

◆岩溶森林生态保护修复◆

岩溶石漠化不同修复林分的生物量和生产力及其动态变化^{*}周晓果¹, 孙冬婧¹, 温远光^{1,2**}, 王磊², 明安刚³, 贾宏炎³, 朱宏光², 赵岩岩¹, 黄勇杰¹, 梁佳¹

(1. 广西科学院生态环境研究所, 广西南宁 530007; 2. 广西大学林学院, 广西森林生态与保育重点实验室, 广西南宁 530004; 3. 中国林业科学研究院热带林业实验中心, 广西凭祥 532600)

摘要:为阐明岩溶石漠化不同修复林分的生物量和生产力特征及其动态变化规律,选择2011年营造的顶果木 *Acrocarpus fraxinifolius* 纯林(PAFP)、降香黄檀 *Dalbergia odorifera* 纯林(PDOP)和顶果木×降香黄檀混交林(MADP)为研究对象,设置固定监测样地,基于2013年、2015年、2019年和2021年的4次林分生物量测定,研究3种修复林分生物量、定期平均净生产力的特征及动态变化。结果表明:(1)3种修复林分生物量均随年龄的增加而显著增加;不同林分、不同树种各器官生物量的变化规律类似,但不同器官生物量的变化规律有所不同。(2)3种林分在2013-2021年的林分定期年平均净生产力以PDOP最高(8.68 t/hm²),PAFP最低(2.36 t/hm²),MADP(5.09 t/hm²)介于两者之间;3种修复林分在2015-2019年、2019-2021年和2013-2021年的林分定期平均净生产力均存在显著差异,PDOP显著高于MADP和PAFP,MADP显著高于PAFP($P<0.05$);采用豆科固氮树种修复10a的林分净生产力达到甚至超过了岩溶顶极、次顶极森林乔木层的净生产力,PAFP、MADP和PDOP在2019-2021年平均净生产力比2015-2019年分别提高53.65%、113.32%和38.36%,实现了岩溶石漠化生态系统生产力的快速修复和提升。(3)PAFP林分树叶的年平均净生产力非常低,仅为0.08 t/hm²,分别占PDOP(0.62 t/hm²)的12.90%和MADP(0.30 t/hm²)的26.67%,这是随着时间推移PAFP逐渐衰退的重要原因。

关键词:石漠化 纯林 混交林 生物量 定期平均净生产力 动态变化

中图分类号:S718.5 文献标识码:A 文章编号:1005-9164(2022)01-0098-10

DOI:10.13656/j.cnki.gxkx.20220310.001

生物量和生产力是森林生态系统结构和功能中最基本的数量特征,既是人类衣、食、住、行、药等资源的物质基础,也是地球生物圈生命支持系统的核心^[1,2]。人类不合理的利用以及全球气候变化,使地

收稿日期:2022-01-05

^{*} 国家自然科学基金项目(31860171,32160358)和广西重点研发计划项目(2018AB40007)资助。

【作者简介】

周晓果(1980-),女,博士,副教授,主要从事森林生态学研究,E-mail:xgzhou2014@126.com。

【**通信作者】

温远光(1957-),男,博士,教授,主要从事森林生态学和恢复生态学研究,E-mail:wenyg@263.net。

【引用本文】

周晓果,孙冬婧,温远光,等.岩溶石漠化不同修复林分的生物量和生产力及其动态变化[J].广西科学,2022,29(1):98-107.

ZHOU X G,SUN D J,WEN Y G, et al. Biomass, Productivity and Their Dynamic Changes of Different Restoration Stands in Karst Rocky Desertification [J]. Guangxi Sciences, 2022, 29(1): 98-107.

球上大面积的森林植被遭到破坏,导致陆地植物生物量和地球总生物量减半^[3],危及人类自身的生存和发展^[2,3]。如何防止地球植被的持续退化、恢复和重建已退化的森林植被、优化人类赖以生存的植被资源,成为人类必须解决的重大科学难题和紧迫任务^[1]。

有研究表明,生物量和生产力是判定和评价生态系统修复、稳定性与可持续性的基础^[4,5],林分生物量和生产力的提高有助于提高土壤有机质、促进养分循环、增加生物多样性、维持生态系统结构与功能稳定性、加快退化生态系统修复^[6-8],成为当今全球森林生态系统和气候变化研究的核心内容之一^[9,10]。当前有关森林生物量和生产力的研究论文卷帙浩繁,由于岩溶(喀斯特)森林生物量的取样十分困难,人们对岩溶森林生物量的研究较少。目前仅有的少数研究是利用收获法和标准木法对贵州茂兰喀斯特森林群落地上生物量^[11,12],桂西喀斯特地区黄荆、红背山麻杆、灰毛浆果楝灌丛生物量及生产力^[13]和广西石山林(树种组)生物量^[14]进行测定,利用前人建立的生物量方程对喀斯特植被不同演替阶段的生物量和净初级生产力进行估算^[15-17];最近有学者对贵州喀斯特地区马尾松天然林、马尾松人工林和湿地松人工林生态系统生物量进行研究^[18]。然而,以往关于岩溶地区森林生物量的研究更多的是天然次生林、灌丛植被以及人工纯林,对于纯林和混交林比较,特别是长期固定样地的生物量研究极少,对岩溶森林生产力的研究更少。由于缺乏对人工修复林分的长期监测,无法对修复林分的生长和适应性做出科学评价,导致盲目推广应用,造成重大损失^[19]。

本研究基于2011年建立的顶果木 *Acrocarpus fraxinifolius* 纯林(PAFP)、降香黄檀 *Dalbergia odorifera* 纯林(PDOP)和顶果木×降香黄檀混交林(MADP)长期固定监测样地,对2013年、2015年、

2019年和2021年的4次林分生物量进行调查,探讨岩溶石漠化不同修复林分生物量和生产力随时间的动态变化特征,为进一步探索3种人工修复林分生物量和生产力长期动态变化规律提供基础数据和资料,为石漠化综合治理及林分质量精准提升提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域的自然环境概况

研究区域位于广西南宁市马山县(23°24′-24°2′N,107°41′-108°29′E),属南亚热带季风气候区,气候温暖湿润,雨热同季,干湿季分明。年平均气温21.3℃,年平均降水量1667.1mm。境内岩溶广布,土壤以岩溶石灰土为主,土层浅薄,岩基裸露度大。原生性的地带性森林植被荡然无存,生态环境脆弱。

