

Analysis of spatial structure and diversity distribution characteristics of artificial afforestation forest based on rocky desertification control in Dong 'an County

Weidong Zhang Jianping Zhang Xuejun Jiang

Forestry Bureau of Dong'an County, Dong'an, Hunan, 425900, China

Abstract

【 Objective 】 By analyzing the spatial structure index of the existing stands of different afforestation models of rocky desertification plantations, the spatial structure and diversity distribution characteristics of different artificial afforestation models were understood, so as to provide reference and suggestions for the formulation of follow-up management strategies for rocky desertification control plantations in counties and the promotion of forest biodiversity management in counties. 【 Method 】 The artificial afforestation forest of rocky desertification in the karst area along the Lengdong Highway in Dong 'an County was taken as the research object. The data of 17 standard sample plots were obtained by combining unmanned aerial vehicle remote sensing, GNSS receiver and field sample plot survey. The spatial structure indexes such as mingling degree, neighborhood comparison, angular scale, openness, Hegyi competition index, aggregation index and diversity indexes such as Shannon-Wiener index, Simpson diversity and evenness of five different modes of artificial afforestation for rocky desertification control (Cupressus funebris pure forest, Cupressus funebris + Melia azedarach mixed forest, Melia azedarach + Nerium indicum + Cupressus funebris mixed forest, Eucalyptus camaldulensis + Cupressus funebris + Melia azedarach mixed forest, Koelreuteria paniculata + Cupressus funebris + Nerium indicum mixed forest) were calculated by programming in Python, and the stand structure and diversity characteristics of different afforestation modes were analyzed. According to the idea of the coefficient of variation method, the weight is determined to comprehensively evaluate the spatial structure and diversity index of the sample plot. 【 Result 】 The mingling degree and neighborhood comparison of stand spatial structure in the study area were at a low level, and the isolation degree of tree species was poor. The angle scale and aggregation index showed that the distribution of forest trees was evenly distributed. The openness of the plot is at a high level, and the level of competition among trees is low. Shannon-Wiener index, Simpson diversity index and evenness index showed moderate variation or close to moderate variation level. The mingling index was significantly correlated with Specie richness, Margalef richness, Shannon-Wiener index and evenness ($P < 0.01$). The Hegyi competition index was significantly correlated with specie richness, Margalef richness, Shannon-Wiener index and evenness ($P > 0.05$). However, the average tree height, average DBH, forest age, altitude and Hegyi competition index were not correlated with specie richness, Margalef richness, Shannon-Wiener index and evenness index ($P > 0.05$). 【 Conclusion 】 Different afforestation models will have a significant impact on the spatial isolation (mingling) of tree species due to different tree species composition and configuration design. The effects of different afforestation models on DBH differentiation (size ratio), horizontal distribution pattern (angular scale), growth space (openness), competition intensity (Hegyi index) and distribution uniformity (aggregation index) were not significant. The effects of different afforestation models on diversity were different and showed convergence. The comprehensive evaluation of the spatial structure index and diversity index of the five different afforestation models were 1.326, 1.751, 2.018, 1.852 and 1.940, respectively. The stand spatial structure and diversity of Melia azedarach + Nerium indicum + Cupressus funebris afforestation model were the best (2.018), and the stand spatial structure and diversity of Cupressus funebris pure forest afforestation model were relatively poor (1.326).

Keywords

rocky desertification; artificial afforestation; spatial structure; analysis

基于东安县石漠化治理人工造林林分空间结构及多样性分布特征分析

张卫东 张建平 蒋学军

湖南省东安县林业局, 中国·湖南 东安 425900

摘 要

【目的】通过分析石漠化人工林不同造林模型现有林分的林分空间结构指数,了解不同人工造林模型林分空间结构、多样性分布特征,为县域石漠化治理人工林后续经营管理策略的制定和推进县域森林生物多样性经营提供参考与建议。【方法】以岩溶区石漠化人工造林林分为研究对象,通过无人机遥感、GNSS接收机和实地样地调查,获取17个标准样地数据,在Python中编程计算石漠化治理人工造林5种不同模式(柏木纯林、柏木+苦楝混交林、苦楝+夹竹桃+柏木混交林、赤桉+柏木+苦楝混交林、栎树+柏木+夹竹桃混交林)林分的混交度、大小比数、角尺度、开敞度、Hegyi竞争指数、聚集指数等空间结构指标及香农-维纳指数、辛普森多样性、均匀度等多样性指数,分析不同造林模式林分结构及多样性特征。根据权重对样地空间结构及多样性指数进行综合评价。【结果】研究区林分空间结构混交度、大小比数处于低水平,树种隔离程度差;角尺度和聚集指数显示,林分林木分布呈中等均匀分布;样地开敞度处于较高水平,林木之间竞争水平

