

等高反坡阶对滇中云南松林乔木层碳储量及 碳增量分配格局的影响

李学峰, 王克勤, 宋娅丽, 王震, 张伯浩

(西南林业大学生态与水土保持学院, 昆明 650224)

摘要: 通过标准地调查和生物量实测相结合的方法, 对布设等高反坡阶后滇中云南松林乔木层碳含量、生物量、碳储量及分配特征进行了估算, 并分析了8年后各器官碳增量及分配格局特征。结果表明: 布设等高反坡阶后云南松各器官碳含量变幅为41.01%~47.35%, 平均碳含量高低排列依次为干>叶>枝>皮>粗根>中根>细根。10~15龄的云南松林在布设等高反坡阶后地上部分总生物量比对照高32.75%, 等高反坡阶显著提高了10~15龄和15~30龄地下部分生物量(30.73%和35.71%), 总生物量随着龄组的增加而显著增加。等高反坡阶显著提高了10~15龄云南松林地上部分碳储量(32.79%)和15~30龄地下部分碳储量(35.60%); 布设等高反坡阶8年后显著增加了10~15龄、15~30龄地上部分碳增量(53.33%和20.45%)和地下部分碳增量(53.70%和73.43%)。综上, 人工造林时应应对等高反坡阶予以高度关注, 适度发展等高反坡阶措施, 在等高反坡阶基础上因地制宜地进行人工造林, 增加山地造林面积和植被碳储量, 从而保护当地生态环境。

关键词: 等高反坡阶; 生物量; 碳储量; 碳增量; 分配

中图分类号: S718.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2019)01-0145-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.01.024

Effects of Contour Reverse-slope Terrace on Distribution of Carbon Storage and Carbon Increment in the Tree Layer of *Pinus yunnanensis* Forest in Central Yunnan

LI Xuefeng, WANG Keqin, SONG Yali, WANG Zhen, ZHANG Bohao

(College of Ecology and Soil and Water Conservation, Southwest Forestry University, Kunming 650224)

Abstract: Carbon content, biomass, carbon storage and distribution pattern in tree layer of *Pinus yunnanensis* forest with contour reverse-slope terrace arrangement were estimated in central Yunnan through standard plot survey and biomass measurement, and characteristics of carbon increment and distribution in each organ were analyzed in 8 years. The results showed that the variation of carbon content in different organs was 41.01% ~ 47.35% under the treatment of contour reverse-slope terrace, the average carbon content was ranked as stem > leaf > branch > bark > thick root > median root > fine root. Aboveground biomass of the 10 ~ 15-year-old plantation was 32.75% higher under the treatment of contour reverse-slope terrace than that of control. Belowground biomass of the 10 ~ 15-year-old and 15 ~ 30-year-old plantation (30.73% and 35.71%) were increased significantly under contour reverse-slope terrace, and the total biomass raised significantly with the increasing of age group. Carbon storage of aboveground in 10 ~ 15-year-old (32.79%) and carbon storage of belowground in the 15 ~ 30-year-old (35.60%) were significantly increased under contour reverse-slope terrace. After 8 years of arranging contour reverse-slope terrace, carbon increment of aboveground (53.33% and 20.45%) and carbon increment of belowground (53.70% and 73.43%) increased significantly in 10 ~ 15-year-old and 15 ~ 30-year-old plantation. In conclusion, contour reverse-slope terrace should be pay close attention in the process of afforestation. Artificial afforestation should be carried out in accordance with local conditions on the basis of contour reverse-slope terrace to increase the afforestation area and vegetation carbon storage in slope areas so as to protect the local ecological environment.

收稿日期: 2018-07-01

资助项目: 国家自然科学基金项目(30660037); 云南省应用基础研究青年项目(2016FD044); 西南林业大学科研启动基金项目(111443); 云南省高校优势特色重点学科(生态学)建设项目(050005113111)

第一作者: 李学峰(1993—), 男, 山东潍坊人, 硕士研究生, 主要从事森林生态系统碳储量研究。E-mail: 15587129335@163.com

通信作者: 宋娅丽(1985—), 女, 山西长治人, 博士研究生, 主要从事生态系统功能研究。E-mail: songyali19851205@sina.com

Keywords: contour reverse-slope terrace; biomass; carbon storage; carbon increment; distribution

森林是陆地生态系统的主体,其储存有机碳的量约占陆地生态系统的 2/3,在改善生态环境和减缓全球气候变化等方面发挥着不可替代的作用,也是陆地生态系统中结构最为复杂、占地面积最大、分布最广的生态系统^[1]。过去 10 年,国内外对森林生态系统中植被碳储量的研究集中于不同尺度,包括全球、国家的大尺度以及区域小尺度,主要内容为海拔、森林年龄结构、林分类型、气候等自然条件和人类经营活动等因素对植被碳储量的影响^[2]。植被碳储量也是评价森林生态系统可持续发展的重要指标,其中乔木层碳储量占到森林生态系统碳储量的 13.57%~56.65%,占到植被碳储量的 79.08%~97.25%^[3-4]。但各区域不同植被乔木层碳储量结果差异较大,因此开展区域尺度森林生态系统乔木层碳储量对丰富世界森林生态系统案例研究具有重要意义。

