

河南省淅川县岩溶区不同恢复年限天然次生林植物群落特征

王磊¹, 崔明¹, 周梦玲², 赵晓东³, 闫伟鹏⁴, 武建宏⁴, 刘玉国¹

(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. 河南林业职业学院, 河南 洛阳 417002; 4. 河南省淅川县林业局, 河南 淅川 474450)

摘要: 【目的】研究南水北调中线渠首岩溶区不同恢复年限天然次生林群落物种组成、生物多样性与结构特征, 了解岩溶区植被现状, 为区域植被保护与修复、生物多样性保护和石漠化综合治理与评估提供科学依据。【方法】采用“空间代替时间”的研究方法, 以河南省淅川县岩溶区 6 种林龄 (20、28、35、40、53、70 a) 天然次生林为研究对象, 按照森林群落调查方法调查乔木层、灌木层及草本层, 计算群落物种重要值、多样性指数、群落结构和群落相似系数。【结果】在 18 个固定样地 10 800 m² 区域内, 共调查到维管束植物 63 种, 隶属 40 科 58 属; 随着恢复年限增加, 物种丰富度不断增加, 增加的物种多为单科单属单种。各个层物种多样性指数随着恢复年限增加表现出不同的特点, 但总体表现为缓慢上升; 乔木层 Shannon 多样性指数、Simpson 多样性指数及 Pielou 均匀度指数均以 P₅ 样地 (恢复时间 53 a) 最大, P₁ 样地 (恢复时间 20 a) 最小; 灌木层和草本层的 Shannon 多样性指数、Simpson 多样性指数缓慢上升。Jaccard 相似性系数结果表明: 不同恢复年限的样地间为极不相似水平, 物种组成差异性较高; 除密度外, 群落平均高度、盖度、胸径等结构在恢复 20 和 70 a 以上存在显著差异 ($P < 0.05$), 其余恢复年限样地之间差异不显著。【结论】相对于西南岩溶区, 南水北调中线渠首岩溶区物种丰富度较低, 群落均以栓皮栎 *Quercus variflora* 为建群种, 单科单属单种居多, 群落间差异性较大, 岩溶区植被恢复后期植被生长缓慢, 树高和胸径主要集中在 II 和 III 级。图 2 表 5 参 34

关键词: 森林生态学; 岩溶; 天然次生林; 生物多样性; 群落结构; 群落相似性

中图分类号: S718.5 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2020)04-0720-09

Plant community characteristics of natural secondary forest with different restoration years in karst area of Xichuan County, Henan Province

WANG Lei¹, CUI Ming¹, ZHOU Mengling², ZHAO Xiaodong³, YAN Weipeng⁴, WU Jianhong⁴, LIU Yuguo¹

(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. Henan Forestry Vocational College, Luoyang 417002, Henan, China; 4. Xichuan Forestry Bureau of Henan Province, Xichuan 474450, Henan, China)

Abstract: [Objective] This study aims to investigate the species composition, biological diversity and structural characteristics of natural secondary forest communities with different restoration ages in the karst area at the head of canal in the middle route of the South-to-North Water Diversion Project, and to understand the vegetation status in the karst area, so as to provide scientific basis for regional vegetation protection and restoration, biodiversity protection and comprehensive management and evaluation of rocky desertification. [Method] Using the research method of “space instead of time”, and taking 6 kinds of natural secondary forests (20, 28, 35, 40, 53, 70 a) in the karst area of Xichuan County as the research object. The tree layer, shrub layer and herb layer were investigated according to the method for forest community

收稿日期: 2019-10-08; 修回日期: 2020-03-24

基金项目: “十三五”国家重点研发计划项目 (2016YFC0202500, 2017YFC0502504); 南水北调水源地丹江口库区石漠化治理效益监测 (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

survey, and the important value of community species, diversity index, community structure and community similarity coefficient were calculated. [Result] A total of 63 species of vascular plants belonging to 40 families and 58 genera were found in 18 fixed plots of 10 800 m². With the increase of recovery years, the species richness increased continuously, and most of the increased species belonged to single family, single genus and single species. The species diversity index of each layer showed different characteristics with the increase of recovery years, but the overall trend was slowly rising. Shannon diversity index, Simpson diversity index and Pielou evenness index of tree layer were the highest in P₅ plots (recovery time 53 a), and the lowest in P₁ plots (recovery time 20 a). Shannon diversity index and Simpson diversity index of shrub layer and herb layer increased slowly. The results of Jaccard similarity coefficient showed that there was a very different level of similarity between plots with different recovery years, and the species composition was quite different. Except for the density, there were significant differences in community average height, coverage, DBH and other structures between 20 and 70 a after restoration ($P < 0.05$), and there was no significant difference among the others. [Conclusion] Compared with the karst areas in southwest China, the species richness in the karst area at the head of canal in the middle route of the South-to-North Water Diversion Project is relatively low, and *Quercus variflora* is the dominant species in the communities, with single family, single genus and single species being the majority, and the difference between communities is large. In the later period of vegetation restoration in the karst area, vegetation grows slowly, and the tree height and DBH are mainly concentrated in grade II and III. [Ch, 2 fig. 5 tab. 34 ref.]

