

DOI: 10.5846/stxb201806051267

卢立华, 农友, 李华, 杨予静, 明安刚, 雷丽群, 何日明, 陈琳. 植被恢复模式对石漠化生态系统碳储量的影响. 生态学报, 2019, 39(19): - .

Lu L H, Nong Y, Li H, Yang Y J, Ming A G, Lei L Q, He R M, Chen L. Effect of vegetation restoration patterns on the carbon storage in a rocky desertification ecosystem. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(19): - .

植被恢复模式对石漠化生态系统碳储量的影响

卢立华^{1,2,*}, 农友^{1,2}, 李华^{1,2}, 杨予静³, 明安刚^{1,2}, 雷丽群^{1,2}, 何日明^{1,2}, 陈琳^{1,2}

1 中国林业科学研究院热带林业实验中心, 凭祥 532600

2 广西友谊关森林生态系统国家定位观测研究站, 凭祥 532600

3 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 北京 100091

摘要: 为揭示石漠化生态系统碳储量对植被恢复模式的响应, 在广西天等县中度石漠化山地, 研究了吊丝竹纯林 (*Dendrocalamus minor*, D)、任豆纯林 (*Zenia insignis*, Z)、任豆、蚬木 (*Burretiodendron hsienmu*) 和顶果木 (*Acrocarpus fraxinifolius*) 混交林 (*mixed plantation*, M), 以及相应同龄封育林 (D_{CK} 、 Z_{CK} 、 M_{CK}) 的碳储量。结果表明: 人工林碳储量显著高于相应同龄封育林的碳储量, D、Z、M 人工林碳储量分别为 67.75、66.56 和 121.20 t/hm², 而 D_{CK} 、 Z_{CK} 、 M_{CK} 封育林仅为 49.75、52.89、60.86 t/hm²。碳储量在乔木层、地被物层、土壤层分配排序因生态系统类型而异, 如 M: 乔木层 > 土壤层 > 地被物层; D 和 Z: 土壤层 > 乔木层 > 地被物层; D_{CK} 、 Z_{CK} 和 M_{CK} : 土壤层 > 地被物层 > 乔木层。此外, M、D、Z 乔木层年平均碳储量差异显著, 而封育林尚未形成乔木层, 其植被碳储量则随封育时间的增加而提高, 即 $M_{CK} > Z_{CK} > D_{CK}$ 。可见, 在中度石漠化山地, 植被恢复模式显著影响生态系统碳储量及其分配。人工造林相对于封山育林更能快速促进植被恢复、形成乔木林, 从而提高生态系统碳储量。

关键词: 植被恢复; 石漠化; 生态系统; 碳储量

Effect of vegetation restoration patterns on the carbon storage in a rocky desertification ecosystem

LU Lihua^{1,2,*}, NONG You^{1,2}, LI Hua^{1,2}, YANG Yujing³, MING Angang^{1,2}, LEI Liqun^{1,2}, HE Riming^{1,2}, CHEN Lin^{1,2}

1 Experimental Center of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Pingxiang 532600, China

2 Guangxi Youyiguan Forest Ecosystem Research Station, Pingxiang 532600, China

3 Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

Abstract: To explore the responses of carbon storage to different vegetation restoration patterns in a rocky desertification ecosystem in Tiandeng County, Guangxi, we selected pure plantations of *Dendrocalamus minor* (D) and *Zenia insignis* (Z), a mixed plantation (M) of Z, *burretiodendron hsienmu* (B) and *Acrocarpus fraxinifolius* (A), as well as their corresponding closed forests (D_{CK} , Z_{CK} , M_{CK}) with same ages to determine the carbon storage. Our results showed that the carbon storages of pure and mixed plantations were significantly higher than those of the corresponding closed forests, ($P < 0.05$), since the carbon storages of D, Z, and M plantations were 67.75, 66.56, and 121.20 t/hm², separately, whereas those of D_{CK} , Z_{CK} , and M_{CK} were only 49.75, 52.89, and 60.86 t/hm², respectively. The orders of carbon storage in the layers of tree, ground cover, and soil varied with the ecosystem types. For example, in M: tree layer > soil layer > ground cover layer; in D and Z plantations: soil layer > tree layer > ground cover layer; in D_{CK} , Z_{CK} , and M_{CK} : soil layer > ground cover layer > tree layer. Additionally, the annual average carbon storage of the tree layer was significantly different among

基金项目: 国家国际科技合作专项项目 (2015DFA31440)

收稿日期: 2018-06-05; 网络出版日期: 2019-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: 07718526136@sina.com

M, D, and Z ($P < 0.05$). However, the enclosed forests did not form arboreal forest and the carbon storage of vegetation increased with enclosure time ($M_{CK} > Z_{CK} > D_{CK}$). This study suggests that different vegetation restoration patterns can significantly affect the carbon storage and its allocation in the moderate rocky desertification ecosystem, and afforestation is a more effective way to improve the vegetation restoration, form arboreal forests, and further increase the ecosystem carbon storage, compared to the closed forest.