人为经营措施中等高反坡阶,常作为坡耕地水土保持控制措施之一,可有效增加有机碳、氮、磷、钾等营养物质的固定,减少水土流失,增加入渗^[5-6],营养物质增加后则会加快林木生长速率以及增加生物量,进而增加森林碳库的固定效率。该措施极其适用于降雨季节分配严重不均的地区,尤其是在云南山区^[7-8]。目前对等高反坡阶的研究^[5,8-9]集中于坡耕地氮磷流失特征、产流产沙特征等方面。但探讨布设等高反坡阶对森林生态系统乔木层碳储量及碳增量分配格局的影响研究仍鲜见报道。因此,本文以滇中云南松(*Pinus yunnanensis*)次生林生态系统为研究对象,应用野外样地调查方法,根据滇中云南松乔木层各器官碳含量的实测数据和直接收获法,估算布设等高反坡阶对乔木层各器官碳含量、生物量、碳储量及分配特征的影响,并分析了 8 年后各器官碳增量及分配格局特征,对大尺度区域碳储量估算以及提高森林碳汇功能和我国南方侵蚀退化区生产营林和植被重建具有重要的科学意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于昆明市嵩明县滇源镇,属昆明市松华坝水库水源区,地处北纬 24°14'—25°12',东经 102°44'—102°48',地形以高原低山为主,典型低纬度高原山地季风气候,年均气温 14.2℃,干湿季分明,多年平均降水量 785.1 mm,雨季(5—10 月)降水量占全年降水量的 87.5%。入库河流有牧羊河、冷水河,多年平均径流量 2.1×10⁸ m³。区域内地势总体西北高东南低,最高海拔 2 589.5 m,位于西南部野猫山,最低海拔 2 010 m,相对高差 479.5 m,平均海拔 2 220 m。

区域内原坡地森林植被云南松林因过度采薪、放牧等人为因素使其被毁严重,次生疏幼林面积大,该区地带性植被是以云南松为优势种的暖温性叶叶林。试验地土壤以第三纪古红土发育的赤红壤为主,零星地区有黄棕壤分布,土层厚度 1 m 左右。灌木有杜鹃(*Rhododendron simsii*)、火棘(*Pyracantha fortuneana*)、金丝梅(*Hypericum patulum*)、碎米花(*R. spiciferum*)、云南杨梅(*Myrica nana*)等。草本有车前(*Plantago asiatica*)、白草(*Pennisetum centrasiaticum*)、耳草(*Hedyotis auricularia*)、火绒草(*Leontopodium leontopodioides*)、旱茅(*Eremopogon delavayi*)等。凋落物积累量较多,平均厚度 8~20 cm。

1.2 研究方法

1.2.1 样地布设 试验综合考虑地域分布、立地条件、龄组、密度等因素,于 2009 年 7 月在云南松次生林的典型区域中设置 6 个 20 m×20 m 的标准样地(表 1),以确保样地之间有相近的气候、土壤等环境条件,并作处理为:1,2,3 样地为对照组,无人管理措施;4,5,6 样地于 2009 年 11 月布设等高反坡阶,等高反坡阶设置为沿相同高度从上向下里切外垫,修成一台面,台面外高内低,宽 1.2 m,反坡 5°,以蓄水和减少水土流失为目的,每 2 个等高反坡阶之间的垂直距离为 4 m,每个样地等高反坡阶约占样地面积的 18%。各样地林分密度为 3 575~4 175 株/hm²,最初布设等高反坡阶措施时,林分的初始特征一致;处理 8 年后林分生物量相应增加,但当地农民由于生活需要不断进行砍伐,并有幼苗不断生长。等高反坡阶剖面示意图 1,样地基本情况见表 1。

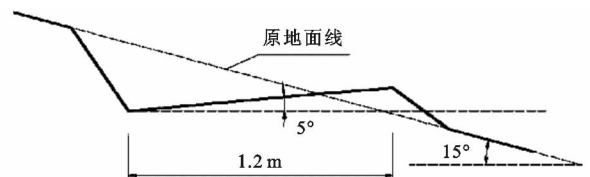


图 1 等高反坡阶剖面示意

表 1 云南松林样地基本特征

编号	样地设置	坡位	坡度/(°)	坡向	土壤类型	郁闭度/%
1	对照	中部	15	北偏东 13°	红壤	89
2	对照	中部	15	北偏东 13°	红壤	88
3	对照	中部	15	北偏东 13°	红壤	90
4	等高反坡阶	中部	15	北偏东 13°	红壤	86
5	等高反坡阶	中部	15	北偏东 12°	红壤	89
6	等高反坡阶	中部	15	北偏东 14°	红壤	88

1.2.2 测定方法 分别于 2009 年 11 月和 2017 年 11 月生长季结束后,在各样地中对云南松进行每木检尺。因云南松次生林中存在大量新生幼龄云南松,

占总量的 25.05%~38.95%。若忽略不计会造成较大误差,因此将胸径 5 cm 作为每木检尺起测直径。在样地内按 4 个树龄 0~5,5~10,10~15,15~30 龄分别进行调查。

记录样地中云南松的胸径(DBH,树高 1.3 m 处的直径)、树高、地理坐标、冠幅和枝下高。由于当地用材需要,农民于 2017 年 10 月将部分云南松伐倒,在农民移走之前,记录冠层长、宽,并剥下叶子、枝,记录各部分鲜重。样木的所有枝叶剥去后,将树干分为 10 个高度相似的部分,记录鲜重。从树干上移走树皮来测定树皮鲜重。同时,小心仔细挖掘整个地下部分根系,分为粗根(直径>2 cm)、中根(直径 0.5~2 cm)和细根(直径<0.5 cm),分别称鲜重。各部分分别取样品带回实验室,放入 65 ℃烘箱烘至恒重,测定样品干重,计算鲜重/干重,推算各部分干重生物量。烘干后的样品粉碎后过 100 目筛,用 TOC 分析仪法(TOC-L-CPH-SSM5000A 型)测定样品中的全碳含量(TC)^[10]。