程度低。香农-维纳指数、辛普森多样性指数、均匀度指数呈中等变异或接近中等变异水平。混交度指数与Specie丰富度、Margalef丰富度、香农-维纳指数、均匀度呈极显著相关 ($P < 0.01$) ,Hegyi竞争指数与pecie丰富度、Margalef丰富度、香农-维纳指数、均匀度呈显著相关 ($P < 0.05$) 。而平均树高、平均胸径、林龄、海拔与Hegyi竞争指数与pecie丰富度、Margalef丰富度、香农-维纳指数、均匀度各指数均不相关 ($P > 0.05$) 。【结论】不同造林模型会因树种组成和配置方式设计不同,对树种空间隔离(混交度)产生明显影响。不同造林模型对包括胸径分化(大小比数)、水平分布格局(角尺度)、生长空间(开敞度)、竞争强度(Hegyi指数)及分布均匀性(聚集指数)的影响尚不显著。不同造林模型对多样性的影响程度存在差异并表现出趋同性。综合评价5种不同造林模型林分空间结构指数与多样性指数综合值分别是1.326、1.751、2.018、1.852、1.940;苦楝+夹竹桃+柏木造林模型的林分空间结构与多样性最优(2.018),柏木纯林造林模型的林分空间结构与多样性相对较差(1.326)。

关键词

石漠化; 人工造林; 空间结构; 分析

1 引言

目前,人工林已成为陆地生态系统的主要组成部分,在修复和重建森林生态系统、产出林产品、提高森林碳汇、保护自然环境等方面发挥着关键性作用^[1]。喀斯特石漠化是亚热带地区的一种土地退化过程^[2-4],主要特点为岩石逐渐裸露、水土流失、土地生产力衰退等^[5-6]。东安县地处南岭山系向湘中丘陵过渡地带,为越城岭向零祁盆地过渡区,全县石漠化面积12499.35公顷,潜在石漠化面积30319.86公顷。按石漠化程度分,其中轻度石漠化面积6207.21公顷,占49.66%;中度石漠化面积5809.23公顷,占46.47%;重度石漠化面积476.64公顷,占3.82%;极重度石漠化面积6.25公顷,占0.05%^[7]。2012年起,东安县林业主管部门采取人工造林和封山育林措施完成了井头圩镇冷东公路沿线所有石漠化土地植被恢复任务。林分结构是由各种生物和非生物因素决定的,如树种组成特征、气候、土壤和干扰等,从而显示出森林的动态变化及其稳定性,可从林分空间结构与林分非空间结构综合表现林分现状^[8-9]。林分结构不仅是森林生态系统的主要特征,也是评估森林生态系统结构与功能的重要指标,能较为直接且全面地反映出森林的发展态势^[10],并且决定林分的发展方向,林分结构的合理性越高,其稳定性及其功能就越强^[11]。选用客观合理的方式对林分结构进行评价,可为制定和完善以“提升森林质量、实现森林多功能”为主旨的科学经营管理措施提供有力的理论支持^[12]。当前,东安县仍是全省石漠化治理项目县之一,了解先前石漠化治理人工林林分空间结构及多样性特征,可为拟实施项目制定主要营造林技术措施提供参考。本次研究,主要是通过分析石漠化人工林不同造林模型现有林分的林分空间结构指数,了解不同人工造林模型林分空间结构、多样性分布特征,为县域石漠化治理人工林后续经营管理策略的制定和推进县域森林生物多样性经营提供参考与建议。

【作者简介】张卫东,本科,高级工程师,从事森林经营与培育研究。

2 材料与方法

2.1 研究区概况

试验区位于东安县境域中东部,包含井头圩镇八字门村、满竹村、古楼兰家村、宝鱼村等,介于北纬26° 21'3.08"~26° 24'20.28"、东经111° 22' 22.14"~111° 22'48.88"之间;整体地貌为丘陵山地,山地土壤多为石灰岩发育的红色石灰土和钙质泥岩发育的黑色石灰土(俗称钙质土)。红色石灰土呈地带性分布,黑色石灰土呈斑块状分布。黑色石灰土原多为荒山荒地,个别地段土层薄,表面仍为钙质泥岩的片状风化物,土层仅有2-5厘米,草类覆盖率低。现有植被灌木多为牡荆、小果蔷薇、火棘、云实、榿木,草类植被以白茅、败酱、地榆、苔藓为主,植被丰富度较低。