Key Words: vegetation restoration; rocky desertification; ecosystem; carbon storage

以气候变暖为特征的全球气候变化,对生态系统、植物种群、乃至整个生物圈都会产生巨大影响^[1-3],气候变暖已成为世界各国面临的重大挑战之一^[4]。在导致全球气候变暖的诸多因素当中,90%以上来自温室气体的排放^[5],而 CO₂为重要的温室气体,因此,有效地控制大气中 CO₂浓度对减缓气候变暖具有重要意义。

森林作为陆地上最大的生态系统,其面积虽仅占陆地总面积的 26%,但所固持的碳总量却高达 1146Pg^[6],约占全球植被碳储量的 86%^[7],土壤碳储量的 73%^[8]。森林每年固定的碳总量约占整个陆地上生物固碳总量的 2/3^[9],可见,森林在固存 CO₂、适应和减缓气候变化、维持全球碳平衡中发挥着十分重要的作用^[10-13],通过造林和再造林增加陆地生态系统碳储量是调节与控制大气 CO₂最有效的途径^[14]。

岩溶生态系统作为陆地生态系统的重要组成部分^[15-16],在全球碳循环中同样发挥着重要的作用^[17-19]。因此,对岩溶生态系统碳的研究亦较活跃,已开展了植被自然恢复过程中的土壤有机碳库特征^[20]、石漠化对土壤碳库^[21]、不同植被类型的碳格局^[22]、植被类型对土壤有机碳、氮^[23]、植被恢复模式与林龄及豆科植物对岩溶生态系统碳储量^[24-28]等研究。结果表明,植被恢复都能提高岩溶生态系统的碳储量,但以科学的混交模式效果更佳。但对于生境较为严酷的中度石漠化生态系统的研究却少有涉及,情况不明。为此,开展了本研究,以期探明植被恢复模式对中度石漠化生态系统碳储量的影响。研究结果将为石漠化山地植被恢复与生态重建的树种与模式选择提供依据,同时,对石漠化生态系统的碳汇能力提升与碳计量等具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于广西天等县驮堪乡(107°15'21"—107°23'14"E, 23°04'55"—23°07'01"N),属南亚热带季风气候区,低山丘陵地貌。年平均气温 20.6℃,年平均降水量 1429 mm,≥10℃积温 6000—7000℃,最冷月均温 10℃以上。全县面积 2159.25 km²,其中石灰岩溶面积占 77.4%,是广西岩溶面积所占比例最高、石漠化最严重的市县之一。因研究区人、畜活动较频繁,原生植被破坏严重,残存的植物种类较少,灌木类仅偶见红背山麻杆(*Alchornea trewioides*)、桃金娘(*Rhodomyrtus tomentosa*)、野牡丹(*Melastoma candidum*)等。草本类偶有五节芒(*Miscanthus floridulus*)、蔓生莠竹(*Microstegium vagans*)、肾蕨(*Nephrolepis auriculata*)等。

1.2 试验设计

在对研究区进行全面踏查的基础上,选择具有区域代表性、立地条件基本一致的 34 年生任豆(*Zenia insignis*)、蚬木(*Burretiodendron hsienmu*)、顶果木(*Acrocarpus fraxinifolius*)多树种同龄等比例中龄混交林,及在区域石漠化治理中应用较广的任豆纯林(10 年生)和吊丝竹(*Dendrocalamus minor*)纯林(9 年生)(分别以 M、Z、D 为代号)及与它们对应的同龄封育林为对照(分别以 M_{CK}、Z_{CK}、D_{CK}为代号),各设置 3 个面积为 20 m×30 m 的调查样地,共 18 块样地。吊丝竹(D)为乔木状禾本科植物,为便于叙述,文中亦称为乔木。M、Z 的株行距均为 2 m×3 m,初植密度 1666 株/hm²,D 为 4 m×5 m,初植密度为 500 丛/hm²,封育林按全封方式管理。2016 年 8 月下旬对样地进行调查,M、Z、D 林分现存密度分别为:1185、1320 株/hm²及 465 丛/hm²,郁闭度分别为 0.90、0.75、0.8。试验地概况见表 1。

表 1 试验地概况

Table 1 General situation of the study site

项目 Item	处理 Treatment					
	D	D _{CK}	Z	Z _{CK}	M	M _C
土壤厚 Soil thickness/cm	35.5	34.1	33.3	34.9	36.3	35.9
岩石裸露率 Rock bare rate/%	53.6	54.2	55.1	54.9	54.3	53.8
石砾含量 Graved content/%	6.3	6.5	6.2	6.7	6.5	6.6
坡位 Slope positions	下坡	下坡	下坡	下坡	下坡	下坡
海拔 Altitude/m	320	330	310	340	310	330

D, 吊丝竹纯林, Pure plantations of *Dendrocalamus minor*; D_{CK}, 与吊丝竹纯林同龄的封育对照林, The enclosed forests at the same-age with *Dendrocalamus minor* pure plantations; Z, 任豆纯林, Pure plantations of *Zenia insignis*; Z_{CK}, 与任豆纯林同龄的封育对照林, The enclosed forests at the same-age with *Zenia insignis* pure plantations; M, 任豆×蚬木×顶果木混交林, Mixed plantations of *Zenia insignis*, *Buerretiodendron hsienmu*, and *Acrocarpus fraxinifolius*; M_C, 与任豆×蚬木×顶果木混交林同龄的封育对照林, The enclosed forests at the same-age with *Zenia insignis*, *Buerretiodendron hsienmu*, and *Acrocarpus fraxinifolius* mixed plantation

