

岩溶区林分生长与影响因子的关系

王磊¹, 崔明¹, 刘玉国¹, 周梦玲², 武建宏³, 周桃龙³

(1. 中国林业科学研究院荒漠化研究所, 北京 100091; 2. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 3. 河南省淅川县林业局, 河南 淅川 474450)

摘要: 【目的】通过研究南水北调源头渠首岩溶区不同林分生长及其影响的主导因子, 为科学指导岩溶区植被恢复、林地管理与林分改造提供依据。【方法】以南水北调水源地中线渠首所在地淅川县岩溶区为研究对象, 基于结构方程模型构建乔木层生物量与基岩裸露度、土壤厚度、树种多样性以及林分密度的模型, 进行关系耦合。【结果】基岩裸露度与林分密度为正相关关系 ($P<0.01$), 与树种多样性为极显著正相关关系 ($P<0.01$), 与建群种生物量为极显著负相关关系 ($P<0.01$)。基岩裸露度对林分密度的直接影响系数为 0.198, 对树种多样性的直接影响系数为 0.519, 对建群种生物量的总影响系数、直接影响系数及间接影响系数分别为-0.659、-0.722 和 0.063, 对林分生物量的间接影响系数为-0.604。土壤厚度与建群种生物量呈显著正相关关系 ($P<0.05$), 与树种多样性、林分密度与建群种生物量为正相关关系。土壤厚度对建群种生物量的直接影响系数为 0.258, 对林分总生物量的间接影响系数为 0.262; 树种多样性对建群种的直接影响系数为 0.084, 对林分总生物量的总影响系数、直接影响系数及间接影响系数分别为 0.211、0.126 和 0.085; 林分密度对建群种的直接影响系数为 0.096, 对林分总生物量的间接影响系数为 0.098。建群种生物量与林分总生物量为显著正相关关系 ($P<0.01$), 建群种生物量对林分总生物量的总影响系数为 1.014。【结论】基岩裸露度、土壤厚度、树种多样性及林分密度与建群种生物量、林分总生物量之间存在着复杂的关系, 在岩溶区降低基岩裸露度、增加土壤厚度(即提升立地条件)能够改善林分结构增加建群种和全林分的生物量。生物量与立地条件、树种多样性和林分密度呈正相关, 提升立地条件、抚育改变林分结构能够促进个体生长, 增加生物量的积累, 改善岩溶区的生态环境。图 1 表 3 参 34

关键词: 岩溶区; 结构方程模型; 立地条件; 林分结构; 林分多样性

中图分类号: S718.5

文献标志码: A

文章编号: 2095-0756(2020)06-1036-09

Relationship between stand growth and impact factors in karst area

WANG Lei¹, CUI Ming¹, LIU Yuguo¹, ZHOU Mengling², WU Jianhong³, ZHOU Taolong³

(1. Institute of Desertification Study, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 2. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 3. Xichuan Forestry Bureau of Henan Province, Xichuan 474450, Henan, China)

Abstract: [Objective] This study aims to explore the dominant factors affecting the growth of different stands in the karst area at the headwaters of South-to-North Water Diversion Project, so as to provide scientific evidence for vegetation restoration, forest management and forest rehabilitation in such area. [Method] The karst area of Xichuan County, where the head of the middle channel of South-to-North Water Diversion Project is located, was taken as the research object. The models of tree layer biomass, bedrock exposure, soil thickness, tree species diversity and stand density were built, based on the structural equation model to carry out relational coupling. [Result] There existed a positive correlation between bedrock exposure and stand density ($P<0.01$), a very significant positive correlation with tree species diversity ($P<0.01$), and a very significant negative

收稿日期: 2019-12-30; 修回日期: 2020-02-09

基金项目: “十三五”国家重点研发计划项目(2016YFC0502504); 国家自然科学基金资助项目(31500583); 南水北调水源地丹江口库区石漠化治理效益监测项目(2017-07)

作者简介: 王磊, 从事石漠化治理研究。E-mail: 1198694029@qq.com。通信作者: 刘玉国, 助理研究员, 从事石漠化治理研究。E-mail: liuyuguo@caf.ac.cn

correlation with the biomass of constructive species ($P < 0.01$). The direct impact coefficient of bedrock exposure on stand density was 0.198, the direct impact coefficient on tree species diversity was 0.519, the total, direct and indirect impact coefficients on biomass of constructive species were -0.659 , -0.722 and 0.063 , respectively, and the indirect impact coefficient on stand biomass was -0.604 . There existed a significant positive correlation between soil thickness and constructive species biomass ($P < 0.05$), and a positive correlation between tree species diversity, stand density and constructive species biomass. The direct and indirect impact coefficients of soil thickness on the biomass of constructive species were 0.258 and 0.262 respectively. The direct impact coefficient of tree species diversity on constructive species was 0.084 , and the total, direct and indirect impact coefficients on total biomass of stand were 0.211 , 0.126 and 0.085 respectively. The direct impact coefficient of stand density on constructive species was 0.096 , and the indirect impact coefficient on total biomass was 0.098 . There was a significant positive correlation between the biomass of constructive species and the total biomass of stands ($P < 0.01$), and the total impact coefficient of constructive species biomass on the total biomass of stands was 1.014 . [Conclusion] There are complex relationships between bedrock exposure degree, soil thickness, tree species diversity, stand density, and constructive species biomass and total stand biomass. Reducing bedrock exposure in karst area and increasing soil thickness (*i.e.* improving site conditions) can improve the stand structure, as well as the constructive species biomass and stand biomass. Biomass is positively correlated with site conditions, stand density, and tree species diversity. Improving site conditions, tending and changing stand structure can promote individual growth, increase the biomass accumulation, and improve the ecological environment in karst area. [Ch, 1 fig. 3 tab. 34 ref.]