Key words: forest ecology; karst; natural secondary forest; biodiversity; community structure; community similarity

中国岩溶(喀斯特)区面积巨大(90.7万km²),约占国土总面积的9.45%^[1-3];岩溶区人地矛盾突出、植被破坏严重、基岩裸露度高、土地生产力下降甚至丧失^[4]。岩溶生态系统脆弱,石漠化成为岩溶区限制社会经济重大生态环境问题^[5-7]。植被恢复是石漠化综合治理的关键^[8],是生态系统功能恢复与重建的基础^[9-10]。深入研究石漠化区自然植被的恢复过程,认识植被群落结构、动态变化,对科学指导石漠化治理中人工促进植被恢复具有重要的作用。相比于其他地区,岩溶区植被群落生态学研究较为薄弱。目前,学者们仅对部分岩溶区植被群落结构、生物多样性进行了初步研究^[11-14],且多集中在云南、贵州、广西3省;岩溶区分布广,面积大,异质性非常高,现有研究难以支撑全国不同岩溶区植被恢复。南水北调是世界上规模最大的跨流域调水工程,河南省淅川县是其中线工程渠首所在地、核心水源区和主要淹没区,从地理位置看,淅川县位于岩溶集中分布连片区的北端^[15-16],石漠化区域总面积348.82 km²^[17]。脆弱的生态环境严重威胁着南水北调中线工程持续发展。然而,该岩溶区天然森林群落特征尚无研究报道,限制了地方林业生态建设中物种与结构模式配置等关键技术的研发。对此,本研究以淅川县岩溶区6个不同恢复年限的天然次生林为对象,研究其物种组成、群落结构及生物多样性特征,拟揭示渠首石漠化区植被恢复过程,为科学制定该区植被恢复策略与确定合适的植被恢复物种和结构配置模式及数量指标提供理论与数据基础,以支撑该区石漠化综合治理。

1 研究区概况

淅川县(32°55'~33°23'N, 110°58'~111°53'E)位于河南省南阳市西南边陲,豫、鄂、陕三省交界的黄金地带,因淅水纵贯境内形成冲击平川而得名,是南水北调中线工程核心水源地和渠首工程所在地,其境内的丹江口水库为亚洲最大的人工淡水湖。淅川县为北亚热带向暖温带过度的季风性气候,四季分明,年平均气温为15.8℃,无霜期约228 d。境内雨量充沛,年降水量为391.3~1 423.7 mm,多年平均降水量为804.3 mm,6-10月为雨季,约占全年降水量的65%。辖区岩溶面积占比较大,主要分布在丹江库区的周边12个乡镇,以金河镇、西簧乡、荆紫关镇为主要代表,样地植被是以栓皮栎 *Quercus*

variabilis 为建群种的次生林。

2 研究方法

2.1 样地设置及调查

2018年7-9月,选取浙川县金河镇、荆紫关镇及西簧乡,以“空间代替时间”的方法选取20、28、35、40、53、70 a共6个不同恢复年限天然次生林样地(皆为全部采伐后自然恢复)。各恢复年限样地设置3个20 m×30 m乔木样方,对其中胸径≥2 cm且树高≥2 m的木本植物进行每木检尺,记录物种名、胸径、树高和南北冠幅,胸径<2 cm或树高<2 m的计算为灌木。在乔木样方四角以及中心布设5个2 m×2 m的灌木样方和5个1 m×1 m的草本样方,分别记录样方中胸径<2 cm或树高<2 m的木本植物和草本植物的种类、株丛数、平均高度及盖度。本次共调查乔木样方18个,总调查面积10 800 m²。样地基本情况见表1。

表1 样地概况

Table 1 Sample information

样地	地点	恢复年份(时长)	平均胸径/cm	平均树高/m	坡度/(°)	海拔/m	平均土壤厚度/cm	土壤类型	样方数量/个
P ₁	西簧桃花村	1998(20 a)	9.09	8.8	32	461	16	黑色,石灰土	3
P ₂	金河渭营村	1990(28 a)	10.63	11.3	25	322	23	黑色,石灰土	3
P ₃	金河小江沟村	1983(35 a)	10.94	11.8	21	290	27	黑色,石灰土	3
P ₄	金河渭营村	1978(40 a)	11.49	12.0	24	278	22	黑色,石灰土	3
P ₅	金河江沟村	1965(53 a)	10.99	11.3	23	243	23	黑色,石灰土	3
P ₆	荆紫关林场	1948(70 a)	13.33	14.4	29	550	18	黑色,石灰土	3

2.2 群落组成、多样性指数和群落相似性计算方法

选择密度(株·hm⁻²)、平均冠幅(m)、盖度(%)、平均胸径(cm)、平均高度(m)等指标度量群落结构,其中盖度为所有树木树冠的椭圆形面积和与占地面积的比值^[18]。分别用树高、径阶来研究林分的垂直结构和径级结构^[11]。

物种多样性以重要值作为多样性指数测定依据^[18]。丰富度指数 R =样地内物种的总数(S); Shannon-Wiener 指数 $H = -\sum_{i=1}^S P_i \ln P_i$ 。Simpson 指数 $D = 1 - \sum_{i=1}^S P_i^2$ 。Pielou 均匀度指数 $J = \left(-\sum_{i=1}^S P_i \ln P_i \right) / \ln S$ 。其中: S 为样地内物种总数, P_i 为样地内*i*种的重要值。