1.3 测定内容与方法

1.3.1 乔木生长量测定及生物量计算

利用测树围尺测定样地内胸径≥5 cm 的乔木胸径,用测高仪测定树高。并分别采集任豆、吊丝竹不同器官分析样各 200 g 及混交林各树种相同器官等比例的混合样共 200 g,用于测定乔木各器官的含水率与碳密度。同时,基于每木调查数据,利用石山林回归方程^[29]计算它们乔木各器官生物量。

1.3.2 灌木和草本生物量及凋落物现存量测定

在每个样地 4 个角及中心位置各设置 1 个 2 m×2 m 样方,在每个样方左下角各设置 1 个 1 m×1 m 小样方,每个样地共设 5 个样方,5 小样方。然后,调查每个样方内所有灌木、草本种类、株数、株高、覆盖度等,采用收获法将各个样方的所有灌木、草本整株挖起,并分开放置,除去根部泥土后,按地上、地下部分别称重与记录。将小样方内全部凋落物收集并称重,同时,分别采集灌木、草本地地上、地下部及凋落物的分析样各 200 g,用于测定它们的含水率与碳密度。根据样方中灌木、草本地地上、地下部生物量平均值及小样方凋落物现存量平均值,计算单位面积灌木、草本地地上、地下部生物量及凋落物现存量。

1.3.3 土壤样品采集

在每样地中,选代表性位置挖土壤剖面至基岩,按 0—10 cm、10—20 cm、20 cm 以下 3 个层次各打入 4 个容积为 100 cm³的环刀,其中 1 个环刀土用于测定土壤容重,另 3 个环刀土取出混合均匀后用四分法取土约 200 g 用于测定土壤碳密度。同时,在每个剖面的各个土层中分别用铝盒取土约 20 g 测定它们的土壤含水率。

1.3.4 碳含量测定与碳储量计算

将植物样品置于 65℃烘箱中烘干后粉碎,土壤样品置于室内通风处自然风干磨碎过筛后做好标记储藏备用。植物和土壤的有机碳密度均采用重铬酸钾-水合加热法测定。

植物碳储量(t/hm²)=植物有机碳密度(kg/t)×单位面积生物量(t/hm²)÷1000

土层碳储量(t/hm²)=土层容重(t/m³)×土层深度(m)×土层碳密度(kg/t)×(1-岩石裸露率)×(1-石砾含量)×10000 m²÷1000

土壤碳储量=3 个土层碳储量之和

1.4 数据处理

采用 Excel 2007 进行数据处理与作图,利用 SPSS 17.0 统计分析软件进行方差分析与多重比较。

2 结果与分析

2.1 乔木层碳储量

从表 2 见,3 种人工林的乔木层碳储量为 M(62.57)>D(15.46)>Z(11.32 t/hm²),以混交林(M)为最高,

与任豆(Z)、吊丝竹(D)纯林比较差异显著($P < 0.05$)。因3种人工林的林龄不同,为使它们具有可比性,将它们的碳储量换算为年平均碳储量。表2显示,年平均碳储量亦是 $M(1.84) > D(1.72) > Z(1.13 \text{ t/hm}^2)$, 年平均碳储量处理间差异显著($P < 0.05$)。其中:M、D与Z比较都差异显著,而M、D间比较差异不显著,但M比D高了6.98%。表2还发现,不同处理的乔木层地上、地下部碳储量分配比例各异,其中:地上部碳储量分配比例以M最高,达85.14%,D最低,仅78.01%;而地下部则相反,以D最高,达21.99%,M最低,仅14.86%。

3种不同年龄封育林,仅 M_{CK} 处理有 0.25 t/hm^2 的乔木碳储量。表明 D_{CK} 、 Z_{CK} 都仍处于灌草演替阶段, M_{CK} 虽经34年的封育,但仅有零星乔木出现,尚处于乔灌丛初级演替阶段。

表2 乔木层各组分碳储量/(t/hm^2)

Table 2 Carbon storage of different components in the tree layer

组分 Component	D	D_{CK}	Z	Z_{CK}	M	M_{CK}
地上部 Aboveground part	12.06(78.01) b		9.23(81.45) c		53.27(85.14) a	0.21(84.00) d
地下部 Belowground part	3.40(21.99) b		2.09(18.46) c		9.30(14.86) a	0.04(16.00) d
合计 Total	15.46(100) b		11.32(100) c		62.57(100) a	0.25(100) d
年平均 Annual average	1.72 a		1.13 b		1.84 a	

同行不同字母表示处理间碳储量差异显著($P < 0.05$), 括号前数据为碳储量, 括号内数据为组分碳储量占乔木层碳储量的百分数

2.2 地被物的碳储量与分配

本研究的地被物包括了灌木层、草本层和凋落物层3个层次。从表3见,6种处理地被物的碳储量在 $0.84\text{—}4.98 \text{ t/hm}^2$ 之间。不同处理地被物的碳储量排序为: $M_{CK}(4.98) > Z_{CK}(3.02) > M(2.63) > D_{CK}(2.60) > Z(1.80) > D(0.84 \text{ t/hm}^2)$, 处理间差异显著($P < 0.05$), 多重比较显示,除 D_{CK} 、M间差异不显著外,其他处理间比较都差异显著。地被物碳储量在不同植物层次的分配量排序因处理不同有异,其中:D、Z、 D_{CK} 处理均是草本层>灌木层>凋落物层; Z_{CK} 为灌木层>草本层>凋落物层;M和 M_{CK} 为灌木层>凋落物层>草本层。不同处理灌木层、草本层的碳储量在地上、地下部分配量都以地上部高于地下部;而灌木层和草本层的碳储量在地上、地下部分配比例处理之间则较接近,灌木层分别为67.19%—69.70%、30.30%—32.81%,极差2.51;草本层分别为68.07%—71.43%、28.57%—31.93%,极差3.36。表明,在石漠化生态系统中,灌木层、草本层的碳储量在地上、地下部的分配比例相对稳定,恢复模式或恢复时间对它们的影响都不明显。