2.2 样地选取与数据采集

随机在冷东公路沿线石漠化人工造林项目区设计17个样地(样地规格为20*25米),共涉及有五种造林模式,造林模型分别是柏木(*Cupressus funebris* Endl.)纯林(造林模型号为Ⅰ,下同)、柏木+苦楝(*Melia azedarach* L.)混交林(造林模型号为Ⅱ,下同)、苦楝+夹竹桃(*Nerium indicum*)混交林(造林模型号为Ⅲ,下同)、柏木+赤桉(*Eucalyptus camaldulensis* Dehnh.)混交林(造林模型号为Ⅳ,下同)、栎树(*Koelreuteria paniculata* Laxm.)+柏木混交林(造林模型号为Ⅴ,下同);其中2012年人工造林样地3块,2015年人工造林样地2块,2017年人工造林样地12块。

利用大疆无人机DJI Air 3S分别对样地分布区内林分进行飞拍,通过Pix4Dmapper4.2进行航片处理,在Arcmap10.2内设定样地四至,标记样木并编号,提取样木冠幅面积。外业根据样地样木编号原始表补充调查样地乔木树种、测量乔木树种胸径、树高等基本参数;利用GNSS接收机(UniStrong)和移动终端补测与登记林下乔木的地理坐标、编号,同步完成树种胸径、树高、冠幅等测量。同时,每个样地内随机布设5个1*1米的草木样方,并记录各样方内乔木幼苗、灌木、草本植物名称及株数。再次在Arcmap

内完善各样地样木的基本信息。

样地基本因子如表 1:

表 1 样地基本特征

样地号	海拔	坡度	母岩	土壤类型	土层厚度	树种组成	林龄	平均胸径	平均树高	密度	郁闭度	岩石裸露度
1	172	10	钙质泥岩	黑色石灰土	45	5 柏木 +5 苦楝	8	3.8	3.1	1740	0.20	10
2	175	5	石灰岩	红色石灰土	45	10 柏木	8	5.8	2.9	2200	0.39	10
3	175	5	石灰岩	红色石灰土	35	7 栾树 +2 柏木 +1 夹竹桃	8	5.4	3.0	1500	0.26	35
4	175	5	石灰岩	红色石灰土	45	6 苦楝 +3 夹竹 桃 +1 柏木	8	5.7	2.6	1520	0.32	25
5	180	5	石灰岩	红色石灰土	35	5 柏木 +5 苦楝	8	5.0	3.3	1380	0.22	35
6	187	6	石灰岩	红色石灰土	35	10 柏木	8	5.5	3.1	1160	0.20	35
7	190	10	钙质泥岩	黑色石灰土	30	7 柏木 +3 苦楝	8	1.8	2.2	1240	0.23	50
8	197	5	钙质泥岩	黑色石灰土	45	10 柏木	8	8.1	4.1	2120	0.24	10
9	185	5	钙质泥岩	黑色石灰土	45	10 柏木	8	7.9	4.2	1520	0.22	10
10	175	5	钙质泥岩	黑色石灰土	65	7 赤桉 +2 柏木 +1 苦楝	13	11.9	9.5	2320	0.59	10
11	190	10	钙质泥岩	黑色石灰土	35	10 柏木	13	9.1	4.8	1260	0.24	10
12	200	5	钙质泥岩	黑色石灰土	5	10 柏木	8	3.7	3.3	800	0.10	70
13	195	10	钙质泥岩	黑色石灰土	35	10 柏木	10	8.7	5.2	1420	0.20	35
14	200	5	钙质泥岩	黑色石灰土	35	10 柏木	10	8.0	4.9	1680	0.20	35
15	175	5	石灰岩	红色石灰土	55	10 柏木	8	6.9	3.9	1440	0.20	10
16	178	5	石灰岩	红色石灰土	55	10 柏木	8	6.6	3.7	1140	0.20	10
17	170	5	钙质泥岩	黑色石灰土	55	10 柏木	13	10	6.9	1360	0.42	10

注: 柏木 (Cupressus funebris Endl.); 苦楝 (Melia azedarach L.); 栾树 (Koelreuteria paniculata Laxm.); 夹竹桃 (Nerium oleander L.); 赤桉 (Eucalyptus camaldulensis Dehnh.)

2.3 研究方法

2.3.1 林分空间结构基本参数选择

本研究选择混交度 (Mingling Degree)、大小比数 (Dominance Ratio)、角尺度 (Uniform Angle Index)、开敞度 (Canopy Openness)、Hegyi 竞争指数 (Hegyi Competition Index)、聚集指数 (Aggregation Index R) 等指数进行林分空间结构分析; 利用香农 - 维纳指数 (Shannon-Wiener Index)、辛普森多样性指数 (Simpson's Diversity Index)、均匀度 (Equitability) 分析林分多样性。