群落相似性采用 Jaccard 相似性系数计算^[19-20]: $q=w/(a+b-w)$ 。其中: q 表示群落的相似性系数; w 表示2个植物群落中的共同物种数; a 和**b**分别表示群落A、B的物种总数。根据 Jaccard 相似性原理,当 q 为0~0.25时为极不相似,0.25~0.50时为中等不相似,0.50~0.75时为中等相似,0.75~1.00时为极相似^[21-22]。

2.3 数据处理

数据采用 Excel 2016 和 SPSS 18.0 软件进行统计分析处理。

3 结果与分析

3.1 物种组成

由表2可知:研究区不同恢复年限的样地(P₁~P₆)中共有植物13科13属13种、14科14属14种、13科17属17种、18科23属24种、23科27属27种、22科28属31种。根据中国植被生活型分类方法,发现研究区植物中常绿针叶乔木和落叶针叶乔木出现概率极低,除P₃和P₆样地常绿阔叶乔木最多外,其余样地均以落叶阔叶乔木占优势地位,占比高于66.7%。所有样地的灌木全部为落叶阔叶灌木。草本多为多年生,只在P₄和P₆样地出现1年生草本;藤本多为落叶藤本,仅在P₅样地出现1种常绿藤本。所有样地乔木层树种的占比依次为53.8%、35.7%、58.8%、33.3%、48.1%和45.2%;灌木层物种占比依次为23.1%、42.9%、29.4%、20.8%、29.6%和25.8%;草本层物种占比依次为15.4%、

14.3%、11.8%、37.5%、18.5% 和 19.4%。不同恢复年限样地中藤本植物出现的频率均较低，其中 P₄ 和 P₅ 样地出现了 3 种，P₆ 出现 2 种，其余为 1 种或 0 种。不同样地植物科的数量和种的数量基本一致，提示单科单属单种的概率极大。

表 2 淅川县岩溶区不同恢复年限植被科、属、种及生活型

Table 2 Vegetation families, genera, species and life forms of different restoration years in karst area of Xichuan County

样地	科	属	种	针叶乔木/种		阔叶乔木/种		落叶阔叶灌木	草本/种		藤本/种	
				常绿	落叶	常绿	落叶		1年生	多年生	常绿	落叶
P ₁	13	13	13	0	1	0	6	3	1	1	0	1
P ₂	14	14	14	1	0	1	4	5	1	1	0	1
P ₃	13	17	17	0	0	2	8	5	0	2	0	0
P ₄	18	23	24	1	0	1	6	5	3	5	0	3
P ₅	23	27	27	1	0	1	11	6	1	4	1	2
P ₆	22	28	31	1	0	2	11	6	3	6	0	2
总计	40	58	63	1	1	3	23	10	3	13	1	8

3.2 群落相似性系数

根据 Jaccard 相似性系数公式计算淅川县岩溶区不同恢复年限样地相似性。如表 3 所示：样地间的相似性系数为 0.137~0.225，位于 0~0.25 区间，属于极不相似水平。P₁ 与 P₆ 间相似性最小 (0.137)，P₂ 与 P₅ 相似性最大 (0.225)，P₆ 与其他样地的相似系数均小于其他恢复时间之间的相似系数。同时，随着恢复年限的增加，相似系数整体出现下降的趋势。

3.3 物种多样性

Shannon 多样性指数反映了个体出现的不确定程度，Simpson 多样性指数反映了生境中物种多样性的

综合优势度^[23]。由表 4 可以看出：不同样地各个层 Shannon 多样性指数不同。P₅ 样地的群落、乔木层、灌木层 Shannon 多样性指数最大，分别为 1.989、1.615 和 1.927，P₁ 样地最低，分别为 0.377、0.325 和 1.149。P₆ 样地草本层 Shannon 多样性指数最大，为 2.168，P₁ 样地最小，为 0.377。不同样地各个层 Simpson 多样性指数不同。P₅ 样地的乔木层、灌木层和群落最大，分别为 0.686、0.829、0.740，P₁ 样地最小，分别为 0.118、0.617、0.212。P₆ 样地草本层 Simpson 多样性指数最大，为 0.870，P₁ 样地最小，为 0.219。Pielou 均匀度指数在乔木层中随着恢复时间增加而增加，以 P₅ 样地中最大，为 0.744，而在 P₆(恢复 70 a) 样地中出现了下降；灌木层和草本层 Pielou 均匀度随着恢复年限的增加总体呈增加趋势，P₁ 最低，为 0.823 和 0.438，P₆(恢复 70 a) 最大，为 0.946 和 0.967。