1.2 样方设置与生物量调查

基于2011年在广西南宁市马山县民族村,接近自然经营建立顶果木纯林(PAFP)、降香黄檀纯林(PDOP)和顶果木×降香黄檀混交林(MADP)试验林分,2013年建立长期固定监测样地,每种林分样地面积为20m×20m,设3个重复,林分环境概况见表1。分别于2013年、2015年、2019年和2021年进行样地群落生物量调查,并分别于2015年、2019年和2021年进行标准木生物量测定。累计采伐顶果木、降香黄檀标准木各9株。采用收获法测定标准木的器官生物量,将器官分为干、枝、叶、根4个组分,枝和根进一步细分为一级枝、二级枝、三级枝和细根(<0.5cm)、中根(0.5-1.0cm)、粗根(>1.0cm)、根莖,分别称取各器官生物量鲜重,同时分别采集各器官样品约500g。将所有样品带回实验室,在85℃恒温下烘干至恒重,进而计算各样品的含水率和干重。

Table 1 Environmental situation of different stand

林分类型 Stand type	树种 Species	海拔(m) Altitude (m)	土壤类型 Soil type	土层厚度(cm) Soil depth (cm)	坡度(°) Slope degree (°)	密度(株/hm ²) Density (trees/hm ²)
PAFP	顶果木 <i>A. fraxinifolius</i>	290-310	石灰土 Lime soil	30-40	20-30	1417
MADP	顶果木×降香黄檀 <i>A. fraxinifolius</i> × <i>D. odorifera</i>	280-300	石灰土 Lime soil	30-40	25-30	1525
PDOP	降香黄檀 <i>D. odorifera</i>	270-300	石灰土 Lime soil	30-40	25-30	1608

1.3 生物量和生产力的计算

根据标准木胸径和树高以及器官生物量之间的相对生长关系,建立不同树种、不同器官的生物量估测回归方程(表2),各回归方程的相关性均达极显著相关($P < 0.001$)。根据表2中的生物量方程结合不同年份各调查样地林木胸径和树高计算林木各器官

表2 不同树种不同器官生物量估算回归模型

Table 2 Regression models for biomass estimation in different organs of different tree species

树种 Tree species	组分 Organ	回归方程 Regression equation	r	F	P
降香黄檀 <i>D. odorifera</i>	干 Trunk	$W = 0.021 (D^2 H)^{1.070}$	0.993	835.770	< 0.001
	枝 Branch	$W = 0.004 (D^2 H)^{1.176}$	0.967	178.566	< 0.001
	叶 Leaf	$W = 0.035 (D^2 H)^{0.722}$	0.900	55.156	< 0.001
	根 Root	$W = 0.009 (D^2 H)^{1.032}$	0.993	804.317	< 0.001
顶果木 <i>A. fraxinifolius</i>	干 Trunk	$W = 0.045 (D^2 H)^{0.896}$	0.986	583.867	< 0.001
	枝 Branch	$W = 0.0003 (D^2 H)^{1.310}$	0.864	51.672	< 0.001
	叶 Leaf	$W = 0.011 (D^2 H)^{0.683}$	0.913	84.621	< 0.001
	根 Root	$W = 0.012 (D^2 H)^{0.905}$	0.966	230.862	< 0.001

注: W 表示生物量; D 表示胸径; H 表示树高

Note: W indicates biomass; D indicates diameter at breast height; H indicates tree height

1.4 数据统计分析

采用单因素方差分析(One-way ANOVA)检验不同林分、不同树种、不同器官生物量和生产力的差异显著性,显著性水平设置为 $P < 0.05$,采用最小显著性差异法(Least Significant Difference, LSD)进行多重比较,以上分析在 SPSS 24.0 软件上运行。

2 结果与分析

2.1 不同林分不同树种单株生物量的动态变化

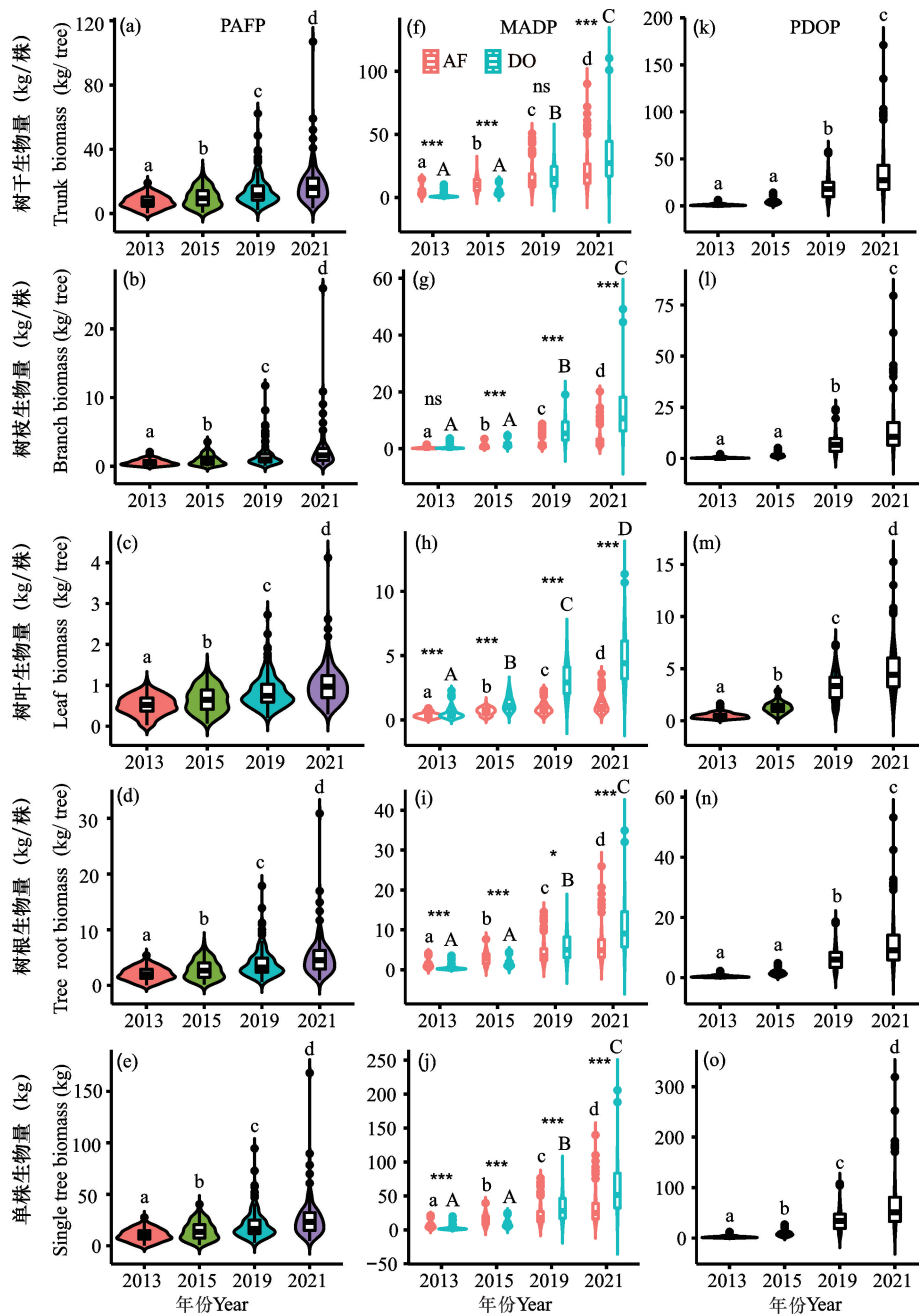
由图1可知,3种林分两树种单株和各器官生物量均随着林分年龄的增加而显著增加。PAFP林分在2013年、2015年、2019年和2021年单株生物量分别为10.41 kg、14.45 kg、20.24 kg、25.83 kg;MADP林分中,顶果木单株生物量分别为8.92 kg、16.03 kg、21.92 kg、27.87 kg,降香黄檀单株生物量分别为3.02 kg、8.13 kg、26.47 kg、51.49 kg;PDOP林分单株生物量分别为2.94 kg、7.64 kg、36.07 kg、56.39 kg。方差分析表明,PAFP林分单株和各器官生物量各年份间存在显著差异($P < 0.05$);PDOP林分除树干、树枝和树根在2013年和2015年间差异不显著($P > 0.05$)外,其余各年份间差异显著($P <$