表3还发现,人工林和封育林灌木层、凋落物层的碳储量都随造林或封育时间的增加而提高,人工林以 $M > Z > D$,封育林以 $M_{CK} > Z_{CK} > D_{CK}$ 。而草本层则相反,封育林以 $D_{CK} > Z_{CK} > M_{CK}$,这主要与封育林随年龄的增加植被所处的演替阶段不同所致;而人工林以 $Z > D > M$,这主要因本区域草本植物以喜阳者居多,林分郁闭度是影响草本数量的主要因素。任豆纯林(Z)的叶片细小,枝条稀疏,林龄较小,林分郁闭度最低(0.75);多树种混交林(M)林龄最长,且林分结构为多层次,林冠较浓密,林分郁闭度最高(0.90);吊丝竹纯林(D)叶片较大,但林分结构为单层林,且林龄最小,郁闭度居中(0.80)。故草本碳储量以Z最多,M最少,D居中。

表3 地被物碳储量/(t/hm^2)

Table 3 Carbon storage of ground cover

层次 Layer	组分 Component	D	D_{CK}	Z	Z_{CK}	M	M_{CK}
灌木层 Shrub layer	地上部	0.23(69.70) d	0.64(67.37) c	0.23(67.65) d	0.99(67.35) b	1.06(68.39) b	1.72(67.19) a
	地下部	0.10(30.30) d	0.31(32.63) c	0.11(32.35) d	0.48(32.65) b	0.49(31.61) b	0.84(32.81) a
	小计	0.33(100) d	0.95(100) c	0.34(100) d	1.47(100) b	1.55(100) b	2.56(100) a
草本层 Herb layer	地上部	0.27(69.23) c	0.92(68.15) a	0.89(68.46) a	0.81(68.07) ab	0.15(71.43) c	0.71(68.93) b
	地下部	0.12(30.77) c	0.43(31.85) a	0.41(31.54) ab	0.38(31.93) ab	0.06(28.57) c	0.32(31.07) b
	小计	0.39(100) c	1.35(100) a	1.30(100) a	1.19(100) ab	0.21(100) c	1.03(100) b
凋落物层 Litter layer		0.12d	0.30c	0.16d	0.36c	0.87b	1.39a
合计		0.84e	2.60c	1.80d	3.02b	2.63c	4.98a

同行不同小写字母表示处理间碳储量差异显著($P < 0.05$), 括号前数据为碳储量, 括号内数据为组分碳储量占该层次碳储量的百分数

2.3 土壤碳储量及分配

表 4 显示,土壤碳储量处理间差异显著($P < 0.05$)。其中以 M 最高,达 56.00 t/hm^2 ,其他顺次为 M_{CK} (55.63) $>Z$ (53.44) $>D$ (51.45) $>Z_{CK}$ (49.87) $>D_{CK}$ (47.15 t/hm^2),多重比较表明,除 M、 M_{CK} 间差异不显著外,其他处理间差异均显著。表 4 还表明,无论人工林还是封育林,它们的土壤碳储量都随林龄的增加而提高,但人工林增加的数量大于封育林,其中:D 比 D_{CK} 高 9.10% ,Z 比 Z_{CK} 高 7.16% ,M 比 M_{CK} 高 0.67% 。表明,人工林和封育林的土壤碳储量随着植被恢复时间的增加差距在逐渐缩小,这可能与中度石漠化山地土壤的固碳潜力较低有关。

表 4 还发现,不同土层的土壤碳储量从上往下逐渐降低,同一处理不同土层的土壤碳储量差异显著($P < 0.05$)。不同处理土壤的碳储量在各土壤层次的分配比例各异,0—10 cm 为: $37.91\%—42.34\%$;10—20 cm 为: $30.40\%—33.28\%$;20 cm 以上为: $27.26\%—29.39\%$,亦表现为从上往下碳储量分配比例下降。这与碳的输入以凋落物分解为主有关。

表 4 不同处理的土壤碳储量/ (t/hm^2)

Table 4 Soil carbon storage of different treatments

土层 Soil layer	D	D_{CK}	Z	Z_{CK}	M	M_{CK}
0—10 cm	$20.61 \pm 0.30 \text{ ab B}$	$19.96 \pm 0.19 \text{ a B}$	$20.88 \pm 0.42 \text{ ab B}$	$20.26 \pm 0.54 \text{ ac B}$	$21.51 \pm 0.96 \text{ b B}$	$21.09 \pm 0.48 \text{ bc B}$
10—20 cm	$16.10 \pm 0.66 \text{ b C}$	$14.33 \pm 0.25 \text{ c C}$	$17.78 \pm 0.03 \text{ a C}$	$15.8 \pm 0.42 \text{ b C}$	$18.26 \pm 0.4 \text{ a C}$	$18.2 \pm 0.15 \text{ a C}$
>20 cm	$14.74 \pm 0.92 \text{ b D}$	$12.85 \pm 0.4 \text{ d D}$	$14.77 \pm 0.26 \text{ b D}$	$13.81 \pm 0.16 \text{ c D}$	$16.23 \pm 0.04 \text{ a D}$	$16.35 \pm 0.27 \text{ a D}$
合计 Total	$51.45 \pm 0.29 \text{ c A}$	$47.15 \pm 0.5 \text{ e A}$	$53.44 \pm 0.19 \text{ b A}$	$49.87 \pm 0.74 \text{ d A}$	$56.00 \pm 0.76 \text{ a A}$	$55.63 \pm 0.76 \text{ a A}$