Key words: karst; structural equation model; site condition; stand structure; stand diversity

林分生物量是森林生态系统对有机质所积累的质量,是森林生态系统最基本的特征数据,对研究森林生态系统物质循环、能量流动具有重要的作用^[1-3]。林分生物量的动态变化不仅能够反映物质与能量在生态系统中变化的复杂关系,同时在一定程度上能够反映生态系统的健康水平^[4-5]。生物量的积累表现为林分生长。立地条件与林分生长密切相关,好的立地条件为林分生长提供充足的养分,加快林分生长^[6]。林分结构和树种多样性也会影响林分有机质的积累速度。岩溶地区高温多雨且分布不均,基岩裸露率高、土壤瘠薄、季节性岩溶干旱明显^[7-8]。岩溶区的适生植被不仅需具有石生性、喜钙性、耐干旱和耐贫瘠的特点,而且需具有发达的根系。植被的恢复和重建是岩溶退化区的重点和难点^[9],生物量作为生态系统生产力的基础和功能的表现形式,是退化区植被恢复成功与否的评价指标^[10]。目前对岩溶生态系统植被生物量的研究集中在年龄序列、演替阶段等单一因素对生物量的影响^[11-13]。然而,生态系统中的影响是一个复杂的过程,由很多相互的作用组成^[14-15],因此综合探讨林分生物量与多种影响因素之间的关系具有必要性和现实性。传统的路径分析及主成分分析不能同时处理多个因变量与自变量的联系,不能提供完整的信息^[16]。结构方程模型是一种多变量的统计方法,能够同时研究自然系统中多个因子间的相互关系^[6,17]。相较于传统的相关性分析,结构方程模型是基于研究者的先验知识预先设定系统内因子间的依赖关系,能够判别各因子间的关系强度,同时还能作出整体拟合和判断,反映自变量与因变量之间的直接和间接关系,帮助研究者更全面掌握自然系统中的真实机制^[6,18]。近年来结构方程模型在生态学和林学上得到广泛应用^[19-20]。河南省淅川县是南北过渡带和岩溶石漠化集连片区的最北端,岩溶面积达 348.82 km^2 ,又是南水北调中线工程核心水源地、主要淹没区及渠首所在地,地理位置特殊^[21]。调查发现:岩溶区林分质量明显低于非岩溶区,生态资源环境问题严重,影响着南水北调中线安全。提高该区域生态环境,保障南水北调中线安全势在必行,林分质量提升已经迫在眉睫。本研究以淅川县岩溶区天然次生林为研究对象,利用结构方程模型,探讨岩溶区建群种生物量、林分总生物量与基岩裸露度、土壤厚度以及林分密度和物种多样性之间的耦合关系,明确各关系之间影响强度,以期为河南省淅川县岩溶区植被的经营和管理提供理论依据,以期改善淅川县岩溶区生态环境。

1 研究地区概况与研究方法

1.1 研究地区概况

淅川县位于河南省西南部,豫、鄂、陕三省结合处,32°55′~33°23′N,110°58′~111°53′E,地处伏牛山余脉,拥有亚洲最大的淡水湖,属于南水北调中线工程水源地所在地。淅川县气候适宜,属于北亚热带向暖温带过渡的季风性气候区,四季分明。年平均降水量为804.3 mm,6—9月降水占全年降水量的58.0%以上,最高达79.8%。年平均气温为15.8℃,无霜期约228 d。岩溶地貌在淅川分布广泛,主要集中在丹江口库区周边和荆关、西簧、金河、大石桥等12个乡镇,岩溶区现有植被以次生林为主。其中主要的乔木树种为栓皮栎 *Quercus variabilis*、黄连木 *Pistacia chinensis*、化香 *Platycarya strobilacea*、侧柏 *Platycladus orientalis*、女贞 *Ligustrum lucidum* 等;主要的灌木树种为小果蔷薇 *Rosa cymosa*、菝葜 *Smilax china*、黄荆 *Vitex negundo*、荚蒾 *Viburnum dilatatum*、连翘 *Hypericum ascyron* 等;主要的草本为碎米莎草 *Cyperus iria*、绶草 *Spiranthes sinensis*、天门冬 *Asparagus cochinchinensis*、苎草 *Arthraxon hispidus* 等。

1.2 调查方法与数据处理

2018年7—9月分别在淅川县金河镇、西簧乡、荆关镇岩溶区选择6个样点18个20 m×30 m样地,在每个样地中划分6个10 m×10 m小样方,共108个样方进行数据采集。在每块样地进行每木检尺,确定乔木层树种组成,测定树高、胸径、枝下高和冠幅。同时测量每块样地的坡度、坡向、海拔、基岩裸露度、土壤厚度,测定土壤含水率和土壤容重等。