的生物量,将样地林木各器官生物累加得到林分生物量。关于森林第一性净生产力指标有平均净生产力(总平均或定期平均)和年间净生产力(连年生长量)两种,更多的是采用生物量除以年龄,即总平均生长量作为生产力指标^[5]。本文采用定期平均净生产力作为生产力指标。

0.05);MADP林分中顶果木平均单株和器官生物量变化与PAFP林分相同,而降香黄檀则与PDOP相同;混交林中顶果木和降香黄檀的单株生物量和树叶、树根生物量存在显著差异($P < 0.05$),其中2013年和2015年为顶果木极显著高于降香黄檀($P < 0.001$),而2019年和2021年为降香黄檀极显著高于顶果木($P < 0.001$);除2019年的树干和2013年的树枝外,其余各年份间均存在极显著差异($P < 0.001$)。

2.2 不同林分生物量的动态变化

由表3可知,随着林分年龄的增长,除2013年和2015年树枝生物量差异不显著外,3种林分各器官生物量及总生物量均显著增加($P < 0.05$)。方差分析表明,3种林分的总生物量各年份间均存在显著差异($P < 0.05$)。在林分生长初期(2013年),PAFP林分总生物量显著高于MADP和PDOP($P < 0.05$);2015年为PAFP和MADP显著高于PDOP($P < 0.05$);而后期阶段(2019年和2021年)却为PDOP显著高于MADP和PAFP($P < 0.05$),MADP显著高于PAFP($P < 0.05$)。



AF: 顶果木; DO: 降香黄檀; (a) - (e)、(k) - (o) 不同小写字母表示同一林分不同年份间差异显著 ($P < 0.05$); (f) - (j) 不同小写字母表示混交林中不同年份间顶果木胸径差异显著 ($P < 0.05$); 不同大写字母表示混交林中不同年份间降香黄檀胸径差异显著 ($P < 0.05$); *** 表示同一年份顶果木与降香黄檀胸径差异极显著 ($P < 0.001$); * 表示同一年份顶果木与降香黄檀胸径差异显著 ($P < 0.05$); ns 表示同一年份顶果木与降香黄檀胸径差异不显著 ($P > 0.05$)

AF: *A. fraxinifolius*; DO: *D. odorifera*; lowercase letters in (a) - (e), (k) - (o) indicate significant differences between different years of the same stand ($P < 0.05$); different lowercase letters in (f) - (j) indicate significant differences in DBH of AF between different years in the mixed forest, and different uppercase letters indicate significant differences in DBH of DO between different years in the mixed forest ($P < 0.05$); *** indicates an extreme significant difference in DBH between AF and DO in the same year ($P < 0.001$); * indicates a significant difference in DBH between AF and DO in the same year ($P < 0.05$); ns indicates no significant difference in DBH between AF and DO in the same year ($P > 0.05$)

图1 不同林分不同树种单株生物量的动态变化

Fig. 1 Dynamic changes of single tree biomass of different tree species in different stands

表3 不同林分中不同器官生物量的动态变化(t/hm²)Table 3 Dynamic changes of biomass of different organs in different stands (t/hm²)