土壤最大厚度为 37 cm。同行不同小写字母表示处理间碳储量差异显著($P < 0.05$),同列不同大写字母表示土层间碳储量差异显著($P < 0.05$)

2.4 生态系统碳储量及分配

从图 1 可见,6 种林分的生态系统碳储量排序为: $M(121.20) > D(67.75) > Z(66.56) > M_{CK}(60.86) > Z_{CK}(52.89) > D_{CK}(49.75 \text{ t/hm}^2)$,处理间差异显著($P < 0.05$)。人工林 D、Z、M 生态系统的碳储量分别是其封育林 D_{CK} 、 Z_{CK} 、 M_{CK} 的 1.36 倍、1.26 倍、1.99 倍,人工林生态系统碳储量显著高于其封育林。表明,人工林因能快速形成乔木林,故比封育林能更有效的提高生态系统碳储量,且造林模式不同,效果有异,以多树种混交林为最优,其次吊丝竹纯林,任豆纯林居后。而封育林生态系统的碳储量则随封育时间的增加而提高,以封育 34a 最高,10a 次之,9a 居末。

生态系统碳储量在乔木层、地被物层、土壤层的分配比例,D、Z、M 人工林分别为 22.82% 、 1.24% 、 75.94% ; 17.01% 、 2.70% 、 80.29% ; 51.63% 、 2.17% 、 46.20% 。其中:乔木层占 $17.01\%—51.63\%$,地被物层占 $1.24\%—2.70\%$,土壤层占 $46.20\%—80.29\%$ 。而 D_{CK} 、 Z_{CK} 、 M_{CK} 封育林则分别为 0.00% 、 5.23% 、 94.77% ; 0.00% 、 5.71% 、 94.29% ; 0.41% 、 8.18% 、 91.41% 。其中:乔木层占 $0.00\%—0.41\%$,地被物层占 $5.23\%—8.18\%$;土壤层占 $91.41\%—94.77\%$ 。生态系统碳储量在不同层次的分配比例排序:M 为乔木层>土壤层>地被物层;D、Z 都为土壤层>乔木层>地被物层;封育林都为土壤层>地被物层>乔木层。

3 讨论

造林和封山育林都是岩溶山地植被恢复最常用的方式。而在石漠化山地,则以封山育林较为常用^[30],但封山育林恢复植被需要经历从裸地→草丛→草灌丛→灌丛→乔灌丛等一系列演替过程才能进入到乔木林演替阶段^[31],要完成这一系列演替过程需要数十年甚至上百年^[32],而人工造林则能快速形成乔木林。本研究中的 3 种造林处理,林龄最短的仅为 9a,但都已形成了乔木林,而 3 种封山育林处理都还没有形成乔木林, M_{CK} 处理虽经封育 34a,但仍仅零星出现最大胸径 5 cm 的乔木,仅处于乔灌丛的初级演替阶段。按本研究区乔木树种从种子萌发到长成胸径 5 cm 幼树约需 6—8 年推算,在中度石漠化山地实施封山育林,乔木出现并定居

