

# 等高反坡阶对滇中云南松林生态系统碳储量及增量分配格局的影响

李学峰, 王克勤, 宋娅丽, 张雨鉴, 马延骁

(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生态系统碳储量特征进行估算,并分析了 8 a 后生态系统各层碳增量及分配格局。结果表明:布设等高反坡阶后云南松林乔木层、凋落物层、灌木层和草本层生物量分别比对照高出 9.07%, 9.29%, 8.17% 和 13.24%, 各层高低依次表现为乔木层(75.65 t/hm<sup>2</sup>) > 凋落物层(23.69 t/hm<sup>2</sup>) > 灌木层(4.68 t/hm<sup>2</sup>) > 草本层(1.80 t/hm<sup>2</sup>); 等高反坡阶处理下云南松林生态系统碳储量比对照高出 27.10%, 各层碳储量由高到低依次为土壤层(132.09 t/hm<sup>2</sup>) > 乔木层(35.32 t/hm<sup>2</sup>) > 凋落物层(5.94 t/hm<sup>2</sup>) > 灌木层(2.11 t/hm<sup>2</sup>) > 草本层(0.74 t/hm<sup>2</sup>), 分别占总碳储量的 72.12%, 22.26%, 3.86%, 1.31% 和 0.45%。等高反坡阶处理下云南松林生态系统的碳增量显著高于对照(29.68%), 乔木层、灌木层、草本层、凋落物和土壤层分别高出 31.76%, 28.21%, 27.17%, 15.54% 和 34.92%, 说明等高反坡阶可有效促进植物生长, 提高植被层及土壤层碳储量积累, 因此人工造林时可因地制宜适度应用一定的等高反坡阶措施, 加快当地碳库及生态环境的恢复速率, 提高森林生态系统的生产能力。

**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: 1005-3409(2019)05-0021-07

## Effects of Contour Reverse-Slope Terrace on Carbon Storage and Incremental Distribution of *Pinus yunnanensis* Forest Ecosystem in Middle of Yunnan Province

LI Xuefeng, WANG Keqin, SONG Yali, ZHANG Yujian, MA Yanxiao

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

**Abstract:** Through the combination of standard survey and biomass measurement, the carbon storage, carbon increment and distribution of *Pinus yunnanensis* forest ecosystems of contour reverse-slope terrace after 8 years were analyzed in the middle of Yunnan Province. The results showed that the biomass of tree layer, litter layer, shrub layer and herb layer of *Pinus yunnanensis* forest of contour reverse-slope terrace was 9.07%, 9.29%, 8.17% and 13.24% higher than that of the control, respectively. The biomass under contour reverse-slope terrace of different layer decreased in the order: tree layer (75.65 t/hm<sup>2</sup>) > litter layer (23.69 t/hm<sup>2</sup>) > shrub layer (4.68 t/hm<sup>2</sup>) > herb layer (1.80 t/hm<sup>2</sup>); in the contour reverse-slope terrace, the carbon storage was 27.10% higher than that of the control; the carbon storage of each layer presented in the order: soil layer (132.09 t/hm<sup>2</sup>) > tree layer (35.32 t/hm<sup>2</sup>) > litter layer (5.94 t/hm<sup>2</sup>) > shrub layer (2.11 t/hm<sup>2</sup>) > herb layer (0.74 t/hm<sup>2</sup>), which accounted for 72.12%, 22.26%, 3.86%, 1.31% and 0.45% of the total carbon storage, respectively; the carbon increase of contour reverse-slope terrace was significantly higher than that of the control (29.68%), and the carbon increases of the tree layer, shrub layer, herb layer, litter layer and soil layer were 31.76%, 28.21%, 27.17%, 15.54% and 34.92% higher than that of the control, respectively. In

收稿日期: 2018-11-19

修回日期: 2018-11-28

资助项目: 云南省科技计划重点研发项目(2018BB018); 国家自然科学基金(30660037); 云南省应用基础研究青年项目(2016FD044); 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, 研究方向为森林生态系统碳储量。E-mail: 15587129335@163.com

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

summary, the contour reverse-slope terrace can effectively promote plant growth and increase the accumulation of carbon storage in vegetation and soil layer. Therefore, it is possible to apply contour reverse-slope terrace measures to accelerate local carbon storage during artificial afforestation. If that's the way, the recovery rate of the carbon pool and ecological environment can be accelerated, and the productivity of forest ecosystems can be increased.