林分类型 Stand type	年份 Year	树干 Trunk	树枝 Branch	树叶 Leaf	树根 Tree root	总 Total
PAFP	2013	9.71 ± 0.83 ^{aC}	0.75 ± 0.11 ^{aA}	0.68 ± 0.04 ^{aA}	2.73 ± 0.24 ^{aC}	13.87 ± 1.21 ^{aC}
	2015	13.32 ± 1.26 ^{bB}	1.21 ± 0.18 ^{aA}	0.87 ± 0.06 ^{bA}	3.76 ± 0.36 ^{bB}	19.16 ± 1.85 ^{bB}
	2019	18.50 ± 1.54 ^{cA}	1.96 ± 0.32 ^{bA}	1.12 ± 0.06 ^{cA}	5.23 ± 0.44 ^{cA}	26.81 ± 2.37 ^{cA}
	2021	22.43 ± 1.39 ^{dA}	2.64 ± 0.41 ^{cA}	1.29 ± 0.05 ^{dA}	6.36 ± 0.40 ^{dA}	32.72 ± 2.22 ^{dA}
MADP	2013	6.88 ± 0.40 ^{aB}	0.67 ± 0.06 ^{aA}	0.72 ± 0.01 ^{aAB}	1.99 ± 0.11 ^{aB}	10.26 ± 0.56 ^{aB}
	2015	12.68 ± 0.58 ^{bB}	1.66 ± 0.07 ^{bB}	1.28 ± 0.03 ^{bB}	3.73 ± 0.16 ^{bB}	19.35 ± 0.82 ^{bB}
	2019	21.67 ± 1.12 ^{cA}	4.23 ± 0.24 ^{cB}	2.26 ± 0.03 ^{cB}	6.53 ± 0.32 ^{cB}	34.69 ± 1.69 ^{cB}
	2021	30.92 ± 1.34 ^{dB}	7.57 ± 0.24 ^{dB}	3.11 ± 0.11 ^{dB}	9.42 ± 0.33 ^{dB}	51.02 ± 1.53 ^{dB}
PDOP	2013	2.09 ± 0.51 ^{aA}	0.62 ± 0.17 ^{aA}	0.85 ± 0.12 ^{aB}	0.77 ± 0.18 ^{aA}	4.33 ± 0.97 ^{aA}
	2015	5.55 ± 0.79 ^{bA}	1.80 ± 0.28 ^{bB}	1.64 ± 0.17 ^{bC}	1.97 ± 0.27 ^{bA}	10.96 ± 1.51 ^{bA}
	2019	25.45 ± 2.26 ^{cB}	9.73 ± 0.93 ^{cC}	4.40 ± 0.29 ^{cC}	8.50 ± 0.73 ^{cC}	48.08 ± 4.20 ^{cC}
	2021	39.27 ± 1.36 ^{dC}	15.77 ± 0.58 ^{dC}	5.83 ± 0.17 ^{dC}	12.90 ± 0.44 ^{dC}	73.77 ± 2.53 ^{dC}

注:不同小写字母表示同一林分同一组分不同年度间差异显著($P < 0.05$);不同大写字母表示同一组分同一年度不同林分间差异显著($P < 0.05$)

Note: Different lowercase letters indicate significant differences in the same organ of the same stand in different years ($P < 0.05$); different upper-case letters indicate significant differences in the same organ between different stands in the same year ($P < 0.05$)

2.3 不同林分不同树种各器官生物量分配比例的动态变化

由表4可知,随着林分年龄的增长,3种林分两树种各器官生物量分配比例存在明显的动态变化。无论是纯林还是混交林,顶果木树干生物量分配比例随年龄的增加呈递减的趋势,而降香黄檀则表现为递增的趋势。两树种树枝生物量分配比例随年龄的增加呈递增的趋势,而两树种树叶生物量分配比例的变化规律相似,均为随着年龄的增加而显著降低($P <$

0.05)。不同年份两树种根系生物量分配比例随时间的推移变化都很小,变化在1%以内,但变化较复杂。顶果木纯林2013年、2015年和2019年根系生物量分配比例显著高于2021年($P < 0.05$),而2013年、2015年和2019年间差异不显著($P > 0.05$)。而混交林中,顶果木根系生物量2013年和2015年显著高于2019年($P < 0.05$);降香黄檀为2013年显著低于2015年、2019年和2021年($P < 0.05$),而2015年和2019年显著高于2021年($P < 0.05$)。

表4 不同林分不同树种各器官生物量分配比例的动态变化(%)

Table 4 Dynamic changes of biomass distribution ratio of different organs of different tree species in different stands (%)

林分类型 Stand type	树种 Species	年份 Year	树干 Trunk	树枝 Branch	树叶 Leaf	树根 Tree root
PAFP	顶果木 <i>A. fraxini folius</i>	2013	70.08 ± 0.57 ^d	4.63 ± 1.48 ^a	5.68 ± 1.79 ^d	19.61 ± 0.28 ^b
		2015	69.90 ± 0.63 ^c	5.37 ± 1.62 ^b	5.09 ± 1.08 ^c	19.63 ± 0.10 ^b
		2019	69.54 ± 0.85 ^b	6.28 ± 1.63 ^c	4.57 ± 0.69 ^b	19.61 ± 0.14 ^b
		2021	69.19 ± 0.98 ^a	6.96 ± 1.74 ^d	4.30 ± 0.62 ^a	19.56 ± 0.18 ^a
MADP	顶果木 <i>A. fraxini folius</i>	2013	70.32 ± 0.36 ^d	4.39 ± 1.19 ^a	5.63 ± 0.95 ^d	19.67 ± 0.08 ^c
		2015	69.79 ± 0.58 ^c	5.71 ± 1.43 ^b	4.85 ± 0.86 ^c	19.64 ± 0.07 ^c
		2019	69.41 ± 0.86 ^b	6.51 ± 1.68 ^c	4.49 ± 0.73 ^b	19.59 ± 0.14 ^b
		2021	69.04 ± 1.02 ^a	7.20 ± 1.85 ^d	4.23 ± 0.70 ^a	19.53 ± 0.18 ^a
	降香黄檀 <i>D. odorifera</i>	2013	46.00 ± 3.39 ^a	12.77 ± 2.27 ^a	23.97 ± 6.27 ^d	17.27 ± 0.66 ^a
		2015	50.27 ± 1.35 ^b	16.06 ± 1.44 ^b	15.76 ± 2.86 ^c	17.91 ± 0.10 ^c

续表

Continued table

林分类型 Stand type	树种 Species	年 Year	树干 Trunk	树枝 Branch	树叶 Leaf	树根 Tree root
PDOP	降香黄檀 <i>D. odorifera</i>	2019	52.26 ± 1.14 ^c	18.93 ± 1.73 ^c	10.99 ± 2.76 ^b	17.81 ± 0.15 ^c
		2021	52.97 ± 0.61 ^d	20.49 ± 1.62 ^d	8.92 ± 1.97 ^a	17.63 ± 0.25 ^b
		2013	46.00 ± 3.39 ^a	12.77 ± 2.27 ^a	23.97 ± 6.27 ^d	17.27 ± 0.66 ^a
		2015	50.08 ± 1.34 ^b	15.86 ± 1.39 ^b	16.15 ± 2.81 ^c	17.91 ± 0.10 ^c
		2019	52.09 ± 1.14 ^c	18.57 ± 1.63 ^c	11.49 ± 2.69 ^b	17.85 ± 0.13 ^c
		2021	52.83 ± 0.71 ^d	20.11 ± 1.62 ^d	9.38 ± 2.11 ^a	17.68 ± 0.22 ^b