表 4 淅川县岩溶区不同恢复年限样地物种多样性

Table 4 Species diversity in karst areas of xichuan county

样地	Shannon多样性指数(H)				Simpson多样性指数(D)				Pielou均匀度指数(J)			
	乔木层	灌木层	草本层	群落	乔木层	灌木层	草本层	群落	乔木层	灌木层	草本层	群落
P ₁	0.325	1.149	0.377	0.602	0.118	0.617	0.219	0.212	0.138	0.823	0.438	0.230
P ₂	0.883	1.726	1.856	1.542	0.498	0.795	0.789	0.576	0.624	0.928	0.947	0.621
P ₃	0.953	1.437	0.637	1.236	0.479	0.724	0.444	0.540	0.532	0.906	0.889	0.574
P ₄	1.022	1.748	0.666	1.44	0.549	0.792	0.473	0.623	0.627	0.923	0.888	0.650
P ₅	1.615	1.927	1.427	1.989	0.686	0.829	0.716	0.740	0.744	0.933	0.895	0.769
P ₆	0.804	1.906	2.168	1.299	0.299	0.828	0.870	0.425	0.322	0.946	0.967	0.439

表 3 淅川县岩溶区不同恢复年限植被群落相似性系数

Table 3 Vegetation community similarity coefficient of different restoration years in karst area of Xichuan County

样地	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	P ₆
P ₁	1					
P ₂	0.181	1				
P ₃	0.167	0.205	1			
P ₄	0.139	0.191	0.162	1		
P ₅	0.189	0.225	0.209	0.177	1	
P ₆	0.137	0.167	0.143	0.167	0.159	1

由图1可以看出:各个层的物种丰富度(R)、Shannon多样性指数(H')、Simpson多样性指数(D')和Pelou均匀度指数(J')随着恢复年限增加没有明显的规律,具有一定的波动性,但总体趋势为缓慢上升。

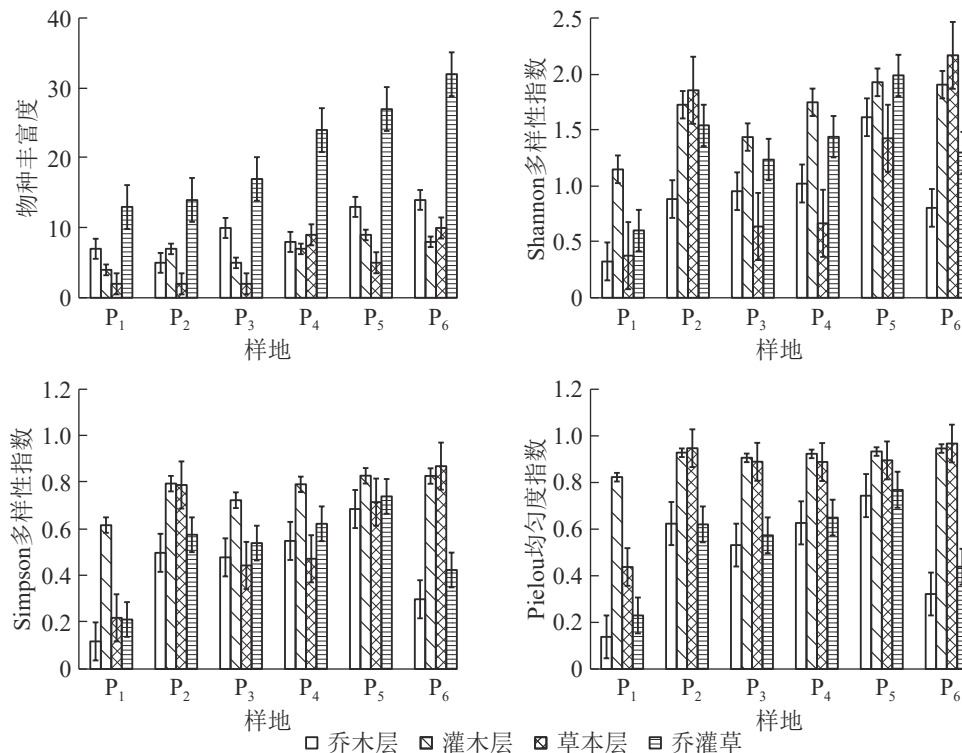


图1 浙川县岩溶区不同恢复年限样地各层物种多样性指数

Figure 1 Species diversity index of each layer in karst area of Xichuan County with different restoration years

3.4 群落结构

3.4.1 群落结构特征 对浙川县岩溶区不同恢复年限森林样地群落结构进行多重比较发现(表5):6个样地群落密度没有显著性差异; P_1 与 P_6 样地的胸径、树高差异显著($P < 0.05$),其余样地间差异不显著; P_6 样地平均冠幅显著高于其他5个样地,而这5个样地间无显著差异; P_6 样地盖度显著高于 P_1 、 P_2 ,其余样地间无显著性差异。群落结构5个指标(胸径、树高、冠幅、盖度、密度)变异系数存在差异,胸径变异较大的是 P_5 和 P_6 (变异系数分别为51.6%和54.8%),其余样地的变异系数均低于50%;树高变异较大的是 P_5 ,密度变异系数最大的是 P_6 ;不同恢复年限样地的冠幅、盖度较稳定,变异系数为5.4%~41.0%。

表5 浙川县岩溶区不同恢复时间样地群落结构

Table 5 Community structure of different restoration time samples in karst area of Xichuan County