**Keywords:** contour step; biomass; carbon storage; carbon increment; distribution

CO<sub>2</sub>作为重要的温室气体,其源与汇已成为全球关注的热点,陆地生态系统的平衡对全球碳循环存在重要影响。而陆地生态系统中最重要主体森林生态系统,其储存了陆地生态系统中近的 2/3 的有机碳,在减缓大气中 CO<sub>2</sub>浓度上升、改善生态环境及涵养水源等方面具有不可替代的作用<sup>[1-4]</sup>。森林生态系统中各层碳储量对生态系统整体固碳特征、碳汇功能的理解及森林的固碳增汇经营管理起到关键作用,其中乔木层碳储量占到生态系统碳储量的 13.57%~56.65%<sup>[5-9]</sup>,林下植被层和土壤层碳储量分别占到生态系统碳储量的 0.90%~5.60%<sup>[10]</sup>和 74.95%~83%<sup>[11]</sup>。近年来国内外学者对全球各区域森林碳储量特征进行了研究,研究多集中于海拔、林龄组成、林分类型、气候、土壤母质等自然条件和人为管理措施对不同地区森林生态系统碳储量的影响<sup>[5,7-9]</sup>。但各地区不同生态系统的碳储量结果仍存在较大差异,因此为丰富世界森林生态系统案例而开展区域尺度森林生态系统的碳储量研究亦具有重要意义。

常用水土保持措施中等高反坡阶可有效增加土壤中有有机碳、氮、磷、钾等营养元素的固定速率,显著提高降雨入渗,从而减少土壤表层养分流失<sup>[12-14]</sup>。等高反坡阶措施下增加的营养元素、腐殖质(土壤碳)及土壤水分则可有效增加单位面积内微生物及分解者的数量,通过营养物质的积累促进林木生长速率,增加生物量,进而加快森林碳库的循环及固定效率,尤其适用于降雨季节分配严重不均的云南山区<sup>[13,15-16]</sup>。目前等高反坡阶的研究主要集中于对坡耕地氮磷流失特征、产流产沙特征<sup>[15,17]</sup>等方面,但探讨布设等高反坡阶后对森林生态系统植被层和土壤层碳储量及增量分布格局影响的研究仍鲜见报道。因此,本文以滇中云南松(*P. yunnanensis* forest)次生林为研究对象,应用野外样地调查方法和直接收获法,根据滇中云南松林生态系统乔木层、灌木层、草本层、凋落物层及土壤层各组分碳含量的实测数据,探究布设等高反坡阶 8 a 后云南松林生态系统碳储量及增量分配格局特征,旨在为提高森林碳汇功能、区域碳储量估算精度、植被恢复及我国南方侵蚀退化区林地经营提供重要科学依据。

## 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°14'43"—25°12'48",东经 102°44'51"—102°48'37",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,多年平均降雨量 785.1 mm,雨季(5—10月)降雨量占全年降雨量的 87.5%。入库河流有牧羊河、冷水河,多年平均径流量 2.1 亿 m<sup>3</sup>。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(*Pinus yunnanensis*)为优势种的暖温性叶林。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,土壤厚度中厚,局部为薄土层,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(*Rhododendron spiciferum*)、云南杨梅(*Myrica nana*)等。草本有车前(*Plantago asiatica*)、白草(*Pennisetum centrasianicum*)、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 月在云南松林的区域中布设 6 个 20 m×20 m 标准样地,样地基本情况详见表 1。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、减沙、增加入渗和减少水土流失为目的,每两个等高反坡阶的垂直距离为 4 m。等高反坡阶剖面示意图如图 1 所示。

1.2.2 植被层及土壤层碳含量、生物量测定 分别于 2009 年 11 月和 2017 年 11 月生长季结束后,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、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。将地下根系分为粗根(直径在 2~5 cm 根和直径 >5 cm 根)、中根(直径在 0.5~2 cm 根)和细根(直径 <0.2 cm 根和直径为 0.2~0.5 cm 根)进行仔细挖掘,分别称鲜重。植物根系采用完整挖掘法,每 10 cm 为一层,乔木、灌木及草本分别挖至 120,70,40 cm<sup>[18]</sup>。