注:不同小写字母表示同一林分同一组分不同年度间差异显著($P < 0.05$)Note: Different lowercase letters indicate significant differences in the same organ of the same stand in different years ($P < 0.05$)

2.4 不同林分各器官生物量分配比例的动态变化

由表 5 可知,PAFP 和 MADP 林分树干生物量分配比例随年龄的增加呈显著递减的趋势 ($P < 0.05$),而 PDOP 却表现为显著递增的趋势 ($P < 0.05$)。3 种林分树枝生物量比例均随着林分年龄的增长而显著增加 ($P < 0.05$),但不同林分各年份间差异不同,PAFP 为 2019 年和 2021 年显著高于 2013 年和 2015 年 ($P < 0.05$),MADP 和 PDOP 林分树枝生物量为各年份间差异显著 ($P < 0.05$)。3 种林分树叶生物量比例表现为显著递减趋势 ($P < 0.05$),PAFP 和 PDOP 为 2013 年和 2015 年显著高于 2019

年和 2021 年 ($P < 0.05$),2013 年显著高于 2015 年 ($P < 0.05$);而 MADP 则表现为 2013 年显著高于 2021 年 ($P < 0.05$),其余各年份间均差异不显著 ($P > 0.05$)。3 种林分树根生物量分配比例总体上随着林分年龄的增加而递减,PAFP 为 2013 年和 2015 年显著高于 2021 年 ($P < 0.05$),MADP 为各年份间均差异显著 ($P < 0.05$),PDOP 为 2015 年显著高于 2013 年、2019 年和 2021 年 ($P < 0.05$),2013 年和 2019 年显著高于 2021 年 ($P < 0.05$),但 2013 年与 2019 年间差异不显著 ($P > 0.05$)。

表 5 不同林分不同器官生物量分配比例 (%)

Table 5 Biomass allocation ratios of different organs in different stands (%)

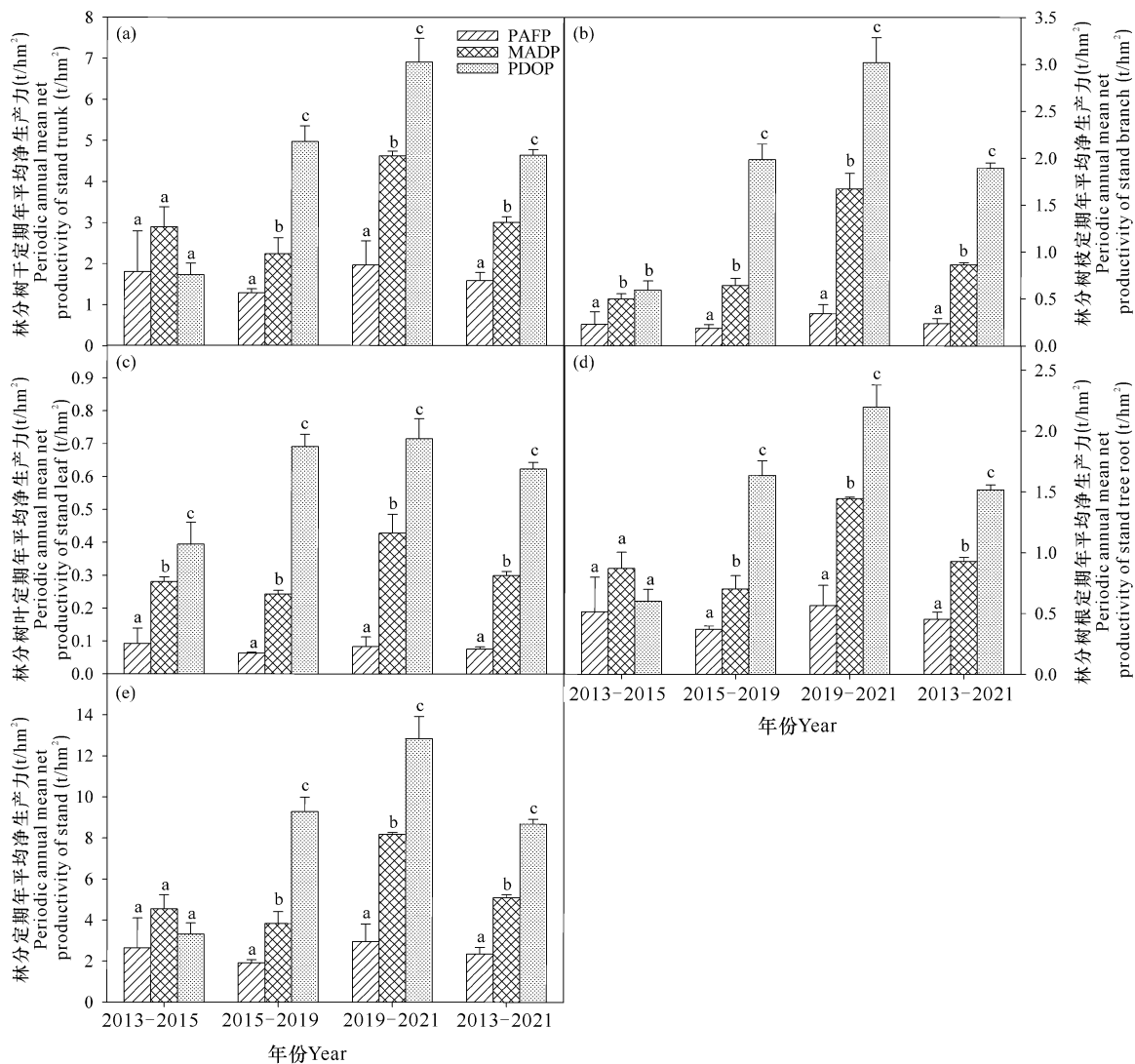
林分类型 Stand type	年份 Year	树干 Trunk	树枝 Branch	树叶 Leaf	树根 Tree root
PAFP	2013	69.98 ± 0.16 ^{cC}	5.42 ± 0.34 ^{aA}	4.93 ± 0.15 ^{cA}	19.67 ± 0.02 ^{bC}
	2015	69.54 ± 0.16 ^{bC}	6.30 ± 0.31 ^{aA}	4.55 ± 0.14 ^{bA}	19.62 ± 0.02 ^{bC}
	2019	69.01 ± 0.32 ^{abC}	7.28 ± 0.53 ^{bA}	4.19 ± 0.14 ^{aA}	19.53 ± 0.06 ^{abC}
	2021	68.56 ± 0.48 ^{aC}	8.05 ± 0.73 ^{bA}	3.94 ± 0.15 ^{aA}	19.44 ± 0.11 ^{aC}
MADP	2013	67.05 ± 0.42 ^{dB}	6.50 ± 0.30 ^{abB}	7.05 ± 0.39 ^{bbB}	19.40 ± 0.04 ^{dB}
	2015	65.51 ± 0.29 ^{cB}	8.59 ± 0.16 ^{bbB}	6.64 ± 0.19 ^{abB}	19.26 ± 0.03 ^{cB}
	2019	62.47 ± 0.19 ^{bB}	12.18 ± 0.17 ^{cbB}	6.51 ± 0.29 ^{abB}	18.83 ± 0.02 ^{bbB}
	2021	60.59 ± 0.85 ^{abB}	14.85 ± 0.67 ^{dB}	6.11 ± 0.39 ^{abB}	18.46 ± 0.12 ^{abB}
PDOP	2013	48.26 ± 0.74 ^{aA}	14.20 ± 0.66 ^{aC}	19.83 ± 1.48 ^{cC}	17.72 ± 0.08 ^{bA}
	2015	50.64 ± 0.27 ^{bA}	16.42 ± 0.28 ^{bcC}	14.99 ± 0.57 ^{bcC}	17.94 ± 0.02 ^{cA}
	2019	52.92 ± 0.07 ^{cA}	20.23 ± 0.17 ^{ccC}	9.17 ± 0.22 ^{acC}	17.68 ± 0.02 ^{bA}
	2021	53.24 ± 0.02 ^{cA}	21.37 ± 0.14 ^{dcC}	7.91 ± 0.10 ^{acC}	17.48 ± 0.04 ^{aA}