2.3.2 数据计算

利用 Arcmap10.2 完成各样地样木的地理坐标值 (X,Y) 计算, 完成样木冠幅的提取, 然后将样木冠幅面积数据 (面图层) 与样木其他数据 (点图层) 联结, 导出数据并转换为 csv 数据, 再通过 Python3.7 编程代码计算出各样地林分空间结构、多样性指数值及数据均值、标准差、变异系数数值。林分空间结构各项指标数据计算方法参考王宏翔^[13]、廖彩霞^[14]、曹小玉^[15]等研究方法进行计算 (4 邻木)。多样性指数计算公式如下:

$$\text{香农 - 维纳指数: } D=1-\sum_{i=0}^s p_i^2$$

$$\text{Pielou 均匀度指数: } J_H=\frac{-\sum_{i=0}^s P_i \ln P_i}{\ln N}$$

$$\text{Magaler 丰富度指数: } H=(S-1)/\ln N$$

郁闭度数值为样地样木冠幅之和与样地面积比。利用无人机遥感提取林木冠幅, 乔正年^[16]等人有过研究,

且成本低, 总体精度较高。同时, 数据处理充分利用了 Excel_2019 软件。

3 结果与分析

3.1 不同造林模型林分空间结构与多样性分析

根据样木样方调查表通过 Python3.7 编程代码计算后得到表 2 数据。

从表 2 可知, 不同造林模式的混交度指数介于 0-0.536 之间, 均值 0.367, 变异系数 59.6%, 高变异, 说明不同造林模式对林分林木空间分布影响明显。各造林模型间林木相邻之间混交度Ⅲ>Ⅴ>Ⅱ>Ⅳ>Ⅰ。

大小比数介于 0.470-0.509 之间, 且变异系数仅为 3.11%, 低变异, 说明不同造林模式目前各林分林木胸径生长相对均衡, 没有因造林模式不同而产生太多的影响。各造林模型间林木大小比分化程度Ⅳ>Ⅰ>Ⅴ>Ⅱ>Ⅲ。

角尺度指数介于 0.593-0.737, 均值 0.646, 变异系数为 8.98%, 低变异, 说明样地内林木呈相对均匀分布, 不同造林模式对林分林木空间分布影响暂不明显。各造林模型间林木空间分布均匀程度Ⅰ>Ⅱ>Ⅴ>Ⅳ>Ⅲ。

开敞度指数介于 1.543-1.916 之间, 均值 1.823, 变异系数为 8.83%, 低变异, 说明所有样地林木目前生长空间均很充足; 但不同造林模式对林分内光照和林木之间生长空间影响暂不明显。各造林模型间林木空间开敞度Ⅱ>Ⅲ>Ⅰ>Ⅴ>Ⅳ。

表2 不同造林模式林分空间结构指数均值及多样性指数均值

造林模型	混交度	大小比数	角尺度	开敞度	Hegyi 竞争指数	聚集指数	丰富度	丰富度	香农-维纳指数	辛普森多样性指数	均匀度
I (柏木纯林)	0.000	0.482	0.593	1.916	3.143	1.430	7.9	1.916	1.013	0.461	0.489
II (柏木+苦楝)	0.425	0.473	0.607	1.882	3.940	1.431	9.0	1.882	1.640	0.757	0.748
III (苦楝+夹竹桃+柏木)	0.536	0.470	0.737	1.935	4.425	1.509	11.0	1.935	1.873	0.788	0.781
V (赤桉+柏木+苦楝)	0.351	0.509	0.664	1.543	5.379	1.487	10.0	1.543	1.339	0.614	0.581
IV (栎树+柏木+夹竹桃)	0.523	0.483	0.627	1.837	4.922	1.423	10.0	1.837	1.614	0.720	0.701
均值 average	0.367	0.483	0.646	1.823	4.362	1.456	9.580	1.823	1.496	0.668	0.660
标准差 Standard deviation	0.219	0.015	0.058	0.161	0.868	0.039	1.176	0.161	0.330	0.133	0.122
变异系数 Coefficients of variation/%	59.67	3.11	8.98	8.83	19.9	2.68	12.28	8.83	22.06	19.91	18.48

注：变异系数 CV<20% 为低变异，20%-50% 为中等变异，>50% 为高变异

Hegyi 竞争指数介于 3.143-5.379 之间，变异系数 19.9%，低变异，说明不同造林模式之间林分林木竞争关系已相对产生，同时说明竞争关系因造林模式影响暂不明显；5 种不同造林模式中，柏木纯林（I 型）造林模式林木之间竞争关系最弱，赤桉+柏木+苦楝（IV 型）造林模式林木之间竞争关系最强。各造林模型间林木竞争关系 $IV > III > V > I > II$ 。

聚集指数介于 1.423-1.509，变异系数为 2.68%，低变异，说明所有样地林木均匀分布特征明显，但不同造林模式对林分内林木空间分布均匀性影响不明显。各造林模型间均匀分布特征 $II > V > I > IV > III$ 。