样地	胸径		树高		冠幅		盖度		密度	
	平均值/cm	变异度/%	平均值/m	变异度/%	平均值/m	变异度/%	平均值/%	变异度/%	平均值/(株·m ⁻²)	变异度/%
P_1	9.09±0.25 a	38.2	8.78±0.20 a	41.8	3.79±0.08 a	38.6	2.49±0.60 a	41.0	0.194±0.003 a	3.0
P_2	10.63±0.21 ab	38.2	11.30±0.22 ab	37.7	4.16±0.07 a	31.9	3.02±0.24 a	13.7	0.207±0.032 a	3.0
P_3	10.94±0.27 ab	42.6	11.84±0.31 ab	45.5	4.42±0.09 a	34.9	2.87±0.29 ab	17.2	0.171±0.016 a	16.4
P_4	11.49±0.25 ab	37.5	11.97±0.27 ab	38.6	3.88±0.08 a	36.2	2.08±0.18 ab	14.6	0.162±0.006 a	6.8
P_5	10.99±0.30 ab	51.6	11.28±0.31 ab	52.3	3.93±0.08 a	38.7	2.78±0.09 ab	5.4	0.204±0.024 a	20.6
P_6	13.33±0.41 b	54.8	14.39±0.27 b	38.6	5.11±0.10 b	34.0	4.00±0.84 b	36.1	0.181±0.060 a	60.0

说明:同列不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)

3.4.2 乔木层垂直结构和径级结构特征 样地中灌木和草本对群落的结构特征影响不明显,所以只研究不同恢复年限样地乔木层垂直结构和径级结构。本研究将乔木的树高(m)分为7个等级:2~6 m为

I 级, 6~10 m 为 II 级, 10~14 m 为 III 级, 14~18 m 为 IV 级, 18~22 m 为 V, 22~26 m 为 VI 级, 高于 26 m 为 VII 级。如图 2A 可知: P₁ 样地乔木垂直结构只有 V 级, P₂ 样地有 VI 级, P₃~P₆ 有 VII 级; 即恢复初期树高主要集中在前 3 级, 随着恢复年限增加, 树高在每一径级趋于均匀, 当恢复年限达到 70 a 时, 第 I 级和第 VII 级树高的株数较少。调查发现: 不同样地中树高大于 18 m 的密度分别为 33、122、312、139、339 和 644 株·hm⁻²。本研究将乔木的胸径 (cm) 分为 7 个等级: 2~6 cm 为 I 级, 6~10 cm 为 II 级, 10~14 cm 为 III 级, 14~18 cm 为 IV 级, 18~22 cm 为 V 级, 22~26 cm 为 VI 级, 大于 26 cm 为 VII 级。如图 2B 所示: P₁ 样地乔木径级结构有 VI 级, P₂ 和 P₃ 样地有 V 级, P₄~P₆ 有 VII 级; P₁ 样地中 I 级径阶株数最多, P₂ 样地中 II 级、III 级径阶株数最多, P₃ 样地中 IV 级径阶株数最多, V 级、VI 级、VII 级径阶中株数最多的是 P₆ 样地。调查发现: 不同样地中胸径大于 18 cm 的密度分别为 89、61、117、111、267 和 494 株·hm⁻²。

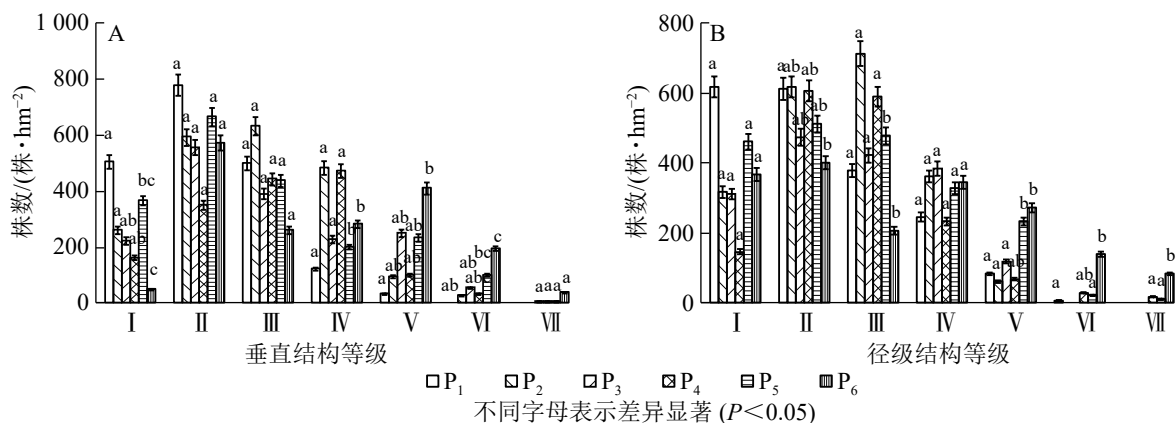


图 2 淅川县岩溶区不同恢复年限样地树高、胸径结构特征

Figure 2 High and DBH structure characteristics of trees in different restoration years in karst area of Xichuan County