注:不同小写字母表示同一林分同一组分不同年度间差异显著($P < 0.05$);不同大写字母表示同一组分同一年度不同林分间差异显著($P < 0.05$)Note: Different lowercase letters indicate significant differences in the same organ of the same stand in different years ($P < 0.05$); different upper-case letters indicate significant differences in the same organ between different stands in the same year ($P < 0.05$)

2.5 不同林分平均净生产力的动态变化

由图2可知,在2013-2015年、2015-2019年和2019-2021年,PAFP定期年平均净生产力分别为 2.64 t/hm^2 、 1.92 t/hm^2 、 2.95 t/hm^2 ;MADP分别为 4.55 t/hm^2 、 3.83 t/hm^2 、 8.17 t/hm^2 ;PDOP相应分别为 3.32 t/hm^2 、 9.28 t/hm^2 、 12.84 t/hm^2 。PAFP、MADP和PDOP 3种林分在2013-2021年的定期年平均净生产力分别为 2.36 t/hm^2 、 5.09 t/hm^2 、 8.68 t/hm^2 。方差分析表明,除2013-2015年3种林分的定期年平均净生产力无显著差异外($P > 0.05$),2015-2019年、2019-2021年和2013-2021

年均表现为PDOP显著高于MADP和PAFP, MADP显著高于PAFP ($P < 0.05$)。3种林分树干和树根定期年平均净生产力的差异性变化规律与林分定期年平均净生产力相同;树枝2013-2015年表现为MADP和PDOP显著高于PAFP ($P < 0.05$),前两者无显著差异 ($P > 0.05$);2015-2019年、2019-2021年和2013-2021年均表现为PDOP显著高于MADP和PAFP ($P < 0.05$),MADP显著高于PAFP ($P < 0.05$);而树叶4个定期年平均净生产力指标均表现为PDOP显著高于MADP和PAFP ($P < 0.05$),MADP显著高于PAFP ($P < 0.05$)。



不同小写字母表示同一时期不同林分间差异显著 ($P < 0.05$)

Different lowercase letters indicate significant differences among different stands at the same period ($P < 0.05$)

图2 不同林分和各器官在不同时期定期年平均净生产力比较

Fig. 2 Comparison of periodic annual mean net productivity of different stands and organs at different periods

3 讨论

3.1 林分类型对岩溶森林生物量的影响

林分生物量的形成和积累与生物气候条件、立地生境、林分状况、树种性质、林分年龄以及人为干扰等因素有关^[12]。岩溶地区生态环境恶劣,森林生物量明显低于同区域的非岩溶森林^[20],属于低生物量的森林生态系统^[11,12,13-18]。有研究表明,喀斯特天然林的生物量是随着林分年龄的增加而增加,从幼龄林、中龄林、近熟林、成熟林到过熟林,林分生物量分别为 50 - 60 t/hm²、90 - 110 t/hm²、120 - 140 t/hm²、160 - 240 t/hm² 和 331.46 t/hm²^[11-16];而喀斯特地区 18 a 生马尾松天然林和 19 a 生马尾松人工林乔木生物量分别为 103.46 t/hm²、140.55 t/hm²^[18]。本研究中,3 种修复林分的生物量均随着林分年龄的增长而显著增加,以 PAFP 的生物量最低,其值为 (32.72 ± 2.22) t/hm²,其次是 MADP,其值为 (51.02 ± 1.53) t/hm²,PDOP 最高,其值为 (73.77 ± 2.53) t/hm²。本研究表明,修复 10 a 的林分生物量明显低于保存较好的原生性森林^[11,12],也明显低于 18 - 19 a 生松林^[18],PAFP 的生物量明显低于同区域的次生幼林,MADP 略高于同区域的次生幼林,而 PDOP 却显著高于同区域的次生幼林^[17]。3 种修复林分的生物量是当地黄荆灌丛的 2 - 4.6 倍^[13],说明采用豆科固氮树种修复石漠化可以显著提高林分生物量,且 PDOP 的生物量持续修复作用明显优于 PAFP。本研究结果为石漠化植被修复中的树种和林分选择提供了科学依据。