1.2.3 样地乔木层碳储量和碳增量计量 本研究中云南松林乔木层碳储量为 2017 年测定生态系统中乔木层的活生物量,未包括枯立木、林下植被层碳储量。云南松乔木层各部位的碳储量(t/hm^2)计算公式为:

$$D_c = B \times R_c$$

表 2 等高反坡阶下云南松乔木层地上部分碳含量特征

单位:%

管理措施	测定部位	0~5 龄	5~10 龄	10~15 龄	15~30 龄
对照	干	49.05±0.17aA ^A	48.85±0.16aA ^A	46.95±1.02bA ^A	46.57±0.13bA ^A
	皮	47.25±0.18aB ^A	46.91±0.49aB ^A	47.05±0.36aA ^A	46.93±0.48aA ^A
	枝	47.75±0.17aB ^A	48.76±0.16aA ^A	46.56±0.21bA ^A	46.95±0.11bA ^A
	叶	47.35±0.30aB ^A	47.95±0.47aA ^A	47.74±0.28aA ^A	47.13±0.20aA ^A
等高反坡阶	干	49.27±0.19aA ^A	48.35±0.17aA ^A	47.42±0.87bA ^A	46.19±0.10cA ^A
	皮	47.68±0.17aB ^A	47.23±1.07aB ^A	46.18±0.09bA ^A	47.37±0.28aB ^A
	枝	47.85±0.16aB ^A	49.27±0.17bA ^A	46.71±0.08cA ^A	46.55±0.14cA ^A
	叶	46.96±0.10aB ^A	48.71±0.11bA ^A	47.36±0.18aA ^A	47.93±0.10aB ^A

注:同行不同小写字母表示不同龄组同一部位碳含量差异显著($p<0.05$);同列不同大写字母表示同一处理下相同龄组不同部位间碳含量差异显著($p<0.05$);同列不同上标大写字母表示不同处理下相同龄组相同部位间碳含量差异显著($p<0.05$)。下同。

表 3 等高反坡阶下云南松乔木层地下部分碳含量特征

单位:%

管理措施	测定部位	0~5 龄	5~10 龄	10~15 龄	15~30 龄
对照	>5 cm 根	47.43±0.12aA ^A	47.12±0.17aA ^A	45.05±0.20aA ^A	43.14±0.18aA ^A
	2~5 cm 根	46.26±0.11aA ^A	47.35±0.12aA ^A	43.17±0.10bB ^A	42.01±0.17abAB ^A
	0.5~2 cm 根	43.18±0.17bB ^A	44.43±0.06bB ^A	42.58±0.14cBC ^A	41.67±0.13abB ^A
	0.2~0.5 cm 根	41.45±0.12cB ^A	44.06±0.08bB ^A	41.16±0.11dC ^A	41.01±0.16bB ^A
	<0.2 cm 根	41.09±0.17cB ^A	41.75±0.45cC ^A	41.27±0.17dC ^A	41.04±0.16bB ^A
等高反坡阶	>5 cm 根	47.34±0.09aA ^A	46.97±0.10aA ^A	44.96±0.13bA ^A	43.92±0.11bA ^A
	2~5 cm 根	46.02±0.17aA ^A	47.07±0.21aA ^A	42.99±0.14bB ^A	42.15±0.11bAB ^A
	0.5~2 cm 根	43.50±0.16bB ^A	44.12±0.08bB ^A	42.13±0.16bB ^A	41.88±0.18bB ^A
	0.2~0.5 cm 根	41.69±0.15cB ^A	44.98±0.21bB ^A	41.83±0.17cB ^A	41.29±0.19bB ^A
	<0.2 cm 根	41.88±0.09cB ^A	41.12±0.16cC ^A	41.32±0.16cB ^A	41.40±0.07bB ^A

2.2 等高反坡阶对云南松乔木层生物量的影响

由图 2 可知,对照和等高反坡阶下地上部分总生物量随着龄组的增加逐渐显著增加,布设等高反坡阶的 0~5,5~10,10~15,15~30 龄云南松林地上部分总生物量分别为 0.14,3.09,13.62,33.68 t/hm^2 ,

式中: B 为云南松乔木层各部位生物量(t/hm^2); R_c 为云南松乔木层各部位含碳量(%).

云南松乔木层各部位碳增量由 2017 年的碳储量与 2009 年的碳储量差值获得。

1.3 数据分析

使用 Excel 2010 和 SPSS 22.0 软件进行数据处理和图表分析,方差分析采用 LSD 和 T 检验法检验不同人为管理措施下云南松乔木层各部位碳含量、生物量、碳储量和碳增量的差异性,采用 Pearson 相关系数评价碳含量、生物量、碳储量和碳增量的相关关系,显著性水平设为 $\alpha=0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 等高反坡阶对云南松乔木层碳含量的影响

由表 2 和表 3 可知,不同龄组云南松地上部分和地下部分各器官碳含量在布设等高反坡阶后与对照无显著性差异($p>0.05$)。对照和布设等高反坡阶处理下云南松地上部分和地下部分各器官碳含量变幅分别为 46.46%~49.27%和 41.01%~47.35%。总体来看,云南松地下部分平均碳含量低于地上部分(低 9.27%),地下部分各器官中<0.2 cm 的根显著低于其他各部位根系($p<0.05$),比>5,2~5,0.5~2,2~0.5 cm 根分别低 11.33%,10.19%,5.46%,3.19%。

说明树龄为 30 年内的云南松林地上部分总生物量随着树龄的增加逐渐增加。布设等高反坡阶后,树龄为 15 年内的云南松林地上部分总生物量与对照相比差异性显著($p<0.05$),在 10~15 龄高出对照 32.75%。不同龄组云南松树干生物量为 0.04~23.67 t/hm^2 ,对