表 1 云南松林样地基本特征

编号	样地设置	海拔/ m	林龄/ a	土壤类型	郁闭度	密度/ (株·hm <sup>-2</sup> )	平均 胸径/cm	平均 树高/m	坡位	坡度/(°)	坡向
1	对照	2100	20	红壤	89	3800	14.20	3.10	中部	15	NE13°
2	对照	2100	20	红壤	88	4050	13.90	2.97	中部	15	NE13°
3	对照	100	20	红壤	90	3950	14.03	2.86	中部	15	NE13°
4	等高反坡阶	2100	20	红壤	86	4000	14.62	2.74	中部	15	NE13°
5	等高反坡阶	2100	20	红壤	89	3700	14.11	3.00	中部	15	NE12°
6	等高反坡阶	2100	20	红壤	88	3850	14.03	2.81	中部	15	NE14°

注:表中 NE 表示北偏东。

在 6 个标准样地中分别设置 5 个 2 m×2 m 的灌木林样方和 5 个 1 m×1 m 的草本样方。分别记录灌木层植物种类、株高及其盖度;草本层的种类、密度和高度。将样方内所有灌木层及草本层植物全部收获,灌木层分根、枝、叶分别称鲜重,草本层分地上和地下部分别称鲜重。凋落物则采用五点取样法随机围取 5 个 1 m×1 m 的代表性样方,将样方内凋落物按未分解、半分解、已分解三层收集并称鲜重。同时各层分别取 300 g 新鲜样品带回实验室,放入 65℃ 烘箱烘至恒重,测定样品干重,计算鲜/干重比,推算各部分生物量。烘干后的样品粉碎后过 100 目筛,用 TOC 分析仪法 (TOC-L-CPH-SSM 5000A 型) 测定样品中的全碳含量 (TC)<sup>[19]</sup>。

在各标准样地内按对角线法设样点 3 个,每个样点挖 0—100 cm 土壤剖面,采用环刀(容积为 100 cm<sup>3</sup>) 在土壤剖面的 0—10 cm, 10—20 cm, 20—30 cm, 30—50 cm, 50—70 cm, 70—100 cm 共 6 层,每层用环刀系统地排列 5 个点取混合样约 500 g 土样装入布袋中,运回实验室风干,用环刀法和 TOC 分析仪法 (TOC-L-CPH-SSM 5000A 型) 分别测定土壤容重及全碳含量 (TC)<sup>[19]</sup>。

1.2.3 植被层及土壤层碳储量和碳增量计量 本研究中云南松林植被层碳储量为 2017 年测定,包括乔

各部分分别取 300 g 新鲜样品带回实验室,放入 65℃ 烘箱烘至恒重,测定样品干重,计算鲜/干重比,推算其余各部分生物量。烘干后的样品粉碎后过 100 目筛,用 TOC 分析仪法 (TOC-L-CPH-SSM 5000A 型) 测定样品中的全碳含量 (TC)<sup>[19]</sup>。

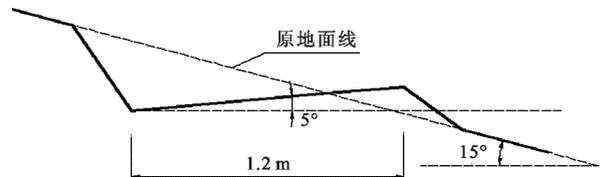


图 1 等高反坡阶剖面示意图

木层、灌木层、草本层及凋落物层;土壤层碳储量则包括 0—10 cm, 10—20 cm, 20—30 cm, 30—50 cm, 50—70 cm, 70—100 cm 共 6 层的碳储量。植被层各部分的碳储量 (t/hm<sup>2</sup>) 由各部分的碳含量 (%) 与对应部分的生物量 (t/hm<sup>2</sup>) 的乘积获得。土壤层碳储量计算公式如下<sup>[20]</sup>:

$$T_N = \sum C_N P_N D_N \quad (1)$$

式中:  $T_N$  为  $N$  层剖面深度内土壤碳储量 (g/cm<sup>3</sup>);  $C_N$  为第  $N$  层中土壤碳含量 (%);  $P_N$  为第  $N$  层土壤容重 (g/cm<sup>3</sup>);  $D_N$  为  $N$  层剖面厚度 (cm)。