Species 丰富度指数介于 7.9-11 之间，变异系数 12.28%，低变异，说明所有样地物种次数相对稳定，但不同造林模型对林分内林木因选择多树种混交而存在一定影响。各造林模型间 Species 丰富度指数 $III > V > IV > II > I$ 。

Margalef 丰富度指数介于 1.546-1.935 之间，变异系数 8.83%，低变异，说明所有样地物种次数相对稳定，但不同造林模式对林分内林木因选择多树种混交而存在一定影响，但因 Margalef 丰富度指数考虑了个体差异，Margalef 丰富度指数与 Species 丰富度在不同各造林模型间表现不完全一致。Margalef 丰富度指数在不同造林模型间显示： $III > I > V > II > IV$ 。

香农-维纳指数介于 1.03-1.873 之间，变异系数 22.06，中等变异。说明不同模型间生物多样性在物种组成与结构上存在差异。中等程度的变异表明，不同造林模型因不同树种配置、密度、混交方式造成了样地在物种丰富度和均匀度上产生了不同效果。其中： $III > II > V > IV > I$ 。

辛普森多样性指数介于 0.461-0.788 之间，变异系数 19.91%，接近中等变异水平。说明不同造林模型下，柏木纯林（I 型）样地的优势种相对更明显（值接近 0.461），

而苦楝+夹竹桃+柏木（III 型）样地的物种分布则相对更均匀（值接近 0.788）；不同造林模型间物种分布均匀性： $III > II > V > IV > I$ 。

均匀度指数介于 0.489-0.781 之间，变异系数 18.48%，接近中等变异水平，表明不同模型因树种组成不同导致了样地内物种个体数量分布均匀性产生差异。苦楝+夹竹桃+柏木（III 型）样地各物种个体数相对更均衡（接近 0.781）；而柏木纯林（I 型）则表现出因纯林而出现少数物种个体数占比较高（接近 0.489）。不同模型间物种分布均匀性： $III > II > V > IV > I$ 。

从上述分析可知，空间结构各指数之间因体现方向不一，不同造林模型空间结构优劣难以得出综合性判定；多样性指数则因不同造林模型之间树种组成差异对多样性差异影响呈趋同性，如苦楝+夹竹桃+柏木（III 型）样地的多样性均明显优于柏木纯林（I 型）样地。

3.2 空间结构与多样性综合权重取值与综合评价

为此，在此根据变异系数法的思想^[28]确定各指数权重来综合判断不同造林模型之间的空间结构与多样性的优劣性。该思想通过计算各参数内的差异程度来确定指数权重的大小，差异度越大权重值越大。本研究采用不同造林模型下 11 个指数均值的变异系数值来确定权重，即某一指数的权重值为某一指数变异系数除以所有指数变异系数之和。

从表 3 可知，柏木纯林、柏木+苦楝、苦楝+夹竹桃+柏木、赤桉+柏木+苦楝、栎树+柏木+夹竹桃等五种不同造林模型按权重后计算指数综合值分别为 1.326、1.751、2.018、1.852、1.940。

不同造林模型的指数综合值： III （苦楝+夹竹桃+柏木） $> V$ （栎树+柏木+夹竹桃） $> IV$ （赤桉+柏木+苦楝） $> II$ （柏木+苦楝） $> I$ （柏木纯林）。

3.3 样地空间结构因子与多样性指数的相关性分析

由表 4 可知，本研究混交度指数与 Specie 丰富度、Margalef 丰富度、香农 - 维纳指数、均匀度呈极显著相关 ($P < 0.01$)，Hegyi 竞争指数与 pecie 丰富度、Margalef 丰富度、

香农 - 维纳指数、均匀度呈显著相关 ($P < 0.05$)。而平均树高、平均胸径、林龄、海拔与 Hegyi 竞争指数与 pecie 丰富度、Margalef 丰富度、香农 - 维纳指数、均匀度各指数均不相关 ($P > 0.05$)。

表 3 不同造林模型空间结构与多样性指数权重、加权值及指数综合值

造林模型	混交度	大小比数	角尺度	开敞度	Hegyi 竞争指数	聚集指数	丰富度	丰富度	香农 - 维纳指数	辛普森多样性指数	均匀度	指数综合值
I (柏木纯林)	0.000	0.008	0.029	0.092	0.339	0.021	0.525	0.092	0.121	0.050	0.049	1.326
II (柏木 + 苦楝)	0.137	0.008	0.030	0.090	0.424	0.021	0.598	0.090	0.196	0.082	0.075	1.751
III (苦楝 + 夹竹桃 + 柏木)	0.173	0.008	0.036	0.092	0.477	0.022	0.731	0.092	0.224	0.085	0.078	2.018
V (赤桉 + 柏木 + 苦楝)	0.113	0.009	0.032	0.074	0.579	0.022	0.665	0.074	0.160	0.066	0.058	1.852
IV (栎 + 柏木 + 夹竹桃)	0.169	0.008	0.030	0.088	0.530	0.021	0.665	0.088	0.193	0.078	0.070	1.940
权重 Weight	0.3230	0.0168	0.0486	0.0478	0.1077	0.0145	0.0665	0.0478	0.1194	0.1078	0.1000	

