栎树-化香林中的样地比例为 41.67%,四照花-青冈栎林和灯台-小花栎木林分别为 14.29%、11.11%,而乔木层植物多样性指数却以四照花-青冈栎林最高,表明高 SOM 样地比例的森林类型其乔木层植物多样性指数未必高;另一方面,41 个样地的 SOM 和 DBH 的相关系数为 0.34*,表明 SOM 有随林分 DBH 增大而增加的趋势。自然恢复过程中近顶级和顶极森林^[16]的大径级林分,林分密度相对较低,生物量与凋落物量较大, SOM 持续增长。二次多项式拐点可成为解释植物多样性指数和 SOM 间复杂关系的重要依据之一,经造林^[3-4]或植被恢复试验进一步验证后,可成为喀斯特石漠化治理工程中物种量化管理的参考依据之一。

参考文献

- Wang S L, Huang Z Q, Wang Q K, et al. Effects of species diversity of litter on the ecological functions of *Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook. plantation soil [J]. *Acta Ecol Sin*, 2005, 25(3): 474-480.
汪思龙, 黄志群, 王清奎, 等. 凋落物的树种多样性与杉木人工林土壤生态功能 [J]. *生态学报*, 2005, 25(3): 474-480.
- Li D W, Zhang W H, Ren Z Z, et al. Relationship between species diversity in different restoration stages of *Hippophae rhamnoides* ssp. *sinensis* plantations and soil fertility in the hilly and gully regions of Loess Plateau [J]. *Agri Res Arid Areas*, 2007, 25(5): 25-30.
李登武, 张文辉, 任争争, 等. 黄土丘陵沟壑区沙棘人工林不同恢复阶段物种多样性与土壤肥力的关系研究 [J]. *干旱地区农业研究*, 2007, 25(5): 25-30.
- Eisenhauer N, Beler H, Engels C, et al. Plant diversity effects on soil microorganisms support the singular hypothesis [J]. *Ecology*, 2010, 91(2): 485-496.
- Donald R Z, William E H, David C W, et al. Plant diversity, soil microbial communities, and ecosystem function: Are there any links? [J] *Ecology*, 2003, 84(8): 2042-2050.
- Yang X B, Zhang T L, Wu Q S. The relationship between biodiversity and soil fertility characteristics on abandoned fields in the tropical region of southern China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2002, 22(2): 190-196.
杨小波, 张桃林, 吴庆书. 海南琼北地区不同植被类型物种多样性与土壤肥力的关系 [J]. *生态学报*, 2002, 22(2): 190-196.
- Chen G S, Zhong Z C. Relationship between species diversity and soil factors of evergreen broad-leaved forest in Jinyun Mountain, Chongqing [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2004, 10(1): 12-17.
陈光升, 钟章成. 重庆缙云山常绿阔叶林群落物种多样性与土壤因子的关系 [J]. *应用与环境生物学报*, 2004, 10(1): 12-17.
- Lang H L, Long C L. Relationship between species diversity and soil factors in karst forest of different topography sites in Maolan Natural Reserve [J]. *Hubei Agri Sci*, 2012, 51(18): 3988-3992.
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 [J]. *湖北农业科学*, 2012, 51(18): 3988-3992.
- Zhou Z X. Scientific Survey of Maolan Karst Forest [M]. Guiyang: Guizhou Peoples Press, 1987: 1-23.
周政贤. 茂兰喀斯特森林科学考察集 [M]. 贵阳: 贵州人民出版社, 1987: 1-23.
- State Forestry Administration of China. Chemical Analysis Methods of Forest Soil Water (LY/T 1275-1999) [S]. Beijing: Standards Press of China, 1999: 307-334.
国家林业局. 森林土壤水化学分析(LY/T 1275-1999) [S]. 北京: 中国标准出版社, 1999: 307-334.
- Zhang J T. Quality Ecology [M]. Beijing: Science Press, 2004: 20,86-91.
张金屯. 数量生态学 [M]. 北京: 科学出版社, 2004: 20,86-91.
- Yu J Y, He X H. Mathematics Statistics and SPSS Application [M]. Beijing: Peoples Post Press, 2003: 127-135,163-282.
余建英, 何旭宏. 数据统计分析与SPSS应用 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2003: 127-135,163-282.
- Zhang X, Li K Z, Lian B, et al. Studies on the floristics of karst nature forests between southern and central areas in Guizhou Province, China [J]. *J Trop Subtrop Bot*, 2009, 17(2): 114-121.
张喜, 李克之, 连宾, 等. 黔南和黔中喀斯特天然林植物区系研究 [J]. *热带亚热带植物学报*, 2009, 17(2): 114-121.
- Liu F, Wang S J, Luo H B, et al. Microhabitats in karst forest ecosystem and variability of soils [J]. *Acta Pedol Sin*, 2008, 45(6): 1055-1062.
刘方, 王世杰, 罗海波, 等. 喀斯特森林生态系统的小生境及其土壤异质性 [J]. *土壤学报*, 2008, 45(6): 1055-1062.
- Qin S J, Liu J S, Wang G P. Mechanism of phosphorus availability changing in soil [J]. *Chin J Soil Sci*, 2006, 37(5): 1012-1016.
秦胜金, 刘景双, 王国平. 影响土壤磷有效性变化作用机理 [J]. *土壤通报*, 2006, 37(5): 1012-1016.
- Zhang X, Xue J H, Xu X T, et al. Forest surface runoff and its influence factors in karst mountainous area in center of Guizhou Province, China [J]. *J Trop Subtrop Bot*, 2007, 15(6): 527-537.
张喜, 薛建辉, 许效天, 等. 黔中喀斯特山地不同森林类型的地表径流及影响因素 [J]. *热带亚热带植物学报*, 2007, 15(6): 527-537.
- Yu L F, Zhu S Q, Ye J Z, et al. Dynamics of a degraded karst forest in the process of natural restoration [J]. *Sci Silv Sin*, 2002, 38(1): 1-7.
喻理飞, 朱守谦, 叶镜中, 等. 退化喀斯特森林自然恢复过程中群落动态研究 [J]. *林业科学*, 2002, 38(1): 1-7.