照和等高反坡阶下占地上部分总生物量的比例随着树龄的增加而增加,分别为 22.58%~66.51%和

23.52%~68.59%,说明等高反坡阶提高了树干占地上部分生物量的比例。

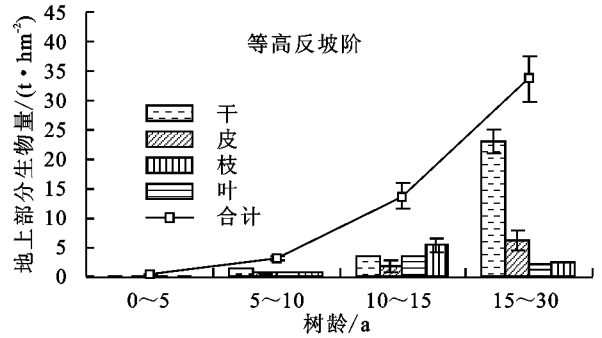
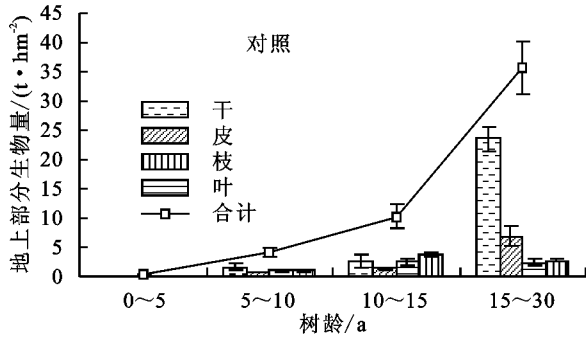


图 2 等高反坡阶下云南松乔木层地上部分生物量特征

由图 3 可知,布设等高反坡阶后云南松地下部分根系总生物量在 0~5 龄和 5~10 龄与对照相比差异性不显著,但 10~15 龄和 15~30 龄则显著增加($p < 0.05$),分别比对照高出 30.73%和 35.72%,说明布设等高反坡阶可显著提高树龄高于 10 年生的云南松地下部分生物量。随着树龄的增加地下各器官生物量显著增加($p < 0.05$),15~30 龄云南松地下各器

官平均值分别为 0~5,5~10,10~15 龄的 438.90,34.22,9.33 倍。云南松地下部分不同径级根系中, >5 cm 根生物量最高,其次为 2~5,0.5~2,0.2~0.5, <0.2 cm 根。不同处理下各龄组云南松 >5 cm 根占地下部分生物量的比例随着树龄的增加而增加,但 2~5,0.5~2,0.2~0.5, <0.2 cm 根却相反,随着树龄的增加而减小。

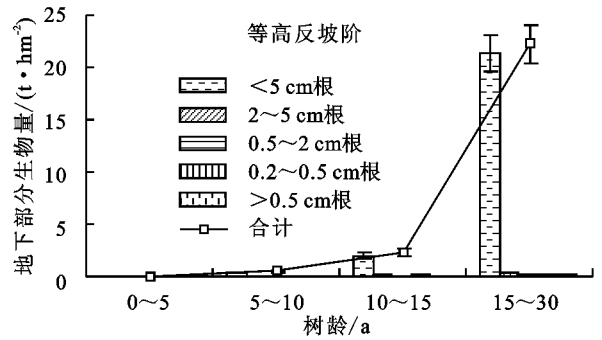
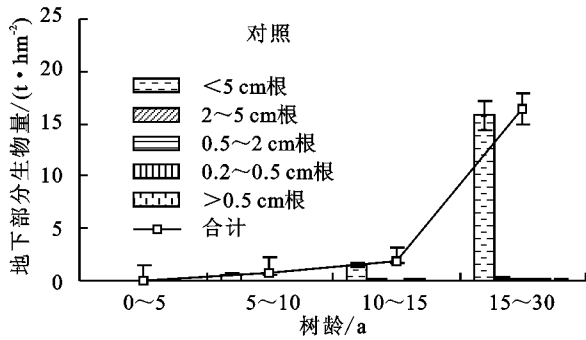


图 3 等高反坡阶下云南松乔木层地下部分生物量特征

2.3 等高反坡阶对云南松乔木层碳储量的影响

由表 4 可知,不同处理下不同龄组云南松地上部分总碳储量为 0.08~16.95 t/hm²,与生物量呈正比例关系。各器官生物量大小与生物量趋势相同,均表现为干>皮>叶>枝,说明树干为重要的碳库,

占地上部分总碳储量的比例随着树龄增加而增加,分别占到 25.00%,39.82%,25.20%,67.80%。等高反坡阶显著提高了 10~15 龄云南松地上部分总碳储量,同一部位的碳储量随着林龄树龄的增加而显著增加($p < 0.05$)。

表 4 等高反坡阶下云南松乔木层地上部分碳储量特征

单位:t/hm²

管理措施	测定部位	0~5 龄	5~10 龄	10~15 龄	15~30 龄	总碳储量
对照	干	0.04±0.01aA ^A	0.78±0.07bA ^A	1.27±0.14cA ^A	11.32±1.00dA ^A	13.39±1.71eA ^A
	皮	0.03±0.01aA ^A	0.35±0.03bB ^A	0.66±0.02bB ^A	3.21±0.14cB ^A	4.24±0.32cB ^A
	枝	0.03±0.004aA ^A	0.45±0.05bB ^A	1.19±0.21cA ^A	1.13±0.11cC ^A	2.79±1.01dC ^A
	叶	0.06±0.01aA ^A	0.45±0.03bB ^A	1.76±0.30cC ^A	1.29±0.07cC ^A	3.56±0.47dD ^A
	合计	0.16±0.03aA ^A	2.03±0.18bC ^A	4.88±0.67cC ^A	16.95±1.32dD ^A	23.98±3.51eD ^A
等高反坡阶	干	0.02±0.002aA ^A	0.61±0.02bA ^B	1.58±0.06cA ^A	11.03±0.16dA ^A	13.24±0.97eA ^A
	皮	0.02±0.001aA ^A	0.26±0.01bB ^B	0.84±0.09cB ^A	2.90±0.17dB ^A	4.01±0.31eB ^A
	枝	0.01±0.0004aA ^A	0.31±0.02bB ^B	1.56±0.06cA ^B	0.96±0.04dC ^A	2.84±0.10cC ^A
	叶	0.03±0.002aA ^A	0.30±0.04aB ^B	2.50±0.11cC ^B	1.14±0.05dC ^A	3.97±0.20eB ^A
	合计	0.08±0.005aA ^A	1.48±0.09bC ^B	6.48±0.32cD ^B	16.03±0.42dD ^A	24.06±1.58eD ^A