表 4 样地结构因子与多样性指数的相关性分析

林分结构 Stand structure	Specie 丰富度	香农 - 维纳指数	均匀度	Margalef 丰富度
	SpeciesRichness	ShannonWienerIndex	Equitability	MargalefIndex
林分密度 StandDensity	0.114	-0.135	-0.212	-0.144
郁闭度 CanopyDensity	0.554	0.326	0.189	0.444
开敞度 CanopyOpenness	-0.554**	-0.326	-0.189	-0.444**
平均树高 AvgHeight_m	-0.429	-0.523**	-0.521**	-0.402
平均胸径 AvgDiameter_cm	-0.236	-0.446	-0.51	-0.25
林龄 Age_year	-0.252	-0.27	-0.257	-0.162
土层厚度 SoilDepth_cm	0.133	0.039	0.017	0.076
海拔 Altitude_m	-0.418	-0.489	-0.461	-0.371
坡度 Slope_deg	-0.082	0.088	0.115	-0.003
苦岩裸露度 RockExposure_percent	0.017	0.092	0.113	0.078
混交度 MinglingDegree	0.704**	0.812**	0.783**	0.654**
大小比数 DominanceRatio	-0.096	-0.070	-0.087	-0.115
角尺度 UniformAngleIndex	0.141	0.059	0.012	0.025
Hegyi 竞争指数 HegyiCompetitionIndex	0.525*	0.326*	0.250*	0.292*

* 表示 $p < 0.05$ ；** 表示 $p < 0.01$

4 结论与讨论

4.1 结论

本次研究表明，不同造林模型并非对所有样地的林分空间结构指数产生同等程度的影响，但不同造林模型对样地多样性的影响表现出趋同性。

不同造林模型会因树种组成和配置方式设计不同，对树种空间隔离（混交度）产生明显影响。混交度指数高达 59.6% 的变异系数表明，说明不同造林模式的树种组成与配置方式是影响林分内不同树种个体空间隔离与混合程度的决定性因素。不同造林模型对包括胸径分化（大小比数）、水平分布格局（角尺度）、生长空间（开敞度）、竞争强度

（Hegyi 指数）及分布均匀性（聚集指数）的影响尚不显著。这些指标的变异系数均低于 20%（尤其在 2.68%-19.9% 之间），说明在当前林分发展阶段，不同造林模式对这些结构性特征的影响尚不显著。

不同造林模型对多样性的存在影响，并表现出趋同性。香农 - 维纳指数达到中等变异水平，辛普森多样性指数和均匀度指数均接近中垂变异水平，不同造林模型不仅在整体物种多样性上产生了明显差异，而且在影响物种优势度与均匀度方面已表现出显著的、接近中等程度的分化趋势。

不同造林模型的空间结构与多样性指数综合值呈以下关系，III（苦楝 + 夹竹桃 + 柏木）> V（栎树 + 柏木 + 夹竹桃）> IV（赤桉 + 柏木 + 苦楝）> II（柏木 + 苦楝）> I（柏

木纯林)。

综合上述指标判断,研究区林分整体上属于经过人工措施形成的简单结构人工纯林和树种构成极为有限的混交林。其当前结构是造林初始设计和后续管理措施共同作用的历史产物,虽在实现植被恢复上取得了一定的成效,但与构建一个结构复杂、功能完备、能够自我维持的森林生态系统尚有巨大差距。综合评价5种不同造林模型,苦楝+夹竹桃+柏木造林模型的分空间结构与多样性最优,柏木纯林造林模型的分空间结构与多样性相对较差,5种不同造林模型之间林分空间结构与多样性优劣形成以下关系,Ⅲ(苦楝+夹竹桃+柏木)>Ⅴ(栎树+柏木+夹竹桃)>Ⅳ(赤桉+柏木+苦楝)>Ⅱ(柏木+苦楝)>Ⅰ(柏木纯林)。

在影响多样性指数上,混交度指数与Specie丰富度、Margalef丰富度、香农-维纳指数、均匀度呈极显著相关($P < 0.01$),Hegyi竞争指数与pecie丰富度、Margalef丰富度、香农-维纳指数、均匀度呈显著相关($P < 0.05$)。