采用中国森林生态系统碳储量—生物量方程^[22]计算林分生物量和建群种生物量。

采用Shannon-Wiener指数计算各样地树种多样性^[23]:

$$H = - \sum_{i=1}^N \frac{B_i}{B} \left(\ln \frac{B_i}{B} \right) \quad (1)$$

式(1)中: H 为树种多样性; B 为林分胸径面积总和; B_i 为树种 i 的胸径断面积总和; N 为树种数。结果见表1。

1.3 模型构建原理

结构方程模型是一种建立、估计和检验因果关系的模型,结合了因素分析和路径分析2种统计方法,并且同时检验模型中的显性变量、潜在变量、干扰或误差变量间的关系。观测变量是直接测得的变量、潜在变量是不可直接测得的变量,但是可由观测变量表示。如基岩裸露度、土壤厚度、海拔等可以直接测量的指标,这些指标能够反映不能够直接测量的指标立地条件(潜在变量),本研究中采用能够直接测量的指标构建结构方程模型。

结构方程模型由测量模型和结构模型两部分组成。测量模型是潜在变量与显性变量之间关系的模型。

$$X = \Lambda \xi + \delta; \quad (2)$$

$$Y = \Lambda \eta + \varepsilon. \quad (3)$$

式(2)~(3)中: X 为外生显性变量向量; Y 为内生显性变量向量; Λx 和 Λy 为指标变量(X, Y)的因素负荷量; δ, ε 为外生显性变量和内生显性变量的测量误差; ξ 为外生潜在变量; η 为内生潜在变量^[24]。

立地条件决定林分的生长状况,直接影响林分的结构和树木的多样性以及林分的生物量,立地条件包含地形因子、土壤因子以及气候因子^[18],森林的功能与林分结构密切相关,林分结构表征了林木的分布与生长状况。林分多样性影响树种间的差异,并且影响林分的生长^[25]。由于岩溶区基岩裸露度高,土壤瘠薄且不连续,对岩溶区植被有着最直接的影响。故本研究中将基岩裸露度(x_1)、土壤厚度(x_2)、树种多样性(x_3)、林分密度(x_4)等观测变量作为探讨与林分生物量关系的显变量,对应误差为 $\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4$ 。建群种生物量(η_1)和林分总生物量(η_2)作为与内生潜在变量(生物量 η)有关的观测变量, $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ 为对应的误差,构建各显变量与内生潜变量(生物量 η)结构方程模型。运用SPSS 18.0软件对数据进行处理,运用Amos 23.0软件构建结构方程模型进行林分生长与影响因子间关系耦合。

表 1 样地概况

Table 1 Sample information													
样地 编号	纬度(N)	经度(E)	坡度/ (°)	海拔/ m	土壤厚 度/cm	基岩裸 露度/%	含水 率/%	平均胸 径/cm	平均树 高/m	优势木生 物量/ (t·hm ⁻²)	林分总生 物量/ (t·hm ⁻²)	主要树种	种群密度/ (株·hm ⁻²)
P ₁	33°15'57.94"	111°14'35.31"	21	333	35.0	70	13.7	11.8	9.8	97.71	119.18	栓皮栎、马尾松、 山槐	1 750
P ₂	33°15'57.80"	111°14'34.67"	21	255	15.0	55	13.6	8.0	8.6	61.50	79.35	栓皮栎、马尾松、 蒙桑	1 550
P ₃	33°15'57.01"	111°14'34.39"	29	249	15.0	50	20.1	9.9	10.7	106.82	124.15	栓皮栎、山胡椒	1 567
P ₄	33°07'26.76"	111°26'01.23"	24	311	22.0	75	18.9	13.0	13.0	144.02	158.23	栓皮栎、黄连木、 侧柏	1 933
P ₅	33°07'26.44"	111°26'01.60"	24	322	18.0	70	17.0	11.9	13.0	130.15	147.98	栓皮栎、黄连木、 侧柏	2 000
P ₆	33°07'26.73"	111°26'02.10"	27	345	27.0	75	19.2	11.0	12.5	166.94	191.28	栓皮栎、黄连木、 侧柏	1 883
P ₇	33°07'49.72"	111°25'22.30"	24	219	20.0	65	16.9	12.9	15.4	112.21	143.61	栓皮栎、黄连木、 女贞	1 767
P ₈	33°07'50.85"	111°25'22.60"	24	239	28.0	50	17.0	14.3	17.5	224.42	239.15	栓皮栎、黄连木、 蒙桑	1 950
P ₉	33°07'51.15"	111°25'22.76"	21	250	22.0	52	15.7	14.0	14.6	148.92	169.33	栓皮栎、黄连木、 鸡仔木	1 400
P ₁₀	33°07'26.65"	111°25'57.23"	20	279	28.0	80	17.6	10.5	13.0	120.29	139.66	栓皮栎、黄连木、 侧柏	1 833
P ₁₁	33°07'26.86"	111°25'57.00"	21	297	25.0	78	16.4	12.0	10.4	117.67	139.44	栓皮栎、黄连木	1 667
P ₁₂	33°07'27.10"	111°25'56.75"	20	308	26.0	80	18.3	13.3	16.1	172.21	182.27	栓皮栎、黄连木	2 700
P ₁₃	33°07'49.36"	111°26'11.57"	35	470	17.0	10	10.1	11.7	11.7	165.95	176.74	栓皮栎、化香、 黄连木	1 983
P ₁₄	33°07'50.35"	111°26'13.63"	30	472	18.0	12	6.0	11.0	11.8	138.31	154.57	栓皮栎、黄连木、 侧柏	1 650
P ₁₅	33°07'49.01"	111°25'22.02"	30	450	15.0	20	4.3	11.2	12.0	142.95	147.96	栓皮栎、黄连木、 侧柏	2 483
P ₁₆	33°16'37.23"	111°03'06.28"	35	651	12.4	20	10.6	10.8	12.7	296.72	312.55	栓皮栎、飞蛾槭	2 867
P ₁₇	33°16'35.60"	111°03'05.38"	35	627	18.8	10	12.9	14.0	14.8	280.25	288.55	栓皮栎、侧柏	1 800
P ₁₈	33°16'34.65"	111°03'18.91"	32	574	22.0	40	14.0	21.0	19.7	190.55	234.44	栓皮栎、榉栎	767