植被层及土壤层碳增量则由 2009 年的碳储量与 2017 年碳储量的差值获得。

### 1.3 数据分析

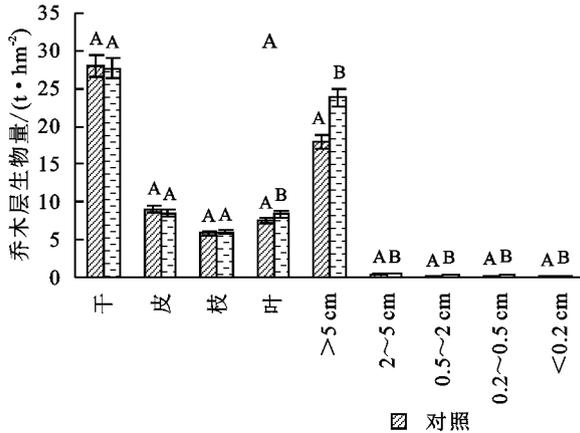
使用 Excel 2010 和 SPSS 22.0 统计分析软件进行数据处理和图表分析,用单因素方差分析 (One-Way-ANOVA) 检验不同人为管理措施下乔木层、灌木层、草本层、凋落物层及土壤层各组碳储量和碳增量的差异性。

## 2 结果与分析

### 2.1 等高反坡阶对云南松林生态系统生物量的影响

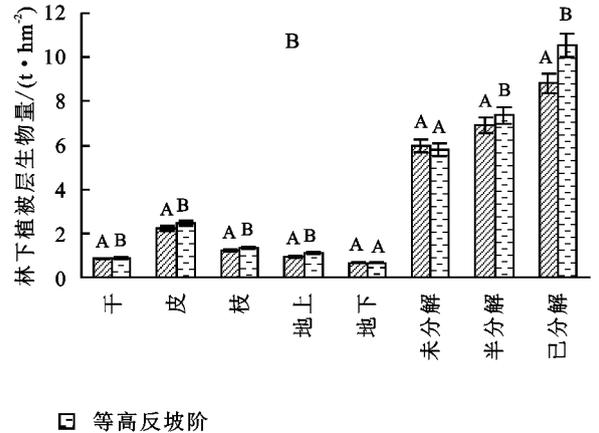
对照和等高反坡阶处理下云南松林生态系统的植被层总生物量分别为 96.95, 105.82 t/hm<sup>2</sup>, 等高反

坡阶处理比对照高出 9.15% ( $p < 0.05$ ) (图 2)。对照和等高反坡阶各组分生物量大小依次表现为: 乔木层 ( $69.35, 75.65 \text{ t/hm}^2$ ) > 凋落物层 ( $21.68, 23.69 \text{ t/hm}^2$ ) > 灌木层 ( $4.32, 4.68 \text{ t/hm}^2$ ) > 草本层 ( $1.59, 1.80 \text{ t/hm}^2$ )。乔木层分别比凋落物层、灌木层和草本层高出 219.59%, 1 510.45% 和 4 189.29%。乔木层各器官中生物量大小依次为: 干 > 根 > 皮 > 叶 > 枝, 其中干占乔木层层生物量的 38.45%, 分别比其他器官高出 26.64% ~ 370.86%。灌木层生物量最高的为枝, 约占灌木层生物量的 52.10%; 其次为根和叶。草本层地上部分生物量均高于大于地下部分。凋落



物层中已分解凋落物生物量最高, 占本层生物量的 42.58%, 分别比半分解凋落物、未分解凋落物高出 26.05% 和 39.12%。

等高反坡阶处理下云南松林各层生物量均高于对照, 乔木层、灌木层、草本层及凋落物层的生物量分别比对照高出 9.07%, 8.17%, 13.24% 和 9.29% ( $p < 0.05$ ), 说明布设等高反坡阶后显著促进了云南松林生态系统植被各层的生长。等高反坡阶处理下乔木层的叶和各径级根、灌木层及凋落物层的半分解凋落物、已分解凋落物, 其生物量均显著高于对照 ( $p < 0.05$ ), 说明等高反坡阶对植被各组分地下部分影响较显著。



注: 图 A 中 >5, 2~5, 0.5~2, 0.2~0.5, <0.2 cm 分别指乔木层根系; 图 B 中叶、枝、根为灌木层各组分, 地上、地下为草本层各组分, 未分解、半分解、已分解为凋落物层各组分。