3.2 树种和林分类型对岩溶森林生物量分配的影响

由于林分所处的环境,以及林分树种组成、年龄、密度、林木生长级别不同,生物量的分配也不同^[4]。岩溶地区与非岩溶地区、针叶树种与阔叶树种、常绿树种与落叶树种、优势木与劣势木、人工林与天然林以及不同年龄阶段林分各器官的生物量分配明显有区别^[14,20,21]。由于岩溶森林生态系统生境异质性强、树种组成复杂多样、同一树种个体数少、个体分化明显、树枝和树叶生物量估测方程精度低等^[12,15],关于岩溶森林生物量分配的研究成果较少。刘之洲等^[18]对岩溶地区 18 - 19 a 生针叶林的生物量分配研究发现,马尾松天然林的树干(64.15%)和树根(11.56%)生物量分配比例高于马尾松人工林树干(57.54%)和树根(9.41%),而马尾松人工林的树枝(25.83%)和树叶(7.22%)生物量分配比例却高于马尾松天然林

树枝(17.47%)和树叶(6.82%)。朱守谦等^[12]的研究也发现,岩溶广东松林地上生物量分配比例以树枝最高,为 51.05%,其次才是树干,为 41.43%,树叶的生物量分配比例仅为 7.52%。

本研究表明,不同树种各器官生物量的分配比例存在显著差异,而且随着林分年龄的增加,各器官生物量分配比例也在发生明显的变化。本研究中,10a 生林分,PAFP 各器官生物量分配比例为树干(68.56%)>树根(19.44%)>树枝(8.05%)>树叶(3.94%),而 PDOP 却表现为树干(53.24%)>树枝(21.37%)>树根(17.48%)>树叶(7.91%)。本研究还发现,随着林分年龄的增长,不同树种不同器官生物量分配比例的变化规律并不一致,PAFP 树干、树叶和根系生物量分配比例随着年龄的增加而显著下降,而树枝生物量分配比例却显著增加;PDOP 树干和树枝生物量分配比例随着年龄的增长而显著增加,而树叶和树根却显著下降。同时发现,混交林分不同器官生物量的分配比例处于两种纯林(PAFP 和 PDOP)之间。上述结果表明不同林分不同树种各器官生物量的分配规律会随着林分年龄的增加而发生改变,揭示了岩溶地区 PDOP 和 PAFP 器官生物量随年龄变化的分配规律。因此,在未来森林生物量和碳储量研究中应充分考虑这种变化,以提高估测精度。

3.3 树种和林分类型对岩溶森林生产力的影响

关于岩溶森林平均净生产力的研究较少,有研究表明茂兰喀斯特顶极森林和次顶极森林乔木层的年度净初级生产力分别为 7.06 t/hm² 和 5.09 t/hm²^[15],而贵州喀斯特地区马尾松天然林、马尾松人工林乔木层年平均净生产力分别为 5.73 t/hm² 和 7.39 t/hm²^[18](作者根据其林分生物量和年龄修订)。本研究中,2013 - 2021 年,林分定期年平均净生产力以 PDOP (8.68 t/hm²) 最高,PAFP (2.36 t/hm²) 最低,MADP (5.09 t/hm²) 居二者之间。可见,除 PAFP 外,PDOP 的净初级生产力明显高于岩溶顶极森林和马尾松人工林,MADP 也与岩溶次顶极森林持平。说明采用豆科固氮树种修复 10 a 的林分净生产力达到甚至超过了岩溶顶极和次顶极森林乔木层的净生产力,PAFP、MADP、PDOP 在 2019 - 2021 年的平均净生产力比 2015 - 2019 年分别提高 53.65%、113.32%、38.36%,实现了岩溶石漠化生态系统生产力的快速修复和提升。

岩溶顶极森林地上部分净初级生产力以树叶的

占比最高(39.75%),其次是树干(34.68%),树枝仅占6.91%;而次顶极森林中树叶净初级生产力的分配比例更高,达68.57%,树干的比下降为22.59%,树枝为8.84%^[15]。这与天然森林树木的生产结构较人工林变化大,岩溶森林小生境的特殊性、多样性以及组成树种的复杂性有关,从而造成岩溶天然森林树枝、树叶生物量及其垂直分布的多变和异常^[12]。岩溶地区马尾松天然林树干、树枝、树叶平均净生产力分别占地上部分生产力的72.58%、19.72%、7.69%,马尾松人工林树干、树枝、树叶平均净生产力分别占地上部分生产力的63.53%、26.40%、7.92%^[18]。本研究中3种修复林分地上部分净初级生产力分配格局与岩溶地区天然顶极、次顶极森林不同^[15],与马尾松天然林、人工林相似^[18],这是由树种特性和林分结构不同所致。

本研究还发现,不同林分、不同树种和不同器官的定期平均净生产力随着林分年龄的增加存在明显的变化,PAFP树叶的年平均净生产力非常低,仅为0.08 t/hm²,只占PDOP(0.62 t/hm²)的12.90%和MADP(0.30 t/hm²)的26.67%。PAFP树叶的生产能力显著下降,光合面积持续减少,这可能是随着时间推移PAFP逐渐衰退的重要原因。同时也表明顶果木是一个喜肥的树种,在早期施肥的情况下,生长表现非常好,但后期停止施肥后,生长缓慢。因此,造林应选择在土壤较肥沃的地方。

4 结论

研究表明,3种修复林分生物量均随时间的推移而显著增加。随着林分年龄的增长,不同林分、不同树种各器官生物量均显著增加,但变化规律有所不同。PAFP树干、树叶和树根生物量分配比例显著下降,树枝生物量比例显著增加;PADP却表现为树干、树枝生物量分配比例显著增加,树叶和树根生物量比例显著下降;MADP各器官生物量分配比例居两者之间。3种修复林分在2015-2019年、2019-2021年和2013-2021年的林分定期平均净生产力均存在显著差异,表现为PDOP>MADP>PAFP,3种修复林分间差异显著;经过10a的修复,豆科固氮树种人工林的林分净生产力达到甚至超过了岩溶顶极、次顶极森林乔木层的净生产力,实现了岩溶石漠化生态系统生产力的快速修复和提升。

参考文献

[1] 方精云,郭柯,王国宏,等.《中国植被志》的植被分类系

统、植被类型划分及编排体系[J].植物生态学报,2020,44(2):96-110.