4 讨论与结论

本研究调查了 18 个天然次生林样地, 总面积 10 800 m², 共发现维管束植物 63 种, 隶属 40 科 58 属。淅川县地处北亚热带向暖温带过度区域, 多年年均降水量仅为 804 mm, 显著低于中国西南亚热带岩溶区。不同于西南亚热带地区的常绿落叶阔叶混交林, 淅川县岩溶区天然次生林形成以栓皮栎占绝对优势的落叶阔叶林, 其物种组成相对较为简单, 丰富度较低, 科、属、物种数均少于桂西南岩溶区 (46 科 81 属 85 种)^[24]、贵州普定县岩溶区 (89 科 218 属 365 种)^[11] 和湘南岩溶区 (63 科 131 属 173 种)^[25]。与淅川县周边非岩溶区相比发现: 淅川县岩溶区维管束植物显著低于伏牛山自然保护区和秦岭地区, 这可能与岩溶区土壤持水能力低有关, 喀斯特岩溶区土壤瘠薄, 保水能力差、渗透作用强烈, 特殊的二元水文系统致使植物即使在雨季也可能受到干旱的威胁^[26]。

岩溶区植被恢复的主要驱动力是生物多样性^[27-28]。物种多样性是植被群落结构特征的属性之一^[29], 可表征生物群落结构的复杂性, 是影响生态系统功能和服务发挥作用的关键因素之一, 同时物种多样性是岩溶区植被恢复的重要特征之一^[30-31], 一般认为随着恢复时间的增加物种多样性指数和均匀度指数缓慢增加。本研究发现: 不同恢复时间样地中物种多样性并不是线性上升, 均出现先上升后下降的变化, 但整体趋势为缓慢上升。随着恢复时间增加, 群落物种多样性呈上升趋势, 但出现单科单属单种的概率极大, 这是因为随着恢复时间增加, 群落覆盖度增加, 为植物生长提供了适宜的环境。草本层 Shannon 多样性指数出现先上升后下降再上升的趋势; 乔木层、灌木层和群落变化趋势一致。有研究认为 Shannon 多样性指数一般为 1.5~3.5^[32]。本研究中 Shannon 多样性指数整体偏低, 乔木层、灌木层和群落 Shannon 多样性指数在恢复 20 a 最低 (0.325、1.149、0.602), 恢复 53 a 最高 (1.615、1.927、1.989), 说明恢复时间达 53 a 时, 群落结构最好。Simpson 多样性指数在恢复 53 a 的样地中最大, 恢复 20 a 样地中最低; 推测原因是岩溶区独特的水热条件和高度的景观异质性, 土壤浅薄且不连续, 基岩裸露率高, 植物大多生长在岩石缝和岩石上, 既要有石生性、耐旱性和喜钙性, 又要有强壮而发达的根系。

HILLEBRAND 等^[33]认为随着物种均匀度的提升,群落稳定性也将提高。本研究发现:随着恢复时间增加, Pielou 均匀度指数呈上升趋势,群落稳定性提升。

河南省淅川县岩溶区随着恢复年限的增加群落形成了以栓皮栎为建群种的植被类型,群落科、属、种数随着恢复时间的增加而增加,物种组成分布趋于均匀状态,优势木重要值呈下降趋势。Jaccard 相似性原理分析发现:不同恢复年限的群落样地间相似系数为 0.137~0.225,为极为不相似。植物群落相似性指数的大小是植物群落之间异质性的量化,同时是植物群落生境条件异质性的体现^[34]。虽然样地的建群种同为栓皮栎,但群落之间为极为不相似,说明不同恢复年限样地的共有植物较少,植物组成差异较大。这可能与岩溶区植物群落生境异质性较大有关,后续研究需要进一步增加大样地数量。本研究中乔木层的树高大都为 6~14 m,胸径主要为 6~14 cm,随着恢复年限的增加,乔木层的树高和胸径增加不明显。这主要是跟调查样地的土壤厚度有关,本次调查的样地土壤厚度仅为 16~27 cm,土壤瘠薄,植物生长缓慢,且在后期所需的养分较多,浅薄的土层不能提供生长所需的养分。随着恢复年限的增加可以对其进行人工管理,采用修枝、间伐等措施促进林木生长。