图 2 等高反坡阶下云南松生态系统植被层生物量特征

## 2.2 等高反坡阶对云南松林生态系统碳储量的影响

对照与等高反坡阶下云南松林生态系统碳储量分别为  $128.45, 176.21 \text{ t/hm}^2$ , 其中植被和土壤碳储量分别占生态系统碳储量的 27.88% 和 72.12% (表 2)。各层碳储量趋势表现为: 土壤层 ( $87.63, 132.09 \text{ t/hm}^2$ ) > 乔木层 ( $32.48, 35.32 \text{ t/hm}^2$ ) > 凋落物层 ( $5.81, 5.94 \text{ t/hm}^2$ ) > 灌木层 ( $1.89, 2.11 \text{ t/hm}^2$ ) > 草本层 ( $0.64, 0.74 \text{ t/hm}^2$ )。等高反坡阶处理下云南松林生态系统的碳储量 ( $176.20 \text{ t/hm}^2$ ) 比对照高出 27.10%, 其中乔木层、灌木层、草本层、凋落物层及土壤层碳储量分别对照高出 8.74%, 11.64%, 15.63%, 2.24% 和 50.74% ( $p < 0.05$ ), 说明等高反坡阶有效提升了云南松林生态系统的碳储量。

对照与等高反坡阶下云南松林乔木层地上部分的碳储量均高于地下部分 (分别高出 1.14, 1.82 倍), 各器官中干的碳储量最高, 占本层碳储量的 40.99%, 分别比其他各器官高出 34.77% ~ 373.00%。灌木层地上部分碳储量亦大于地下部分, 碳储量最高的为枝, 比叶、根分别高出 153.21% 和 79.81%, 占到本层

碳储量的 51.25%。草本层碳储量最低, 仅占整个生态系统碳储量的 0.46%, 地上部分碳储量比地下高出 81.33%。凋落物层的未分解凋落物碳储量最高, 占凋落物层碳储量的 44.34%, 分别比半分解凋落物及已分解凋落物高出 2.36% 和 259.31%。等高反坡阶处理下 0—10 cm, 10—20 cm, 20—30 cm, 30—50 cm, 50—70 cm, 70—100 cm 土层中土壤碳储量分别占整个剖面的 22.05%, 15.41%, 13.86%, 17.07%, 16.34% 和 15.25%, 土壤层碳储量储存在 0—50 cm 土层中的比例高于 60%。

## 2.3 等高反坡阶对云南松林生态系统碳增量的影响

等高反坡阶处理 8 a 后云南松林生态系统的碳增量为  $31.50 \text{ t/hm}^2$ , 比对照高出 29.68% (表 3), 说明等高反坡阶显著提高了云南松林生态系统的固碳水平。对照与等高反坡阶下植被层的碳增量约占整个生态系统碳增量的 83.28%。其碳增量中乔木层最高, 分别比灌木层、草本层、凋落物层及土壤层高出 38.64, 39.74 倍、15.80, 16.14 倍、3.37, 3.98 倍和 2.79, 2.88 倍。土壤层以 10 cm 的土层厚度为单位, 土壤碳增量随着土层

深度增加而减小,0—10 cm 土层的单位碳增量比 70—100 cm 深度土层高出 339.00%。

**表 2 等高反坡阶下云南松林植被层及土壤层碳储量特征**  
t/hm<sup>2</sup>

分层	采集器官	对照	等高反坡阶
乔木层	干	13.39±1.71aA	13.24±0.97aA
	皮	4.24±0.32cA	4.01±0.31cA
	枝	2.79±1.01dA	2.84±0.10dA
	叶	3.56±0.47cA	3.97±0.20cA
	>5 cm 根	8.03±1.06bA	10.70±0.47bB
	2~5 cm 根	0.20±0.04 eA	0.23±0.03 eB
	0.5~2 cm 根	0.11±0.01 eA	0.13±0.02 eB
	0.2~0.5 cm 根	0.10±0.01 eA	0.13±0.02 eB
	<0.2 cm 根	0.06±0.01 eA	0.07±0.01 eA
	合计	32.48±2.39A	35.32±1.97B
灌木层	叶	0.38±0.06aA	0.43±0.03aB
	枝	0.97±0.11cA	1.08±0.07cB
	根	0.54±0.07bA	0.60±0.08bA
	合计	1.89±0.17A	2.11±0.16A
草本层	地上	0.40±0.05bA	0.49±0.04bB
	地下	0.24±0.03aA	0.25±0.02aA
	合计	0.64±0.06 eA	0.74±0.05B
凋落物层	未分解	2.73±0.47aA	2.48±0.34aA
	半分解	2.46±0.39aA	2.63±0.27aA
	已分解	0.62±0.08bA	0.83±0.09bB
	合计	5.81±0.62A	5.94±0.59A
	0~10 cm	18.25±0.30aA	29.13±0.57aB
土壤层	10~20 cm	11.09±0.55bA	20.36±1.54bB
	20~30 cm	8.73±0.46cA	18.32±1.08cB
	30~50 cm	14.82±1.04dA	22.55±0.17dB
	50~70 cm	15.27±0.75dA	21.58±1.22dB
	70~100 cm	19.47±0.90aA	20.15±0.93bA
合计	87.63±3.01A	132.09±4.17B	
总和	128.45±13.76A	176.20±15.43B	