- [2] REYER C, LASCH-BORN P, SUCKOW F, et al. Projections of regional changes in forest net primary productivity for different tree species in Europe driven by climate change and carbon dioxide [J]. *Annals of Forest Science*, 2014, 71(2): 211-225.
- [3] BARON Y M, PHILLIPS R, MILO R. The biomass distribution on Earth [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2018, 115(25): 6506-6511.
- [4] 刘世荣,温远光.杉木生产力生态学[M].北京:气象出版社,2005:15-20.
- [5] 温远光,周晓果,朱宏光.桉树生态营林理论、技术与实践[M].北京:科学出版社,2020:79-94.
- [6] 温远光,陈放,刘世荣,等.广西桉树人工林物种多样性与生物量关系[J].林业科学,2008,44(4):14-19.
- [7] 冯宗炜,王效科,吴刚.中国森林生态系统的生物量和生产力[M].北京:科学出版社,1999:25-40.
- [8] 方精云,刘国华,徐嵩龄.我国森林植被的生物量和净生产量[J].生态学报,1996,16(5):497-508.
- [9] ROCHA J H T, DE MORAES GONÇALVES J L, DE VICENTE FERRAZ A, et al. Growth dynamics and productivity of an *Eucalyptus grandis* plantation under omission of N, P, K Ca and Mg over two crop rotation [J]. *Forest Ecology and Management*, 2019, 447: 158-168.
- [10] AMMER C. Diversity and forest productivity in a changing climate [J]. *New Phytologist*, 2019, 221(1): 50-66.
- [11] 杨汉奎,程仕泽.贵州茂兰喀斯特森林群落生物量研究[J].生态学报,1991,11(4):307-312.
- [12] 朱守谦,魏鲁明,陈正仁,等.茂兰喀斯特森林生物量构成初步研究[J].植物生态学报,1995,19(4):358-367.
- [13] 庞世龙,欧芷阳,莫汉宁,等.桂西喀斯特地区3种典型灌丛生物量及生产力研究[J].中南林业科技大学学报,2014,34(9):86-90.
- [14] 汪珍川,杜虎,宋同清,等.广西主要树种(组)异速生长模型及森林生物量特征[J].生态学报,2015,35(13):4462-4472.
- [15] 罗东辉.贵州茂兰喀斯特植被不同演替阶段的生物量与净初级生产力[D].上海:华东师范大学,2009.
- [16] 杜有新,潘根兴,李恋卿,等.黔中喀斯特山区退化生态系统生物量结构与N、P分布格局及其循环特征[J].生态学报,2010,30(23):6338-6347.
- [17] 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.
- [18] 刘之洲,宁晨,闫文德,等.喀斯特地区3种针叶林林分

- 生物量及碳储量研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2017,37(10):105-111.
- [19] 王克林,岳跃民,陈洪松,等. 喀斯特石漠化综合治理及其区域恢复效应[J]. 生态学报,2019,39(20):7432-7440.
- [20] 于维莲,董丹,倪健. 中国西南山地喀斯特与非喀斯特森林的生物量与生产力比较[J]. 亚热带资源与环境学报,2010,5(2):25-30.
- [21] 周玉荣,于振良,赵士洞. 我国主要森林生态系统碳贮量和碳平衡[J]. 植物生态学报,2000,24(5):518-522.

Biomass, Productivity and Their Dynamic Changes of Different Restoration Stands in Karst Rocky Desertification

ZHOU Xiaoguo¹, SUN Dongjing¹, WEN Yuanguang^{1,2}, WANG Lei², MING Angang³, JIA Hongyan³, ZHU Hongguang², ZHAO Yanyan¹, HUANG Yongjie¹, LIANG Jia¹

(1. Institute of Eco-Environmental Research, Guangxi Academy of Sciences, Nanning, Guangxi, 530007, China; 2. Guangxi Key Laboratory of Forest Ecology and Conservation, Forestry College, Guangxi University, Nanning, Guangxi, 530004, China; 3. Experimental Center of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Pingxiang, Guangxi, 532600, China)

Abstract: In order to clarify the characteristics of biomass and productivity and their dynamic change rules of different restoration stands in Karst rocky desertification, pure *Acrocarpus fraxinifolius* plantation (PAFP), pure *Dalbergia odorifera* plantation (PDOP) and mixed *A. fraxinifolius* × *D. odorifera* plantation (MADP) constructed in 2011 were selected as research objects. The fixed monitoring plots were set up to study the characteristics of biomass, periodic average net productivity and their dynamic changes of three kinds of restoration stands based on the four stand biomass measurements in 2013, 2015, 2019 and 2021. The results showed that the biomass of the three restoration stands had increased significantly with age. The biomass of organs in different stands and tree species changed similarly. However, the biomass variation of different organs was different. From 2013 to 2021, the periodic annual average net productivity was the highest (8.68 t/hm²) in PDOP, the lowest (2.36 t/hm²) in PAFP and MADP (5.09 t/hm²) was between the two. In 2015–2019, 2019–2021 and 2013–2021, there were significant differences in the periodic average net productivity of the three restoration stands. PDOP was significantly higher than MADP and PAFP, and MADP was significantly higher than PAFP. Our studies found that the net productivity of the restored Karst forest after 10 years restoration using legume nitrogen fixing tree species reached or even exceeded the net productivity of the Karst climax and sub-climax forests. The average net productivity of PAFP, MADP and PDOP in 2019–2021 increased by 53.65%, 113.32% and 38.36% respectively compared with 2015–2019, which indicated that the rapid restoration and improvement of ecosystem productivity in Karst rocky desertification were realized. The annual average net productivity of leaves in PAFP stands was very low, only 0.08 t/hm², accounting for 12.90% of PDOP (0.62 t/hm²) and 26.67% of MADP (0.30 t/hm²), which was an important reason for the gradual decline of PAFP over time.

Key words: rocky desertification; pure plantation; mixed plantation; biomass; periodic mean net productivity; dynamic change

责任编辑:唐淑芬