说明：栓皮栎*Quercus variabilis*、马尾松*Pinus massoniana*、山槐*Maackia hupehensis*、蒙桑*Morus mongolica*、山胡椒*Lindera glauca*、侧柏*Platycladus orientalis*、女贞*Ligustrum lucidum*、鸡仔木*Sinoadina racemosa*、飞蛾槭*Acer oblongum*、榉栎*Quercus aliena*

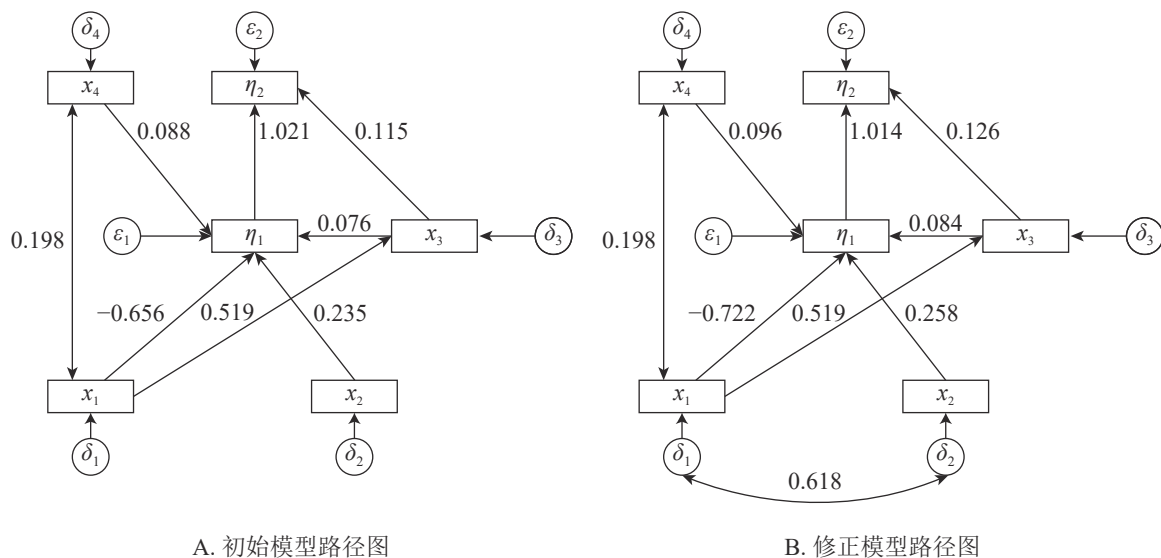
2 模型构建与修正

本研究建立基岩裸露度 (x_1)、土壤厚度 (x_2)、树种多样性 (x_3)、林分密度 (x_4) 等观测变量与建群种生物量和林分生物量耦合关系的结构方程模型。根据拟合结果，逐步的调整路径关系，删除关系不显著 ($P>0.05$) 的路径，得到初始结构方程模型 1(图 1A)。初始模型 $\chi^2=13.236$, $d_f=7$, $\chi^2/d_f=1.891<3$, 显著性概率值 $P=0.067>0.05$, 接受虚无假设。但模型适配度指数 $I_{GF}=0.829<0.90$, 模型规准适配指数 (I_{NF})、相对适配指数 (I_{RF})、非规准适配指数 (I_{TL}) 均较小(表 2), 模型拟合结果需进一步进行模型修正。修正后得到最优模型 2(图 1B)。

最优模型 $\chi^2=5.051$, $d_f=6$, $\chi^2/d_f=0.842<3$, 显著性概率值 $P=0.537>0.05$, 接受虚无假设, 观测数据所导出的方差协方差矩阵与假设模型导出的方差协方差矩阵适配的假设获得支持, 假设模型与观测数据适配。模型中各项检验指标均达到标准, 如表 2。同时渐进残差均方和平方根 $R_{MESA}=0<0.08$ 、以及赤池信息量 $A_{IC}(\text{预设模型})=35.051<42.000(\text{饱和模型})<123.965(\text{独立模型})$, 假设模型与数据适配良好。