由表 5 可知,等高反坡阶处理下,云南松地下部分总碳储量在 0~5,5~10,10~15 龄下与对照相比差异性不显著,但在 15~30 龄下显著增加了 35.60% ($p < 0.05$)。地下部分碳储量随着树龄的增加而逐渐增加,趋势与生物量相同。地

下部分中 >5 cm 根占地下部分比例逐渐增加(81.25%到 96.33%),而 2~5,0.5~2,0.2~0.5, <0.2 cm 逐渐降低,分别占到地下部分碳储量的 83.33%到 0.01%,0.15%到 0.01%,0.08%到 0.006%,以及 0.08%到 0.005%。

表 5 等高反坡阶下云南松乔木层地下部分碳储量特征

单位: t/hm²

管理措施	测定部位	0~5 龄	5~10 龄	10~15 龄	15~30 龄	总碳储量
对照	>5 cm 根	0.0001±0.0000aA ^A	0.26±0.01aA ^A	0.68±0.10bA ^A	7.09±0.64cA ^A	8.03±1.06dA ^A
	2~5 cm 根	0.020±0.0001aA ^A	0.03±0.001aB ^A	0.05±0.01aB ^A	0.11±0.03bB ^A	0.20±0.04bB ^A
	0.5~2 cm 根	0.003±0.0001aA ^A	0.01±0.0003aB ^A	0.02±0.0004aB ^A	0.07±0.01bB ^A	0.11±0.01bB ^A
	0.2~0.5 cm 根	0.002±0.0001aA ^A	0.01±0.0002aB ^A	0.04±0.0002aB ^A	0.05±0.0004aB ^A	0.10±0.01bB ^A
	<0.2 cm 根	0.002±0.0001aA ^A	0.01±0.0003aB ^A	0.01±0.0004aB ^A	0.04±0.001aB ^A	0.06±0.01aB ^A
	合计	0.030±0.0004aA ^A	0.32±0.01bA ^A	0.80±0.01cA ^A	7.36±0.68dA ^A	8.50±1.13eA ^A
等高反坡阶	>5 cm 根	0.0001±0.00001aA ^A	0.18±0.01aA ^A	0.89±0.08bA ^B	9.63±0.29cA ^B	10.70±0.47cA ^B
	2~5 cm 根	0.010±0.0001aA ^A	0.02±0.0001aB ^A	0.06±0.01aB ^A	0.15±0.02bB ^A	0.23±0.03bB ^A
	0.5~2 cm 根	0.002±0.0001aA ^A	0.009±0.001aB ^A	0.03±0.004aB ^A	0.09±0.02aB ^A	0.13±0.02aB ^A
	0.2~0.5 cm 根	0.001±0.0002aA ^A	0.01±0.002aB ^A	0.06±0.003aB ^A	0.06±0.002aB ^A	0.13±0.02aB ^A
	<0.2 cm 根	0.001±0.001aA ^A	0.01±0.001aB ^A	0.01±0.001aB ^A	0.05±0.001aB ^A	0.07±0.01aB ^A
	合计	0.010±0.001aA ^A	0.23±0.02bA ^A	1.05±0.02cA ^A	9.98±0.33dA ^B	11.26±0.55eA ^B

2.4 等高反坡阶对云南松乔木层碳增量的影响

由表 6 和表 7 可知,布设等高反坡阶 8 年后 0~5, 5~10 龄云南松地上部分和地下部分碳增量不显著,但显著增加了 10~15, 15~30 龄地上部分的碳增量(53.33%和 20.45%)和地下部分的碳增量(53.70%和 73.43%)($p<0.05$)。云南松碳增量随着树龄的增加而显著增加,15~30 龄的碳增量显著高于 0~5, 5~10, 10~15 龄,分别为 0~5, 5~10, 10~15 龄地

上部分的 70.31, 5.05, 1.79 倍,地下部分的 159.75, 13.47, 5.63 倍。不同处理云南松地上部分碳增量总体上表现为干>叶>皮>枝,树干碳增量分别为叶、皮的 2.69, 3.02, 3.64 倍;地下部分碳增量则表现为(>5 cm 根)>(2~5 cm 根)>(0.5~2 cm 根)>(0.2~0.5 cm 根)>(<0.2 cm 根), >5 cm 根分别为 2~5 cm 根、0.5~2 cm 根、0.5~2 cm 根和 <0.2 cm 根的 43.85, 75.77, 84.57, 159.01 倍。