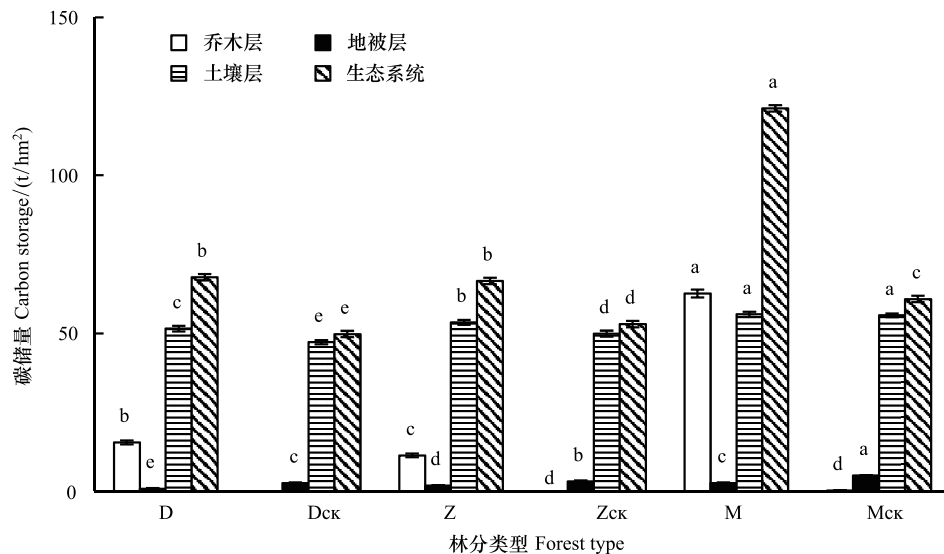


图1 不同处理生态系统碳储量及分配

Fig.1 Carbon storage and allocation of ecosystem in different treatments

D, 吊丝竹纯林, Pure plantations of *Dendrocalamus minor*; D_{CK}, 与吊丝竹纯林同龄的封育对照林, The enclosed forests at the same-age with *Dendrocalamus minor* pure plantations; Z, 任豆纯林, Pure plantations of *Zenia insignis*; Z_{CK}, 与任豆纯林同龄的封育对照林, The enclosed forests at the same-age with *Zenia insignis* pure plantations; M, 任豆×蚬木×顶果木混交林, Mixed plantations of *Zenia insignis*, *Buerretiodendron hsiennmu*, and *Acrocarpus fraxinifolius*; M_{CK}, 与任豆×蚬木×顶果木混交林同龄的封育对照林, The enclosed forests at the same-age with *Zenia insignis*, *Buerretiodendron hsiennmu*, and *Acrocarpus fraxinifolius* mixed plantation. 相同数柱不同小写字母, 表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)

的时间要比直接造林迟 26—28 年, 继续演替至乔木林阶段, 则至少还需要 20 年以上。表明, 在南亚热带中度石漠化山地实施封山育林, 约需 50 年才能形成乔木林, 与温远光等研究结论基本一致^[32]。表明, 人工造林是恢复和重建岩溶山地退化森林植被最快捷、有效的方式。

森林生态系统碳储量受林分起源、树种组成、密度、年龄结构及经营活动等众多因素的影响^[33-34], 它们中任一因素的改变都会导致生态系统碳储量的变化。本研究 6 种处理在林分起源、林种、结构、年龄等都有异, 它们生态系统的碳储量亦各异, 人工林以 M (121.20) > D (67.75) > Z (66.56 t/hm²), 封育林以 M_{CK} (60.86) > Z_{CK} (52.89) > D_{CK} (49.75 t/hm²), 人工林和封育林的生态系统碳储量都随林龄的增加而提高。

植被和土壤碳储量都是评价人工林生态系统吸收和固持 CO₂ 的重要指标^[35], 森林生态系统的植物碳主要固持于乔木层^[36]。本研究表明, D、Z、M 人工林的植物碳储量分别为 16.30、13.12、65.20 t/hm², 其中: 乔木层碳储量分别为 15.46、11.32、62.57 t/hm², 分别占植物碳储量的 94.85%、86.28%、95.97%, 与兰斯安等对杉木, 陈东升等对日本落叶松的研究结果基本一致^[37-38]。而 D_{CK}、Z_{CK}、M_{CK} 封育林因仍没有形成乔木层, 它们的植物碳储量仅分别为 2.60、3.02、5.25 t/hm², 仅分别为其同龄人工林植物碳储量的 15.95%、23.02%、8.39%。表明, 在陆地生态系统中, 乔木层是决定植物碳储量高低的最关键层次, 缺乔木层的植被系统是低碳储量的系统。

造林模式明显影响植物碳储量。D、Z、M3 种造林模式植物的年平均碳储量以多树种混交林最高 (1.92 t/hm²), 吊丝竹纯林次之 (1.81 t/hm²), 任豆纯林居后 (1.31 t/hm²), 处理间差异显著 ($P < 0.05$)。表明, 造林模式不同, 树种和林分结构有异, 导致了植物碳储量的明显差异。另外, M 处理的植物碳储量比中国森林植被的平均碳储量 57.07 t/hm²^[35] 高, 表明中度石漠化岩溶山地并非石头一片, 草木难生的蛮荒之地, 只要树种选择得当, 模式配置科学, 营林技术措施到位, 同样可以培育出较高产量的林分。

土壤碳储量受土壤特性、凋落物输入量以及植物根系周转率等的影响^[39-40]。植被恢复增加了中度石漠化山地的凋落物输入量及细根周转率, 从而提高了石漠化山地土壤的碳储量。本研究结果显示, 无论是人工

林还是封育林,土壤碳储量都随植被恢复时间的增加而提高,与李菲等研究结果一致^[23]。

植被恢复方式对土壤碳储量的影响明显。人工林的土壤碳储量都高于封育林,尤其在植被恢复初期,D、Z 的土壤碳储量与它们同龄的 D_{CK} 、 Z_{CK} 比较都差异显著($P < 0.05$)。这是因为土壤中的碳主要来自于凋落物和植物细根的分解^[41-42],而乔木林的凋落物量、细根生物量及细根碳密度均高于灌、草^[43-45]之故。但经植被恢复 34 年的 M 和 M_{CK} 处理,它们的土壤碳储量已十分接近(分别为 56.00、55.63 t/hm²)。这可能与石漠化山地土壤浅薄、岩石裸露率高,土壤碳固持的潜力较低,当植被恢复到一定阶段(本研究为 34 年),碳的输入与输出趋于平衡,土壤碳趋于稳定有关,这与 Richter 等研究结论相吻合^[46]。

中国森林土壤平均碳储量为 193.55 t/hm²,约为植被碳储量的 3.4 倍^[35]。本研究的土壤碳储量在 47.15—56.00 t/hm² 之间,土壤平均碳储量为 51.58 t/hm²,约为全国土壤碳储量平均水平的 1/4,且多树种混交林的土壤碳储量不仅不比植被碳储量高,反而比植被碳储量低了 16.43%,表明中度石漠化岩溶山地土壤为碳固持能力较低的土壤。