4.2 讨论

空间结构指数与分析对于人工林后期经营具有很强的指导意义。林分空间结构在很大程度上决定着林分当前健康状态和未来的发展方向,影响着林木之间的竞争、大小差异、更新、生长及死亡^[13]。通过调整森林结构达到发挥森林多功能的理念越来越得到大家的认可^[29]。

本次研究发现,钙质泥岩发育的黑色石灰土因土壤发育不完全、土层薄、透水性差,植被较单一,部分地块土壤表层仍为风化物、无植被;柏木因其具有生长快速、根系发达、耐寒抗旱、易成活等特性,能够适应贫瘠土壤和干旱气候等恶劣的环境^[30]。通过人工营造柏木纯林,表现出成活率高、中期生长优势明显等特征。特别是土壤表面多为钙质风化物的地段,采取机械挖大穴回填客土,种植点整成鱼鳞坑提高柏木成活率和后期落叶落果的保持,可促进土壤结构优化和幼苗生长。所以柏木目前仍然是东安县石漠化治理的主要树种之一;但柏木纯林混交度和植物多样性低,易发生病虫害,会导致林木生长状态不良^[31]。苦楝根系发达,具有明显的深根性和一定侧根扩展能力、较强的环境适应性和抗逆性^[32-33],在红色石灰土样地表现具有较好生长势,但在黑色石灰土中生长表现一般。夹竹桃根系细根数量多,可有效提高边坡表层土体抗冲刷和抗侵蚀能力,达到稳固土体和改良土壤的效果^[34-35]。在研究区石灰岩发育的红色石灰土林分中表现出成活率高、冠幅大、生长势。栎树,喜生长于石灰石风化产生的钙基土壤中^[36],在研究区红色石灰土样地表现具有较好生长势,但在黑色石灰土中生长呈失败趋势。赤桉,喜阳,耐干旱,稍耐寒^[37]。对土壤适应能力比其它桉树强,在pH值8的碱性土上,生长良好。在研究区林分中树高生长和胸径生长指标均明显优于柏木、苦楝、栎树和夹竹桃等树种。但因东安为国家重点生态功能区,赤桉暂不建议用于造林。

本次研究也发现,在钙质泥岩等难造林地段营造柏木纯林,植被恢复成效虽然明显,但纯林林分整体多样性低、生态系统结构简单、功能脆弱等特征也同样明显,同时也表现出在治理前期阶段,其治理模式与促进生物多样性经营理念存在冲突。在后期经营上,应把培育林分多样性作为林分经营的主要方向。通过实施森林精准提质项目,有计划地开展补植改造,补植更多耐干旱、瘠薄的乔木、灌木,重点采取补植以黄连木^[38]、青冈栎^[39]等乡土阔叶树种,渐进式提高林分混交度和培育复层异龄林,在实现结构优化和物种丰富的同时,推动人工林自我维持能力的提升,最大化利用空间和资源,确保生态系统稳定性提升。

4.3 研究价值与展望

本研究不仅明确了现状问题,其方法与结论在指导后期森林经营上也具有一定的价值。现有研究数据为后期样地的生物多样性差异对土壤理化性质、水文功能、病虫害发生率、碳汇能力等对比性研究提供基础数据。通过Arcgis建立的样地、样木地理信息化数据,可为当地石漠化人工林成效动态评估长期定位对比观测、精确量化奠定基础。

参考文献

- [1] 倪晓薇.喀斯特地区3种林分土壤养分分布特征研究[D].长沙:中南林业科技大学.2017
- [2] WANG S,LI Y.Problems and development trends about researches on karst rocky desertification [J]. Advances in Earth Science,2007,22(6):573.
- [3] 李阳兵,王世杰,容丽.关于喀斯特石漠和石漠化概念的讨论[J].中国沙漠,2004,24(6):689-695.
- [4] Ma T,Deng X ,Chen L,et al. The soil properties and their effects on plant diversity in different degrees of rocky desertification[J]. Science of The Total Environment ,2020,736:139667.
- [5] 王建宇. 贵州石漠化区植被恢复及树种选择技术研究进展 [J]. 绿色科技, 2018(04):18-24.
- [6] 邱丽琼,朱宁华,周光益,等.武陵山石漠化地区人工混交林空间结构研究[J].湖南林业科技,2021,48(05):47-52+57.
- [7] 东安县岩溶地区第四次石漠化调查报告,2021.
- [8] CUI R R, QI S,WU B C,et al.The influence of stand structure on understory herbaceous plants species diversity of Platycladus orientalis plantations in Beijing,China[J]. Forests ,2022,13(11):1921.
- [9] AHMAD B, WANG Y H,HAO J,et al.Variation of carbon density components with overstory structure of larch plantations in northwest China and its implication for optimal forest management[J].Forest Ecology and Management,2021,496:119399.
- [10] LI Y F,HUI G Y,ZHAO Z H,et al.The bivariate distribution characteristics of spatial structure in natural Korean pine broadleaved forest[J].Journal of Vegetation Science, 2012,2,23(6):1180-1190.