表 6 等高反坡阶下云南松乔木层地上部分碳增量特征

单位: t/hm²

管理措施	测定部位	0~5 龄	5~10 龄	10~15 龄	15~30 龄	总碳增量
对照	干	0.04±0.01aA ^A	0.65±0.08bA ^A	0.86±0.13cA ^A	4.41±0.83dA ^A	5.96±0.95eA ^A
	皮	0.03±0.01aA ^A	0.29±0.02bB ^A	0.45±0.07cB ^A	1.25±0.47dB ^A	2.02±0.31eB ^A
	枝	0.03±0.001aA ^A	0.37±0.06bB ^A	0.80±0.09cA ^A	0.44±0.01bC ^A	1.65±0.13dC ^A
	叶	0.06±0.01aA ^A	0.37±0.02bB ^A	1.19±0.16cC ^A	0.50±0.03bC ^A	2.12±0.11dB ^A
	合计	0.16±0.03aA ^A	1.68±0.18bC ^A	3.30±0.45cC ^A	6.60±1.34dD ^A	11.75±1.50eD ^A
等高反坡阶	干	0.02±0.001aA ^A	0.53±0.10bA ^A	1.23±0.03cA ^B	5.46±0.96dA ^B	7.25±0.73eA ^B
	皮	0.02±0.001aA ^A	0.23±0.004bB ^A	0.66±0.11cB ^B	1.44±0.03dB ^A	2.34±0.11eB ^A
	枝	0.01±0.0003aA ^A	0.27±0.01bB ^B	1.22±0.10cA ^B	0.48±0.01bC ^A	1.98±0.10dC ^A
	叶	0.03±0.002aA ^A	0.26±0.07bB ^B	1.95±0.05cA ^B	0.57±0.02bC ^A	2.81±0.19dB ^B
	合计	0.08±0.004aA ^A	1.29±0.18bC ^A	5.06±0.29cC ^B	7.95±1.02dD ^B	14.38±1.13eD ^B

表 7 等高反坡阶下云南松乔木层地下部分碳增量特征

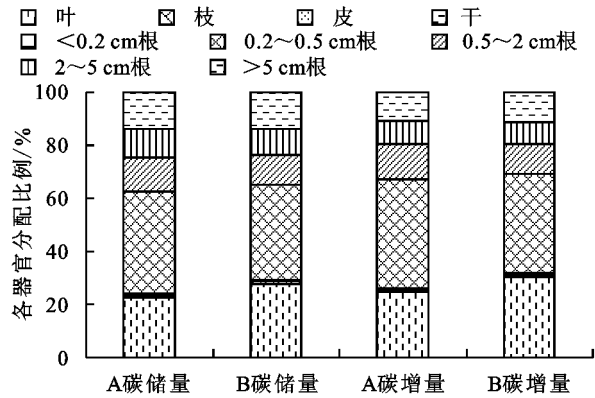
单位: t/hm²

管理措施	测定部位	0~5 龄	5~10 龄	10~15 龄	15~30 龄	总碳增量
对照	>5 cm 根	0.03±0.007aA ^A	0.26±0.02bA ^A	0.51±0.05cA ^A	2.72±0.21dA ^A	3.52±0.47eA ^A
	2~5 cm 根	0.0007±0.0001aA ^A	0.01±0.002aB ^A	0.01±0.001aB ^A	0.06±0.022aB ^A	0.08±0.002aB ^A
	0.5~2 cm 根	0.0004±0.00003aA ^A	0.003±0.001aB ^A	0.01±0.001aB ^A	0.03±0.01aB ^A	0.05±0.01aB ^A
	0.2~0.5 cm 根	0.0003±0.0001aA ^A	0.003±0.0004aB ^A	0.01±0.001aB ^A	0.03±0.004aB ^A	0.04±0.01aB ^A
	<0.2 cm 根	0.0002±0.00001aA ^A	0.002±0.001aB ^A	0.003±0.0002aB ^A	0.02±0.003aB ^A	0.02±0.001aB ^A
	合计	0.04±0.007aA ^A	0.31±0.02bA ^A	0.54±0.05bA ^A	2.86±0.25cA ^A	3.71±0.49dA ^A
等高反坡阶	>5 cm 根	0.01±0.003aA ^A	0.19±0.03bA ^A	0.78±0.07cA ^A	4.70±0.32dA ^B	5.68±1.06dA ^B
	2~5 cm 根	0.0002±0.00004aA ^A	0.004±0.001aB ^A	0.02±0.02aB ^A	0.11±0.02bB ^A	0.13±0.02bB ^A
	0.5~2 cm 根	0.0001±0.00001aA ^A	0.002±0.0001aB ^A	0.01±0.001aB ^A	0.06±0.001aB ^A	0.07±0.01aB ^A
	0.2~0.5 cm 根	0.0001±0.00002aA ^A	0.002±0.0001aB ^A	0.01±0.001aB ^A	0.06±0.004aB ^A	0.07±0.01aB ^A
	<0.2 cm 根	0.0001±0.00001aA ^A	0.001±0.0001aB ^A	0.01±0.002aB ^A	0.03±0.001aB ^A	0.04±0.004aB ^A
	合计	0.02±0.003aA ^A	0.28±0.03aA ^A	0.83±0.09bA ^B	4.96±0.35cA ^B	5.99±1.10dA ^B

2.5 等高反坡阶对云南松乔木层碳储量及碳增量分配特征的影响

由图 4 可知,等高反坡阶显著增加了云南松地下部分各器官碳增量和碳储量的分配比例,但显著降低了地上部分各器官的分配比例($p<0.05$)。不同处理中,云南松各器官碳储量和碳增量分配比例中均为树干最高,其次是 >5 cm 根、皮、枝、叶,最小的是中根和细根。树干在不同

处理的云南松碳储量和碳增量中均占支配地位,碳储量和碳增量在对照中分别占 38.55%和 41.24%,在等高反坡阶中分别占 35.59%和 37.49%,均高于 35%。>5 cm 根在对照和等高反坡阶中分别占总碳储量的 22.76%和 27.89%,占总碳增量的 24.74%和 30.29%;但 <0.2 cm 根在对照和等高反坡阶中仅分别占总碳储量的 0.15%和 0.18%,占总碳增量的 0.17%和 0.19%。