4 结论

造林是恢复中度石漠化山地植被与形成乔木林最快速的方式,而封山育林形成乔木林要比造林迟 50 年以上。植被恢复都能提高中度石漠化生态系统的碳储量,但以人工林提高的速度快于封育林,D、Z、M 人工林生态系统碳储量分别是其同龄封育林 D_{CK} 、 Z_{CK} 、 M_{CK} 的 1.36 倍、1.26 倍、1.99 倍。封育林生态系统的碳储量随封育时间的增加而提高,而人工造林生态系统的碳储量因模式的不同而异,以多树种混交林优于纯林,以吊丝竹纯林优于任豆纯林。

参考文献 (References):

- [1] Pielke R Jr, Wigley T, Green C. Dangerous assumptions. *Nature*, 2008, 452(7187): 531-532.
- [2] Solomon S, Plattner G K, Knutti R, Friedlingstein P. Irreversible climate change due to carbon dioxide emissions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106(6): 1704-1709.
- [3] 周广胜,邢雪荣,王辉民. 植被在全球气候变化中的作用. *植物学通报*, 1995, (5): 190-194.
- [4] 时明芝. 全球气候变化对中国森林影响的研究进展. *中国人口·资源与环境*, 2011, 21(7): 68-72.
- [5] 张志强,曲建升,曾静静. 温室气体排放评价指标及其定量分析. *地理学报*, 2008, 63(7): 693-702.
- [6] Dixon R K, Solomon A M, Brown S, Houghton R A, Trexler M C, Wisniewski J. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science*, 1994, 263(5144): 185-190.
- [7] Woodwell G M, Whittaker R H, Reiners W A, Likens G E, Delwiche C C, Botkin D B. The biota and the world carbon budget. *Science*, 1978, 199(4325): 141-146.
- [8] Post W M, Emanuel W R, Zinke P J, Stangenberger A G. Soil carbon pools and world life zones. *Nature*, 1982, 298(5870): 156-159.
- [9] Kramer P J. Carbon dioxide concentration, photosynthesis, and dry matter production. *BioScience*, 1981, 31(1): 29-33.
- [10] 中国生态学会. 生态学科发展报告(2011-2012). 北京: 中国科学技术出版社, 2012.
- [11] Hoover C M, Leak W B, Keel B G. Benchmark carbon stocks from old-growth forests in northern New England, USA. *Forest Ecology and Management*, 2012, 266: 108-114.
- [12] Pan Y D, Birdsey R A, Fang J Y, Houghton R, Kauppi P E, Kurz W A, Phillips O L, Shvidenko A, Lewis S L, Canadell J G, Ciais P, Jackson R B, Pacala S W, McGuire A D, Piao S L, Rautiainen A, Sitch S, Hayes D. A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*, 2011, 333(6045): 988-993.
- [13] Lun F, Li W H, Liu Y. Complete forest carbon cycle and budget in China, 1999—2008. *Forest Ecology and Management*, 2012, 264: 81-89.
- [14] 张小全,李怒云,武曙红. 中国实施清洁发展机制造林和再造林项目的可行性和潜力. *林业科学*, 2005, 41(5): 139-143.
- [15] Brown D R, Dettmann P, Rinaudo T, Tefera H, Tofu A. Poverty alleviation and environmental restoration using the clean development mechanism: a case study from Humbo, Ethiopia. *Environmental Management*, 2011, 48(2): 322-333.
- [16] Zhang M Y, Zhang C H, Wang K L, Yue Y M, Qi X K, Fan F D. Spatiotemporal variation of karst ecosystem service values and its correlation with environmental factors in northwest Guangxi, China. *Environmental Management*, 2011, 48(5): 933-944.
- [17] Thevs N, Wucherer W, Buras A. Spatial distribution and carbon stock of the Saxaul vegetation of the winter-cold deserts of Middle Asia. *Journal of Arid Environments*, 2013, 90: 29-35.
- [18] Wang S L, Yeager K M, Wan G J, Liu C Q, Wang Y C, Lü Y C. Carbon export and fate in carbonate catchments: A case study in the karst plateau of southwestern China. *Applied Geochemistry*, 2012, 27: 64-72.