3 结果与分析

由表 3 所示：基岩裸露度对林分密度、树种多样性有正影响，对建群种生物量有负影响，其路径系



x_1 为基岩裸露度, x_2 为土壤厚度, x_3 为树种多样性, x_4 为林分密度, δ_1 、 δ_2 、 δ_3 、 δ_4 为对应的误差, η_1 为建群种生物量, η_2 为林分总生物量, ε_1 、 ε_2 为对应误差

图 1 初始与修正模型路径图

Figure 1 Initial and correction model path map

表 2 林分生长结构方程模型的拟合参数

Table 2 Fitting parameters of structure equation model for the growth of forest

统计量	参数名称	参数含义	评价标准	模型1	模型2
绝对适配统计量	χ^2/d_f	卡方自由度比	<3	1.890	0.842
	I_{GF}	适配度指数	>0.90	0.829	0.914
	I_{NF}	规准适配指数		0.882	0.955
	I_{RF}	相对适配指数		0.747	0.887
增值适配度统计量	I_{IF}	增值适配指数	介于0~1之间(可以>1), 越接近1, 表示模型适配度越好	0.941	1.009
	I_{TL}	非规准适配指数		0.862	1.024
	I_{GF}	比较适配指数		0.936	1.000
简约适配统计量	P_{NC}	非中心参数	越小越好	6.236	0

数分别为 0.198、0.519、-0.722, 即每当基岩裸露度变化 1 时, 其林分密度、树种多样性和建群种生物量分别变化 0.198、0.519、-0.722。基岩裸露度对树种多样性的的正影响较大, 对建群种生物量的负影响最大。建群种生物量受到土壤厚度、林分密度和物种多样性的正影响, 受到基岩裸露度的负影响, 其路径系数分别为 0.258、0.096、0.084、-0.722, 即当土壤厚度、林分密度、物种多样性和基岩裸露度分别变化 1 时, 建群种生物量分别变化 0.258、0.096、0.084、-0.722。土壤厚度对建群种生物量有最大的正影响。林分总生物量受到树种多样性和建群种生物量的正影响, 其路径系数分别为 0.126、1.014。林分总生物量的变化几乎完全受林分建群种生物量的影响。

表 3 结构方程模型标准化影响系数

Table 3 Standard impact coefficient of SEM

影响因素	标准化直接影响					标准化间接影响					标准化总影响				
	基岩 裸露度	土壤 厚度	树种 多样性	林分 密度	建群种 生物量	基岩 裸露度	土壤 厚度	树种 多样性	林分 密度	建群种 生物量	基岩 裸露度	土壤 厚度	树种 多样性	林分 密度	建群种 生物量
物种多样性	0.519	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.519	0	0	0	0
林分密度	0.198	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.198	0	0	0	0
建群种生物量	-0.722	0.258	0.084	0.096	0	0.063	0	0	0	0	-0.659	0.258	0.084	0.096	0
林分总生物量	0	0	0.126	0	1.014	-0.604	0.262	0.085	0.098	0	-0.604	0.262	0.211	0.098	1.014

河南省淅川县岩溶区建群种生物量和林分总生物量主要受到基岩裸露度、土壤厚度、林分密度和物种多样性的直接或间接影响。基岩裸露度对建群种生物量的总影响系数为 -0.659 ，直接影响系数为 -0.722 ，间接影响系数为 0.063 ；对林分总生物量的总影响系数为 -0.604 ，间接影响系数为 -0.604 ，直接影响系数为 0 。因为基岩裸露度对林分总生物量直接影响系数可忽略，在结构方程模型中将该路径删除。当基岩裸露度变化 1 时，建群种生物量和总生物量分别变化 -0.659 、 -0.604 。即随着基岩裸露度增加，建群种生物量和林分总生物量下降。土壤厚度对建群种生物量的总影响系数或直接影响系数为 0.258 ；对林分总生物量的总影响系数或间接影响系数 0.262 。随着土壤厚度的增加，林分建群种生物量和总生物量增加。树种多样性对林分建群种生物量的总影响系数或直接影响系数为 0.084 ，对林分总生物量影响系数为 0.211 ，直接影响系数为 0.126 ，间接影响系数为 0.085 。随着树种多样性的增加建群种生物量和总生物量缓慢增加。林分密度对林分建群种生物量的总影响系数或直接影响系数为 0.096 ，对林分总生物量的总影响系数或间接影响系数为 0.098 。建群种生物量对林分总生物量的影响系数为 1.014 ，林分总生物量几乎完全受建群种生物量的决定。岩溶区土壤瘠薄、土壤水肥条件较差、基岩裸露度较大，立地条件差，对植被的适应性要求较高，建群种在立地竞争中占据绝对优势。岩溶区建群种生物量占林分总生物量的 77.50% 以上(表 1)，提升建群种的生长条件，能够直接提升林分的总生物量。

基岩裸露度对树种多样性的总影响系数或直接影响系数为 0.519 ，对林分密度的总影响系数或直接影响系数为 0.198 ，即随着基岩裸露度的增加，物种的多样性和林分密度增加。岩溶区基岩的裸露不仅仅造成地被的不连续，而且造成明显的小生境，高度异质的岩溶区物种多样性随着基岩裸露度增加而增加。