注:图中 A、B 分别代表对照和布设等高反坡阶处理。

图 4 等高反坡阶下云南松乔木层各部位碳储量和碳增量分配特征

3 讨论

植被的碳含量作为估算森林碳储量的基本参数,国内外学者开展了大量研究,主要集中于实测植被典型器官的碳含量以及采用转换系数(0.50 优于 0.45)来计算碳储量^[11-12]。等高反坡阶作为干旱地区及雨量充沛地区的有效水土保持措施,并未显著改变云南松各部位的碳含量,说明植被各部位碳含量产生变化主要仍与植被类型、地域分布以及植被本身的生理特性有关。本研究中,等高反坡阶处理下,0~5,5~10,10~15,15~30 龄云南松各部位碳含量变幅与其他地区不同类型树种碳含量变化基本一致,如河南洛宁县刺槐人工林碳含量波动范围为 43.66%~49.58%^[13]、山西太岳山不同树龄油松林为 41.12%~55.60%^[11]。植物不同部位碳含量不同,不同龄组下对照和布设等高反坡阶后平均碳含量高低排列依次为干>叶>枝>皮>粗根>中根>细根。这与其他树种的碳含量分布略有不同,如广西哨平试验场红锥林和杉木林碳含量排列顺序分别为皮>干>叶>枝>根和皮>叶>干>枝>根^[14]。云南松地上部分碳含量和地下部分碳含量均低于国际通用的树木碳含量均值(50%)及亚热带 17 种树种各器官的碳含量均值(50.4%)^[15]。但不同器官的碳含量差异显著,不同龄组各器官碳含量同样差异显著($p < 0.05$)。

生物量是研究森林生态系统碳储量和碳增量的基础,已有学者^[11,14]主要采用直接收获法和相对生长法来估算生物量。本研究中,采样期间由于正值农民因生活需要伐倒云南松,因此采用直接收获法估算不同处理下云南松生物量。云南松林为云南分布最广的森林类型,是云南省主要的森林碳库之一,因其适应性强、生长迅速、耐干旱瘠薄,碳储量在针叶林中比例最高(约占 70%)^[16],其变化将影响云南整个森林的碳汇功能。本研究中云南松总生物量为 72.50 t/hm²,低于广西百色云南松生物量 127.75 t/hm²^[17]。生物量较低的原因因为自上世纪八九十年代开始,为满

足当地农民经济及生活需求对当地云南松进行大面积采伐使其遭到破坏,采伐后环境质量进一步恶化,更新难度加大。地下部分生物量与地上部分比值随着龄组的增加而增加,说明云南松林具有相对较高的生长率和循环时期。本研究中,等高反坡阶对不同龄组地上部分生物量的影响表现出增加或降低,但显著提高了 15~30 龄云南松地下部分生物量(30.73%~35.72%)。原因是由于等高反坡阶在不同土地利用类型条件下可有效地截留水分和养分,土壤中持有较高的水分和养分使地下部分根系生物量增加。

研究^[3,14]表明,乔木层碳储量在森林生态系统植被碳储量中所占比例高于 80%,远远高于灌木层、草本层、凋落物层之和。因此虽然本研究并未涉及林下植被层储量,但使用直接收获法获得的乔木层碳储量与其他地区植被相比较也同样能够得到相同的预期结果。森林乔木层植被碳储量随林龄增加呈二次曲线增长的趋势^[2],本研究同样得到云南松地上部分和地下部分碳储量随着龄组的增加而显著增加的结果。云南松林乔木层碳储量均值为 33.90 t/hm²,低于我国森林植被乔木层碳储量均值 57.07 t/hm²^[18]。因此,制定有效森林管理措施,提高研究区云南松林乔木层碳储量这一问题亟待解决。云南松林乔木层各部位碳储量变化依次为干>(>5 cm 根)>皮>叶>枝>(2~5 cm 根)>(0.5~2 cm 根)>(0.2~0.5 cm 根)>(<0.2 cm 根),且等高反坡阶下树干碳储量随着龄组的增加而增加,说明布设等高反坡阶对该地区云南松乔木层的碳储量有潜在增加能力。树干碳储量在乔木层碳积累中占绝对优势是由于树干为慢速碳库,具有明显的净碳积累效应,而地上部分其他器官皮、叶、枝则随衰老组织脱落具有较强的碳循环能力。

等高反坡阶处理下云南松林总碳储量与生物量趋势相同,在 0~5,5~10,10~15 龄下与对照相比差异性不显著,但等高反坡阶显著提高了 15~30 龄地下部分碳储量(35.60%)。这是由于布设等高反坡阶可改变地表微地形,对降雨后的地表径流进行再分配,有效拦截径流于阶内,从而减少地表径流量和土壤侵蚀量,使土壤有机碳的固定能力和保水效果显著增加^[8]。因此,人工造林时应对等高反坡阶予以高度关注,等高反坡阶相当于窄式隔坡梯田,可考虑作为固碳的森林生态管理措施,从而提高碳储量。本研究中,对照和布设等高反坡阶下云南松林乔木层 8 年间碳增量分别为 15.46,20.37 t/hm²,说明该地区不同龄组云南松林均有碳储量潜力;布设等高反坡阶后云南松乔木层碳增量增加 31.76%,年平均固碳增量(2.56 t/hm²)与云南中部亚热带常绿阔叶林乔木层固碳增量(2.47 t/hm²)相当^[19],说明布设等高反坡阶后云南松林具有较强的碳汇潜力。已有研究^[20]表