5 参考文献

- [1] 袁道先. 岩溶石漠化问题的全球视野和我国的治理对策与经验[J]. 草业科学, 2008, 25(9): 19-25.
YUAN Daoxian. Global view on Karst rock desertification and integrating control measures and experiences of China [J]. *Pratacultural Sci*, 2008, 25(9): 19-25.
- [2] 彭晚霞, 王克林, 宋同清, 等. 喀斯特脆弱生态系统复合退化控制与重建模式[J]. 生态学报, 2008, 28(2): 811-820.
PENG Wanxia, WANG Kelin, SONG Tongqing, et al. Controlling and restoration models of complex degradation of vulnerable karst ecosystem [J]. *Acta Ecol Sin*, 2008, 28(2): 811-820.
- [3] 蒋忠诚, 袁道先, 曹建华, 等. 中国岩溶碳汇潜力研究[J]. 地球学报, 2012, 33(2): 129-134.
JIANG Zhongcheng, YUAN Daoxian, CAO Jianhua, et al. A study of carbon sink capacity of karst processes in China [J]. *Acta Geosci Sin*, 2012, 33(2): 129-134.
- [4] XU Erqi, ZHANG Hongqi, LI Mengxian. Mining spatial information to investigate the evolution of karst rocky desertification and its human driving forces in Changshun, China [J]. *Sci Total Environ*, 2013, 458/460(3): 419-426.
- [5] 温培才, 盛茂银, 王霖娇, 等. 西南喀斯特高原盆地石漠化环境植物群落结构与物种多样性时空动态[J]. 广西植物, 2018, 38(1): 11-23.
WEN Peicai, SHENG Maoyin, WANG Linjiao, et al. Temporal-spatial dynamics for plant community structure and species diversity of rocky desertification ecosystem in karst plateau basin, southwest China [J]. *Guihaia*, 2018, 38(1): 11-23.
- [6] SWEETING M M. Karst in China[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1995: 112-118.
- [7] LI Yangbing, SHAO Jing'an, YANG Hua, et al. The relations between land use and karst rocky desertification in a typical karst area, China [J]. *Environ Geol*, 2009, 57(3): 621-627.
- [8] SHENG Maoyin, XIONG Kangning, WANG Linjian, et al. Response of soil physical and chemical properties to rocky desertification succession in South China Karst [J]. *Carbonates Evaporites*, 2018, 33(1): 15-28.
- [9] 周政贤, 毛志忠, 喻理飞, 等. 贵州石漠化退化土地及植被恢复模式[J]. 贵州科学, 2002, 20(1): 1-6.
ZHOU Zhengxian, MAO Zhizhong, YU Lifei, et al. The study on degraded land and its vegetation restoration models of desertification in Guizhou [J]. *Guizhou Sci*, 2002, 20(1): 1-6.
- [10] 刘仙, 蒋勇军, 况明生. 西南喀斯特石漠化区水土保持与生态文明研究新进展[J]. 四川师范大学学报(自然科学版), 2009, 32(3): 396-400.
LIU Xian, JIANG Yongjun, KUANG Mingsheng. Advances in soil and water conservation and ecological civilization research for karst rocky desertification areas of Southwestern China [J]. *J Sichuan Norm Univ Nat Sci*, 2009, 32(3): 396-400.
- [11] 刘玉国, 刘长成, 魏雅芬, 等. 贵州省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, 2011, 35(10): 1009-1018.
LIU Yuguo, LIU Changcheng, WEI Yafen, et al. Species composition and community structure at different vegetation successional stages in Puding, Guizhou Province, China [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2011, 35(10): 1009-1018.

- [12] 吕妍, 张黎, 闫慧敏, 等. 中国西南喀斯特地区植被变化时空特征及其成因[J]. 生态学报, 2018, **38**(24): 8774 – 8786.
LÜ Yan, ZHANG Li, YAN Huimin, *et al.* Spatial and temporal patterns of changing vegetation and the influence of environmental factors in the karst region of Southwest China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2018, **38**(24): 8774 – 8786.
- [13] 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.
YU Lifei, ZHU Shouqian, YE Jingzhong, *et al.* Dynamics of a degraded karst forest in the process of natural restoration [J]. *Sci Silv Sin*, 2002, **38**(1): 1 – 7.
- [14] 曾文豪, 石慰, 唐一思, 等. 广西地区喀斯特与非喀斯特山地森林树木物种多样性及系统发育结构比较[J]. 生态学报, 2018, **38**(24): 8708 – 8716.
ZENG Wenhao, SHI Wei, TANG Yisi, *et al.* Comparison of the species diversity and phylogenetic structure of tree communities in karst and non-karst mountains in Guangxi [J]. *Acta Ecol Sin*, 2018, **38**(24): 8708 – 8716.
- [15] 高文文, 曾源, 刘宇, 等. 南水北调中线水源区 2000–2015 年森林动态变化遥感监测[J]. 林业科学, 2019, **55**(4): 97 – 107.
GAO Wenwen, ZENG Yuan, LIU Yu, *et al.* Forest dynamic monitoring by remote sensing from 2000 to 2015 in the water source area of the South-to-North Water Diversion Project [J]. *Sci Silv Sin*, 2019, **55**(4): 97 – 107.
- [16] 吴卿, 刘哲, 陈子韶, 等. 淅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 characteristic of rocky desertification in Xichuan County [J]. *Soil Water Conserv China*, 2018(11): 33 – 36.
- [17] 顾汪明, 周金星, 武建宏, 等. 南水北调中线渠首淅川县石漠化治理现状与人工造林技术[J]. 林业资源管理, 2018(3): 44 – 48.
GU Wangming, ZHOU Jinxing, WU Jianhong, *et al.* Artificial afforestation technology for rocky desertification control in Xichuan County of South to North Water Diversion Project [J]. *For Resour Manage*, 2018(3): 44 – 48.
- [18] 宋同清, 彭晚霞, 曾馥平, 等. 喀斯特峰丛洼地不同类型森林群落的组成与生物多样性特征[J]. 生物多样性, 2010, **18**(4): 355 – 364.
SONG Tongqing, PENG Wanxia, ZENG Fuping, *et al.* Community composition and biodiversity characteristics of forests in karst cluster-peak-depression region [J]. *Biodiversity Sci*, 2010, **18**(4): 355 – 364.
- [19] 张金屯. 数量生态学[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [20] 梅象信, 徐正会, 张继玲, 等. 昆明西山森林公园东坡蚂蚁物种多样性研究[J]. 林业科学研究, 2006, **19**(2): 170 – 176.
MEI Xiangxin, XU Zhenghui, ZHANG Jiling, *et al.* Ant species diversity on east slope of Xishan Forest Park in Kunming [J]. *For Res*, 2006, **19**(2): 170 – 176.
- [21] 沈蕊, 张建利, 何彪, 等. 元江流域干热河谷草地植物群落结构特征与相似性分析[J]. 生态环境学报, 2010, **19**(12): 2821 – 2825.
SHEN Rui, ZHANG Jianli, HE Biao, *et al.* The structure characteristic and analysis on similarity of grassland community in dry-hot valley of Yuanjiang River [J]. *Ecol Environ Sci*, 2010, **19**(12): 2821 – 2825.
- [22] 张文, 张建利, 周玉锋, 等. 喀斯特山地草地植物群落结构与相似性特征[J]. 生态环境学报, 2011, **20**(5): 843 – 848.
ZHANG Wen, ZHANG Jianli, ZHOU Yufeng, *et al.* The plant community structure & similarity trait of the karst mountain grassland [J]. *Ecol Environ Sci*, 2011, **20**(5): 843 – 848.
- [23] 杨振奇, 秦富仓, 张晓娜, 等. 砭砂岩区不同立地类型人工沙棘林下草本物种多样性环境解释[J]. 生态学报, 2018, **38**(14): 5132 – 5140.
YANG Zhenqi, QIN Fucang, ZHANG Xiaona, *et al.* Environmental interpretation of herb species diversity under different site types of *Hippophae rhamnoides* forest in feldspathic sandstone region [J]. *Acta Ecol Sin*, 2018, **38**(14): 5132 – 5140.
- [24] 农友, 卢立华, 贾宏炎, 等. 桂西南岩溶区不同恢复模式群落生物量及林下植物多样性[J]. 林业科学研究, 2017, **30**(2): 200 – 205.
NONG You, LU Lihua, JIA Hongyan, *et al.* Community biomass and understory plant diversity under different vegetation restoration models of karst region in Southwest Guangxi [J]. *For Res*, 2017, **30**(2): 200 – 205.
- [25] 吴林世, 曹福祥, 彭继庆, 等. 湘南石漠化地区植物群落物种多样性[J]. 浙江农林大学学报, 2016, **32**(2): 239 – 246.
WU Linshi, CAO Fuxiang, PENG Jiqing, *et al.* Plant community and species diversity in rocky desert areas of Southern Hunan [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2016, **32**(2): 239 – 246.