- [19] 刘丛强, 蒋颖魁, 陶发祥, 郎赞超, 李思亮. 西南喀斯特流域碳酸盐岩的硫酸侵蚀与碳循环. 地球化学, 2008, 37(4): 404-414.
- [20] 黄宗胜, 符裕红, 喻理飞. 喀斯特森林植被自然恢复过程中土壤有机碳库特征演化. 土壤学报, 2013, 50(2): 306-314.
- [21] 郭红艳, 崔明, 周金星, 但新球, 丁访军, 吕相海. 贵州岩溶峡谷区石漠化对土壤碳库的影响. 林业科学研究, 2014, 27(6): 822-829.
- [22] 杜虎, 宋同清, 曾馥平, 王克林, 彭晚霞, 付威波, 李莎莎. 喀斯特峰丛洼地不同植被类型碳格局变化及影响因子. 生态学报, 2015, 35(14): 4658-4667.
- [23] 李菲, 李娟, 龙健, 廖洪凯, 刘灵飞, 张文娟. 典型喀斯特山区植被类型对土壤有机碳、氮的影响. 生态学杂志, 2015, 34(12): 3374-3381.
- [24] 谢元贵, 廖小锋, 赵晓朋, 刘济明. 喀斯特峰丛洼地不同适生植物配置模式固碳能力及效益评价. 广东农业科学, 2015, 42(20): 134-139.
- [25] 董波, 万福绪, 严妍, 蒋丹丹, 刘建中, 刘天池. 徐州市石灰岩山地不同植被恢复模式的碳储量. 水土保持通报, 2015, 35(3): 288-292.
- [26] 胡芳, 杜虎, 曾馥平, 宋同清, 彭晚霞, 兰斯安, 张芳. 广西不同林龄喀斯特森林生态系统碳储量及其分配格局. 应用生态学报, 2017, 28(3): 721-729.
- [27] 朱宏光, 蓝嘉川, 刘虹, 温远光, 王克林, 马祖陆, 陆晓明, 雷丽群, 覃林, 庄嘉, 邓艳, 李婉舒, 左花, 熊江波. 广西马山岩溶次生林群落生物量和碳储量. 生态学报, 2015, 35(8): 2616-2621.
- [28] 温远光, 张健, 严理, 朱宏光, 周晓果, 尤业明, 陆志成. 豆科植物对石漠化土地生物碳固持能力的影响. 广西科学, 2015, 22(6): 573-577.
- [29] 汪珍川, 杜虎, 宋同清, 彭晚霞, 曾馥平, 曾昭霞, 张浩. 广西主要树种(组)异速生长模型及森林生物量特征. 生态学报, 2015, 35(13): 4462-4472.
- [30] Jiang Z C, Lian Y Q, Qin X Q. Rocky desertification in southwest china: impacts, causes, and restoration. Earth-Science Reviews, 2014, 132: 1-12.
- [31] 王荣, 蔡运龙. 西南喀斯特地区退化生态系统整治模式. 应用生态学报, 2010, 21(4): 1070-1080.
- [32] Wen Y G, Sun D J, Zhu H G, Liu J T. Changes in aboveground biomass and diversity between different stages of secondary succession of a karst vegetation in Guangxi, china [C]//Advances in Biomedical Engineering. Newark, NJ: Information Engineering Research Institute, 2011: 420-423.
- [33] Levine J S, Cofer III W R, Cahoon D R Jr, Winstead E L. Biomass burning: a driver for global change. Environmental Science & Technology, 1995, 29(3): 120A-125A.
- [34] Schulp C J E, Nabuurs G J, Verburg P H, de Waal R W. Effect of tree species on carbon stocks in forest floor and mineral soil and implications for soil carbon inventories. Forest Ecology and Management, 2008, 256(3): 482-490.
- [35] 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. 植物生态学报, 2000, 24(5): 518-522.
- [36] 明安刚, 刘世荣, 莫慧华, 蔡道雄, 农友, 曾冀, 李华, 陶怡. 南亚热带红锥、杉木纯林与混交林碳贮量比较. 生态学报, 2016, 36(1): 244-251.
- [37] 兰斯安, 杜虎, 曾馥平, 宋同清, 彭晚霞, 韩畅, 陈莉, 苏樑. 不同林龄杉木人工林碳储量及其分配格局. 应用生态学报, 2016, 27(4): 1125-1134.
- [38] 陈东升, 孙晓梅, 张守攻. 不同年龄日本落叶松人工林生物量、碳储量及养分特征. 应用生态学报, 2016, 27(12): 3759-3768.
- [39] Jandl R, Lindner M, Vesterdal L, Bauwens B, Baritz R, Hagedorn F, Johnson D W, Minkinen K, Byrne K A. How strongly can forest management influence soil carbon sequestration? Geoderma, 2007, 137(3/4): 253-268.
- [40] Zeng Z Q, Wang S L, Zhang C M, Gong C, Hu Q. Carbon storage in evergreen broad-leaf forests in mid-subtropical region of China at four succession stages. Journal of Forestry Research, 2013, 24(4): 677-682.
- [41] 李鑫, 陈先刚, 白明锐, 李风格. 宣威市退耕还林柳杉林地土壤有机碳含量及活性组分的林龄变化. 林业科学, 2017, 53(1): 11-19.
- [42] 范少辉, 肖复明, 汪思龙, 苏文会, 于小军, 申其正. 毛竹林细根生物量及其周转. 林业科学, 2009, 45(7): 1-6.
- [43] 余鑫, 许崇华, 朱永一, 徐小牛. 北亚热带常绿阔叶林凋落物生产量及其与林分因子的关系. 浙江农林大学学报, 2016, 33(6): 991-999.
- [44] 杜有新, 潘根兴, 李恋卿, 胡忠良, 王新洲. 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. 生态学报, 2010, 30(23): 6338-6347.
- [45] 韩畅, 宋敏, 杜虎, 曾馥平, 彭晚霞, 王华, 陈莉, 苏樑. 广西不同林龄杉木、马尾松人工林根系生物量及碳储量特征. 生态学报, 2017, 37(7): 2282-2289.
- [46] Richter D D, Markewitz D, Trumbore S E, Wells C G. Rapid accumulation and turnover of soil carbon in a re-establishing forest. Nature, 1999, 400(6739): 56-58.