- [11] WANG N,BI H X,PENG R D,et al.The strategy for optimizing the stand structure of Pinus tabuliformis Carr forests to enhance the ecological function on the Loess Plateau,China[J]. Forests,2022,13(8):1217.
- [12] 张泽莲 曹小玉 等,基于最小数据集的杉木林林分结构评价[J]. 中南林业科技大学学报,2025(5):45
- [13] 王宏翔,胡艳波 等,林分空间结构参数一角尺度的研究进展[J]. 林业科学研究,2024,24(6):841-847
- [14] 廖彩霞,吴瑶 等,林分空间结构的研究[J]. 林业科技情报, 2007(2):40-41
- [15] 曹小玉,李际平,林分空间结构指标研究进展[J]. 林业资源管理,2016(8):65-73
- [16] 乔正年,马骏,徐雁南,无人机遥感在林木冠幅提取中的应用[J]. 林业资源管理,2019(1):78-84
- [17] von Gadow K,Fueldner K.Zur Methodik der Bestandesbeschreibung[R].Vortrag Anlaesslich der Jahrestagungder A Forsteinrichtung in Klieken b.Dessau,1992.
- [18] 盈惠刚,Klaus von Gadow,Matthias Albert.一个新的林分空间结构参数—大小比数[J].林业科学研究,1999,12(1):1-6
- [19] 张林等.侧柏人工林林分空间结构对林下草本多样性的差异性影响及其关联度[J].生态环境学报,2022(9):98
- [20] 惠盈刚.角尺度——一个描述林木个体分布格局的结构参数[J].林业科学,1999,35(1):37-42
- [21] 张君钰,杨培华,李卫忠,等.油松林林分空间结构分析及评价指数构建[J].西北林学院学报,2020,35(5):166-172
- [22] 潘磊,长白落叶松人工林树冠形态及其与径向生长关系研究[D].北京林业大学,2021
- [23] Clark P J,Evans F C.Distance to nearest neighbor as a measure of spatial relationships in population[J].Ecology,1953,35:335-353
- [24] SHANNON C E. A mathematical theory of communication[J]. Bell System Technical Journal, 1948, 27: 379-423.
- [25] 吴冬秀等.陆地生态系统生物观测指标与规范[M].中国环境出版集团,2019.10.44
- [26] Pielou E C. The measurement of diversity in different types of biological collections[J].Journal of Theoretical Biology,1966,13:131-144.
- [27] 李永福,惠刚盈,赵中华等.天然阔叶红松林空间结构的双变量分布特征[J].植被生态学报,2012,23(6):1180-1190.
- [28] 马建琴,何胜,郝秀平,等.基于层次分析和变异系数法的土壤含水率计算[J].人民黄河,2015,37(9):135-139.
- [29] 惠刚盈,KLAUS VON Gadow,胡艳波,等.结构化森林经营[M].北京:中国林业出版社,2007.
- [30] 肖帆,包维楷等.川中丘陵区柏木人工林群落类型及特征.四川林业科技[J].2025,(6):100-110
- [31] 谢雨彤 等.低效柏木林窗改造模式下香椿细根分解及其养分释放[J].应用与环境生物学报.2018,(3):525-532
- [32] 单海芝.苦楝在盐碱地引种栽培的适应性及生理响应机制研究[J].新农民,2025.33:99-101
- [33] 苗海霞,孙明高,夏阳,等.盐胁迫对苦楝根系活力的影响[J].山东农业大学学报,2005,36(1):9-12.
- [34] 嵇晓雷,杨平,夏光辉.夹竹桃根系力学性能研究[J].科学技术与工程,2018(18):110-115.
- [35] 朱澳云等.六种观赏植物根际土壤微生物菌群结构分析[J].湖南生态科学学报,2021(01):14-22.
- [36] 刘与明,黄全能主编.园林植物1000种[M].福建科学技术出版社,2012.03:281.
- [37] 中国树木志编委会.中国主要树种造林技术(上册[M]).农业出版社,1978年01月第1版,第484-488页.
- [38] 龙江慧.桂林岩溶常绿阔叶混交林树种与树皮功能性状研究[D].广西师范大学,2025:1-83.
- [39] 邓平,吴敏,林丁,等.干旱-复水对桂西北喀斯特地区青冈东幼苗叶片光合作用能力、叶绿素荧光和显微结构的影响,西北植物学报[J].2024,44(01):63-77