- [26] 郭柯, 刘长城, 董鸣. 我国西南喀斯特植物生态适应性与石漠化治理[J]. *植物生态学报*, 2011, **35**(10): 991 – 999.
GUO Ke, LIU Changcheng, DONG Ming. Ecological adaptation of plants and control of rocky-desertification on karst region of Southwest China [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2011, **35**(10): 991 – 999.
- [27] 李先琨, 蒋忠诚, 黄玉清, 等. 桂西南岩溶山地优势植物种群动态及其对岩溶作用的影响[J]. *地球科学*, 2008, **29**(2): 253 – 259.
LI Xiankun, JIANG Zhongcheng, HUANG Yuqing, *et al.* Dynamics of dominant population and its influence on karstification in Southwest Guangxi, China [J]. *Acta Geosci Sin*, 2008, **29**(2): 253 – 259.
- [28] 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.
- [29] McNAUGHTON S J. Diversity and stability of ecological communities: a comment on the role of empiricism in ecology [J]. *Am Nat*, 1997, **111**(979): 515 – 525.
- [30] 盛茂银, 熊康宁, 崔高仰, 等. 贵州喀斯特石漠化地区植被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] 朱光玉, 徐奇刚, 吕勇. 湖南栎类天然次生林林分空间结构对灌木物种多样性的影响[J]. *生态学报*, 2018, **38**(15): 5404 – 5412.
ZHU Guangyu, XU Qigang, LÜ Yong. Effects of stand spatial structure on species diversity of shrubs in *Quercus* spp. natural secondary forests in Hunan Province [J]. *Acta Ecol Sin*, 2018, **38**(15): 5404 – 5412.
- [32] McNANGHTON S J. Serengeti grassland ecology: the role of composite environmental factors and contingency in community organization [J]. *Ecol Monogr*, 1983, **53**(3): 291 – 320.
- [33] HILLEBRAND H, BENNET D M, CADOTTE M W. Consequences of dominance: a review of evenness effects on local and regional ecosystem process [J]. *Ecology*, 2008, **89**(6): 1510 – 1520.
- [34] 马凯, 李永宁, 金辉, 等. 不同生境类型金莲花群落物种多样性比较[J]. *草业科学*, 2011, **28**(8): 1467 – 1472.
MA Kai, LI Yongning, JIN Hui, *et al.* A comparison of the species diversity of *Trollius chinensis* community in different habitats [J]. *Pratacultural Sci*, 2011, **28**(8): 1467 – 1472.