4 讨论与结论

4.1 讨论

河南省淅川县岩溶区天然次生林基岩裸露度、土壤厚度、树种多样性、林分密度与建群种生物量和总生物量存在着复杂的耦合关系。基岩裸露度与林分密度为正相关关系，与树种多样性为极显著正相关关系($P<0.01$)，与建群种生物量为极显著负相关关系($P<0.01$)；土壤厚度与建群种生物量显著正相关关系($P<0.05$)，树种多样性、林分密度与建群种生物量为正相关关系；建群种生物量与林分总生物量为显著正相关关系($P<0.01$)。根据模型拟合结果表明淅川县岩溶区主要影响林分生物量的观测变量基岩裸露度和土壤厚度。基岩裸露度增加，造成地被破碎，土壤不连续，植物生存空间变少、生长的立地条件变差，树种多样性增加，林分密度增加，但树木的胸径树高减少，林分生物量反而下降。土壤厚度是土壤肥力存在和植物生长的重要物质基础，是植被重建最基本的条件^[26-27]。土壤厚度增加能够促进植物的生长，增加林分生物量。

基岩裸露度和土壤厚度等作为立地质量的评价指标，能反映立地条件的优劣。一般随立地条件的改善，林分的物种多样性越来越高，结构功能越来越好^[28]。同时生态学理论认为群落的稳定性与植物的多样性关系密切，群落的物种多样性是衡量生态系统稳定性的指标^[28-29]。淅川县岩溶区立地条件提升时树种多样性会降低，可能是立地质量改善促进了建群种个体的生长，在竞争中占据优势地位，导致其他物种减少，林分复杂程度降低，群落的稳定性降低。岩溶区植被受到强烈的特殊地质环境胁迫，植物群落简单，多样性低，并且岩溶区生长植物既要有石生性、喜钙性以及耐干旱的特点，又必须具有发达、强壮的根系^[30]，所以岩溶区的适生种、优势种具有明显的特殊性^[31-32]。立地条件提升能显著促进建群种的生长，使得林分复杂程度越来越低，多样性降低。

生态系统的变化是一个复杂的过程，并不是简单的一一对应关系^[15]。研究系统复杂的生态过程用传统的方法有一定局限性，传统的生长模型大多为直接模型，无法反映隐含的间接关系^[33-34]。本研究用结构方程模型来探讨淅川县岩溶区基岩裸露度、土壤厚度、林分密度、树种多样性和建群种生物量、林分总生物量之间的复杂关系。根据模型计算结果可知：因子间既有直接的影响关系，也有间接的关系。基岩裸露度对建群种生物量有直接作用，同时通过影响树种多样性和建群种生物量对林分生物量产生间接作用。土壤厚度、物种多样性、林分密度对建群种生物量有直接作用，并且通过影响建群种生物量对林分总生物量产生间接作用。保护岩溶区生态环境，防止水土流失，保持土壤厚度以及稳定或降低基岩裸露度能够提高岩溶区次生林的生物量，增加干物质积累。

本研究对象是浙川县岩溶区天然次生林, 由于岩溶区特殊的地质水文结构, 林分的树种多样性低, 稳定性较差。同时所选取的样地数量相对较少, 模型的最终适配结果虽然存在一定的不足, 但是也能反映出岩溶区林分生长与影响因子间的关系。合理改善立地条件, 降低基岩裸露度和增加土壤厚度, 及时抚育提升树种多样性, 增加林分密度, 有利于增加岩溶区生物量的积累, 促进林分生长, 逐步提高岩溶区林分的生态功能。

4.2 结论

基岩裸露度与林分生物量关系复杂。基岩裸露度能直接降低林分生物量, 但又能通过增加树种多样性和林分密度降低间接提升林分生物量。土壤厚度、物种多样性和林分密度直接影响林分的生物量。河南省浙川县岩溶区林分生长与影响因子间的关系耦合结果表明: 岩溶区建群种生物量和林分总生物量受到基岩裸露度的极显著负影响 ($P < 0.01$), 其影响系数分别为 -0.659 、 -0.604 ; 受到土壤厚度的显著正影响 ($P < 0.05$), 影响系数分别为 0.258 、 0.262 ; 受到树种多样性和林分密度正影响, 影响系数分别为 0.084 、 0.211 , 0.096 、 0.098 。在岩溶区防治水土流失, 稳定土壤厚度及基岩裸露度, 能改善林分结构等立地条件, 增加建群种和林分总生物量, 提升岩溶区的生态环境质量。