明,树木所能固碳量的年增长率会随着乔木树龄的增长而迅速增加,因此,随着时间的推移,布设等高反坡阶后云南松次生林的固碳潜力将会持续增加。

可见,滇中昆明松华坝地区布设等高反坡阶可增加 15~30 龄云南松林地下部分生物量、碳储量和碳增量,可有效提高云南松林生长情况,从而治理和减缓水土流失,减少土壤养分流失和结构破坏,提高固碳能力,且仍具有一定的提高空间。研究区地处亚热带和暖温带混合型气候区,为典型的红壤坡地侵蚀区,由于农牧民长时间的生产活动,导致植被恢复效果较差。但在较短的时期内便自然形成了具有乔木树种和灌木植物的次生林,说明其植被的恢复过程相对较快。因此,为了提高研究区植被恢复过程及植被碳储量,一方面要加大现有天然林保护力度,减少周边居民对森林产生的人为干扰,禁止乱砍乱伐,减少因为采伐导致的森林碳储量的减少和碳汇潜力降低,防止碳源—碳汇的转变;另一方面应当在山地适度发展等高反坡阶措施,在等高反坡阶基础上因地制宜地进行人工造林,增加山地造林面积和植被碳储量,从而保护当地生态环境。同时,在气候变化的驱动下,今后需要更加系统地对应等高反坡阶下云南松森林生态系统林下植被层、土壤层以及近熟林和成熟林碳储量、碳增量、固碳速率以及分解作用中 CO₂ 释放量开展研究,为科学评价等高反坡阶对该地区森林生态系统碳汇能力的影响提供科学依据。

4 结论

(1)布设等高反坡阶后不同龄组云南松地上部分和地下部分各器官碳含量与对照无显著性差异,对照和布设等高反坡阶处理下碳含量变幅分别为 46.46%~49.27%和 41.01%~47.35%,平均碳含量高低排列依次为干>叶>枝>皮>粗根>中根>细根。

(2)布设等高反坡阶后在 10~15 龄的云南松地上部分总生物量比对照高 32.75%,显著提高了树干占地上部分生物量的比例以及 10~15,15~30 龄地下部分生物量(30.73%和 35.71%),不同处理下云南松总生物量随着龄组的增加逐渐显著增加,

(3)等高反坡阶显著提高了 10~15 龄云南松地上部分碳储量(32.79%)和 15~30 龄地下部分碳储量(35.60%);布设等高反坡阶 8 年后显著增加了 10~15,15~30 龄地上部分碳增量(53.33%和 20.45%)和地下部分碳增量(53.70%和 73.43%)。因此,人工造林时应对应等高反坡阶予以高度关注,适度发展等高反坡阶措施,在等高反坡阶基础上因地制宜地进行人工造林,增加山地造林面积,从而保护当地生态环境。

参考文献:

[1] Sullivan M J P, Talbot J, Lewis S L, et al. Diversity and carbon storage across the tropical forest biome [J].

- Scientific Reports, 2017, 7. DOI: 10.1038/srep39102.
- [2] 胡海清,罗碧珍,魏书精,等.大兴安岭 5 种典型林型森林生物碳储量[J].生态学报,2015,35(17):5745-5760.
- [3] 刘顺,罗达,刘千里,等.川西亚高山不同森林生态系统碳氮储量及其分配格局[J].生态学报,2017,37(4):1074-1083.
- [4] 王华,苏樑,宋同清,等.广西不同林龄硬阔林生态系统碳储量及其分配格局[J].生态学报,2017,36(6):1465-1472.
- [5] 王帅兵,宋娅丽,王克勤,等.不同雨型下反坡台阶减少红壤坡耕地氮磷流失的效果[J].农业工程学报,2018,34(13):160-169.
- [6] Xiang Y, Zhou S, Xiao Y, et al. Effects of simulated nitrogen deposition and precipitation changes on soil organic carbon in an evergreen broad-leaved forest that is part of the Rainy Area of Western China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(14): 4686-4695.
- [7] 王萍,王克勤,李太兴,等.反坡水平阶对坡耕地径流和泥沙的调控作用[J].应用生态学报,2011,22(5):1261-1267.
- [8] 王帅兵,王克勤,宋娅丽,等.等高反坡阶对昆明市松华坝水源区坡耕地氮、磷流失的影响[J].水土保持学报,2017,31(6):39-45.
- [9] 华锦欣,王克勤,张香群,等.昆明松华坝水源区等高反坡阶对坡耕地土壤磷含量的影响研究[J].中南林业科技大学学报,2016,36(3):76-81.
- [10] 蔡红梅,汪孟丽,田子玉.总有机碳分析仪测定有机肥料中有机碳含量[J].现代农业科技,2018(2):195.
- [11] 宋娅丽,韩海荣,康峰峰.山西大岳山不同林龄油松林生物量及碳储量研究[J].水土保持研究,2016,23(1):29-33.
- [12] 李海涛,王姗姗,高鲁鹏,等.赣中亚热带森林植被碳储量[J].生态学报,2007,27(2):693-703.
- [13] 贾汉森,段劫,马履一,等.不同林龄刺槐人工林碳储量及分配规律[J].安徽农业大学学报,2017,44(4):636-642.
- [14] 明安刚,刘世荣,莫慧华,等.南亚热带红锥、杉木纯林与混交林碳储量比较[J].生态学报,2016,36(1):244-251.
- [15] 李斌,方晰,田大伦,等.湖南省现有森林植被主要树种的碳含量[J].中南林业科技大学学报,2015,35(1):71-78.
- [16] 余茂源.云南松种质资源与遗传多样性研究进展[J].林业调查规划,2011,36(3):39-42.
- [17] 严理,刘晓璐,秦武明,等.广西百色细叶云南松天然林生物量研究[J].西部林业科学,2014,43(3):134-138.
- [18] 周玉荣,于振良,赵士洞.我国主要林林生态系统碳贮量和碳平衡[J].植物生态学报,2000,24(5):518-522.
- [19] 张鹏超,张一平,杨国平,等.哀牢山亚热带常绿阔叶林乔木碳储量及固碳增量[J].生态学杂志,2010,29(6):1047-1053.
- [20] Carreira J, Muñoz E. Biomass accumulation and carbon sequestration in an age-sequence of *Zanthoxylum bungeanum*, plantations under the Grain for Green Program in karst regions, Guizhou province [J]. Agricultural & Forest Meteorology, 2015, 203(1): 88-95.