5 参考文献

- [1] 薛立, 杨鹏. 森林生物量研究综述[J]. 福建林学院学报, 2004, **24**(3): 283 – 288.
XU Li, YANG Peng. Summary of research on forest biomass [J]. *J Fujian Coll For*, 2004, **24**(3): 283 – 288.
- [2] WEST P W. *Tree and Forest Measurement*[M]. 2nd ed. Berlin: Springer Verlag, 2009.
- [3] 程积民, 程杰, 高阳, 等. 渭北黄土区不同立地条件下刺槐人工林群落生物量结构特征[J]. 北京林业大学学报, 2014, **36**(2): 15 – 21.
CHENG Jimin, CHENG Jie, GAO Yang, *et al.* Structural characteristics of community biomass in *Robinia pseudoacacia* plantations under different site conditions at Webei loess region, northwestern China [J]. *J Beijing For Univ*, 2014, **36**(2): 15 – 21.
- [4] 罗云建, 张小全, 王效科, 等. 森林生物量的估算方法及其研究进展[J]. 林业科学, 2009, **45**(8): 129 – 134.
LUO Yunjian, ZHANG Xiaoquan, WANG Xiaoke, *et al.* Forest biomass estimation methods and their prospects [J]. *Sci Silv Sin*, 2009, **45**(8): 129 – 134.
- [5] CONVERSE T E, BETTERS D R. Biomass yield equations for short rotation black locust plantation in the Central Plains [J]. *Biomass Bioenergy*, 1995, **8**(4): 251 – 254.
- [6] 王树力, 周建平. 基于机构方程模型的林分生长与影响因子耦合关系分析[J]. 北京林业大学学报, 2014, **36**(5): 7 – 12.
WANG Shuli, ZHOU Jianping. Coupling relationship between stand growth and impacting factors based on structural equation model [J]. *J Beijing For Univ*, 2014, **36**(5): 7 – 12.
- [7] 袁道先. 我国岩溶资源环境领域的创新问题[J]. 中国岩溶, 2015, **34**(2): 98 – 100.
YUAN Daoxian. Scientific innovation in karst resources and environment research field of China [J]. *Carsologica Sin*, 2015, **34**(2): 98 – 100.
- [8] 杜虎, 宋同清, 曾馥平, 等. 喀斯特峰丛洼地不同植被类型碳格局变化及影响因子[J]. 生态学报, 2015, **35**(14): 4658 – 4667.
DU Hu, SONG Tongqing, ZENG Fuping, *et al.* Carbon storage and its controlling factors under different vegetation types in depressions between karst hills, southwest China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2015, **35**(14): 4658 – 4667.
- [9] 贺庆棠, 陆佩玲. 中国岩溶山地石漠化问题与对策研究[J]. 北京林业大学学报, 2006, **28**(1): 117 – 120.
HE Qingtang, LU Peiling. Rocky desertification and its preventive strategies in karst regions of China [J]. *J Beijing For Univ*, 2006, **28**(1): 117 – 120.
- [10] NAGARAJA B C, SOMASHEKAR R K, RAJ M B. Tree species diversity and composition in logged and unlogged rainforest of Kudremukh National Park, South India [J]. *J Environ Biol*, 2005, **26**(4): 627 – 634.
- [11] 温远光, 雷丽群, 朱宏光, 等. 广西马山岩溶植被年龄序列的群落特征[J]. 生态学报, 2013, **33**(18): 5723 – 5730.
WEN Yuanguang, LEI Liqun, ZHU Hongguang, *et al.* Community characteristics in a chronosequence of karst vegetation in Mashan County, Guangxi [J]. *Acta Ecol Sin*, 2013, **33**(18): 5723 – 5730.

- [12] 朱宏光, 蓝嘉川, 刘虹, 等. 广西马山岩溶次生林群落生物量和碳储量[J]. 生态学报, 2015, **35**(8): 2616 – 2621.
ZHU Hongguang, LAN Jiachuan, LIU Hong, *et al.* Biomass and carbon storage of communities in secondary karst forests in Mashan county, Guangxi [J]. *Acta Ecol Sin*, 2015, **35**(8): 2616 – 2621.
- [13] 雷丽群. 广西马山岩溶植被不同演替阶段的群落结构与环境因子的关系[D]. 南宁: 广西大学, 2014.
LEI Liqun. *Relationship between Community Structure and Environmental Factors at Different Succession Stages of Karst Vegetation in Mashan, Guangxi*[D]. Nanning: Guangxi University, 2014.
- [14] CLARK J S. *Models for Ecological Data: An Introduction*[M]. Princeton: Princeton University Press, 2007.
- [15] MIAO S L, CARSTENN S, NUNGESSER M. *Real World Ecology: Large-scale and Long-term Case Studies and Methods*[M]. New York: Springer, 2009.
- [16] GRACE J B, ALLAIN L K, ALLEN C. Factors associated with plant species richness in a coastal tall-grass prairie [J]. *J Veg Sci*, 2000, **11**: 443 – 452.
- [17] 王西石, 储诚进. 结构方程模型及其在生态学中的应用[J]. 植物生态学报, 2011, **35**(3): 334 – 337.
WANG Youshi, CHU Chengjin. A brief introduction of structural equation model and its application in ecology [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2011, **35**(3): 334 – 337.
- [18] 周建平, 王树力. 基于结构方程模型的林分上下层间结构与树木多样性耦合关系研究[J]. 北京林业大学学报, 2015, **37**(9): 9 – 16.
ZHOU Jianping, WANG Shuli. Coupling relationship of structure and tree diversity between upper and lower canopy layer based on structural equation model [J]. *J Beijing For Univ*, 2015, **37**(9): 9 – 16.
- [19] SHIPIEY B, LECHOWICZ M J, WRIGHT I, *et al.* Fundamental trade-offs generating the worldwide leaf economics spectrum [J]. *Ecology*, 2006, **87**: 535 – 541.
- [20] LAMB E G, KEMBEL S W, CAHILL J F. Shoot, but not root, competition reduces community diversity in experimental mesocosms [J]. *J Ecol*, 2009, **97**: 155 – 163.
- [21] 吴卿, 刘哲, 陈子韶, 等. 浙川县石质荒漠化土地空间分布特征研究[J]. 中国水土保持, 2018(11): 33 – 36.
WU Qing, LIU Zhe, CHEN Zishao, *et al.* Spatial distribution characteristics of rocky desertification in Xichuan County [J]. *Soil Water Conserv China*, 2018(11): 33 – 36.
- [22] 周国逸, 尹光彩, 唐旭利, 等. 中国森林生态系统碳储量—生物量方程[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- [23] WANG Shuli, CHEN H Y H. Diversity of northern plantations peaks at intermediate management intensity [J]. *For Ecol Manage*, 2010, **259**: 360 – 366.
- [24] 吴明隆. 结构方程模型[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2009.
- [25] 方升佐, 田野. 人工林生态系统生物多样性与生产力的关系[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2010, **34**(6): 81 – 86.
FANG Shengzuo, TIAN Ye. The relationship between biodiversity and productivity in the artificial plantation ecosystem [J]. *J Nanjing For Univ Nat Sci*, 2010, **34**(6): 81 – 86.
- [26] BUTTLE J M, DILLON P J, EERKES G R. Hydrologic coupling of slopes, riparian zones and streams: an example from the Canadian Shield [J]. *J Hydrol*, 2004, **287**(1/4): 161 – 177.
- [27] SCHENK H J. Soil depth, plant rooting strategies and species' niches [J]. *New Phytol*, 2008, **178**(2): 223 – 225.
- [28] 文丽, 宋同清, 杜虎, 等. 中国西南喀斯特植物群落演替特征及驱动机制[J]. 生态学报, 2015, **35**(17): 5822 – 5833.
WEN Li, SONG Tongqing, DU Hu, *et al.* The succession characteristics and its driving mechanism of plant community in karst region, Southwest China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2015, **35**(17): 5822 – 5833.
- [29] LEHMAN C L, TILMAN D. Biodiversity, stability, and productivity in competitive communities [J]. *Am Nat*, 2000, **156**(5): 534 – 552.
- [30] 盛茂银, 熊康宁, 崔高仰, 等. 贵州喀斯特石漠化地区植物多样性与土壤理化性质[J]. 生态学报, 2015, **35**(2): 434 – 448.
SHENG Maoyin, XIONG Kangning, CUI Gaoyang, *et al.* Plant diversity and soil physical-chemical properties in karst rocky desertification ecosystem of Guizhou, China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2015, **35**(2): 434 – 448.
- [31] 傅伯杰, 刘国华, 陈利顶, 等. 中国生态区划方案[J]. 生态学报, 2001, **21**(1): 1 – 6.
FU Bojie, LIU Guohua, CHEN Liding, *et al.* Scheme of ecological regionalization in China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2001,

- 21(1): 1 – 6.
- [32] 姚长宏, 蒋忠诚, 袁道先. 西南岩溶区植被喀斯特效应[J]. 地球学报, 2001, 22(2): 159 – 164.
YAO Changhong, JIANG Zhongcheng, YUAN Daoxian. Vegetation karst effect in southwest karst area [J]. *Acta Geol Sin*, 2001, 22(2): 159 – 164.
- [33] 金星姬, 贾炜玮, 李凤日. 基于 BP 人工神经网络的兴安落叶松天然林全林分生长模型的研究[J]. 植物研究, 2008, 28(3): 370 – 374, 384.
JIN Xingji, JIA Weiwei, LI Fengri. Whole stand growth model for natural Dahurian larch forests based on BP ANN [J]. *Bull Bot Res*, 2008, 28(3): 370 – 374, 384.
- [34] 张江, 吕勇, 雷渊才, 等. 基于整体化理论的林木、林分生长模型模拟系统开发[J]. 中南林业科技大学学报, 2010, 30(7): 70 – 72, 90.
ZHANG Jiang, LÜ Yong, LEI Yuancai, *et al.* Tree growth model simulation system based on the overall theory [J]. *J Cent South Univ For Technol*, 2010, 30(7): 70 – 72, 90.

《工程索道》正式出版

周新年教授等著的《工程索道》是4门国家级精品课程配套教材与“十三五”国家重点出版物出版规划项目教材。2020年10月由机械工业出版社首次印刷出版。该书注重理论与实践的紧密结合,注重理论推导、工程设计和案例分析。在结合作者科研和教学实践的基础上,前2章阐明工程索道的基础理论和基本方法、基本结构和架设技术;后5章为客运索道装备与设计、滑索装备与设计、货运索道装备与设计、林业索道开发与设计、缆索起重机装备与设计等,主要阐述各种工程索道的配套装备与设计;最后一章为工程索道试验。该书对重要内容采用二维码集成视频教学资源,采用“纸质教材+数字课程”的出版形式,形成以纸质教材为核心,数字课程资源配合的综合知识体系。该书适用于交通运输、土木工程、森林工程、桥梁工程、采矿工程、冶金工程、水利水电工程、变电工程、环境工程、农业建筑与能源工程等专业教学,也可供工程索道的科研、工程设计和管理人员参考。