注:同列不同小写字母表示同一处理下各组分不同器官间碳含量差异显著( $p<0.05$ ),同行不同大写字母表示不同处理下各组分相同器官间碳含量差异显著( $p<0.05$ )。

等高反坡阶显著提高了乔木层、灌木层、草本层、凋落物和土壤层的碳增量,与对照相比分别提高 31.76%,28.21%,27.17%,15.54%和 34.92%,乔木层各器官比对照高出 20.00%~100.03%,其中干在本层所占比重最高(38.55%)分别比其他各器官高出 48.48%~23 862.5%。灌木层中叶、枝及根的碳增量分别比对照高出 30.00%,16.67%及 30.43%,其中根的碳增量分别比叶、枝高出 130.38%,305.95%。草本层的地上、地下分别比对照高出 27.12%和 27.27%。凋落物

层未分解和半分解部分的碳增量显著高于已分解部分,分别为已分解部分的 3.54 倍和 3.48 倍。布设等高反坡阶后未分解、半分解及已分解部分碳增量分别比对照高出 3.01%,20.67%及 50.00%,由此可见等高反坡阶对凋落物层中的已分解凋落物影响最为显著。布设等高反坡阶后 0—10 cm,10—20 cm,20—30 cm,30—50 cm,50—70 cm 及 70—100 cm 土层的碳增量分别比对照高出 44.58%,76.00%,65.00%,31.34%,21.74%及 2.25%,由此可见 0—50 cm 土层的碳增量受等高反坡阶的影响最为显著。

**表 3 等高反坡阶下云南松林植被层及土壤层碳增量特征**  
t/hm<sup>2</sup>

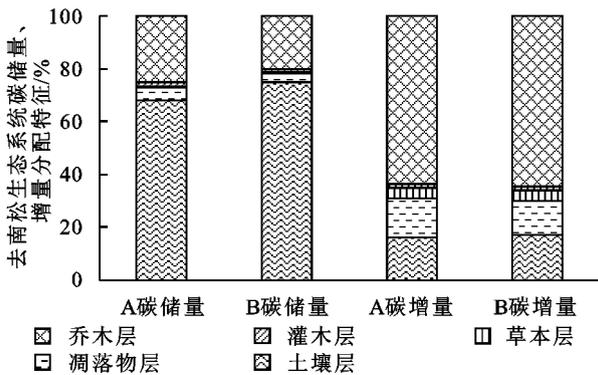
分层	采集器官	对照	等高反坡阶
乔木层	干	5.96±0.95aA	7.25±0.73aB
	皮	2.02±0.31cA	2.34±0.11cB
	枝	1.65±0.13dA	1.98±0.10dB
	叶	2.12±0.11cA	2.81±0.19cB
	>5 cm 根	3.52±0.47bA	5.68±1.06bB
	2~5 cm 根	0.08±0.002 eA	0.13±0.02 eB
	0.5~2 cm 根	0.05±0.01 eA	0.07±0.01 eA
	0.2~0.5 cm 根	0.04±0.01 eA	0.07±0.01 eB
	<0.2 cm 根	0.02±0.001 eA	0.04±0.004 eB
	合计	15.46±1.44A	20.37±1.15B
灌木层	叶	0.10±0.01bA	0.13±0.01bB
	枝	0.06±0.007aA	0.07±0.008aB
	根	0.23±0.03cA	0.30±0.01cB
合计	0.39±0.05A	0.50±0.04B	
草本层	地上	0.59±0.07aA	0.75±0.10aB
	地下	0.33±0.02bA	0.42±0.09bB
	合计	0.92±0.09A	1.17±0.11B
凋落物层	未分解	1.66±0.17bcA	1.71±0.16bB
	半分解	1.50±0.04bA	1.81±0.20bcB
	已分解	0.38±0.02aA	0.57±0.01aB
	合计	3.54±0.19aA	4.09±0.27B
	0—10 cm	0.83±0.13aA	1.20±0.09aB
土壤层	10—20 cm	0.50±0.02cA	0.88±0.04bcB
	20—30 cm	0.40±0.01dA	0.66±0.02cB
	30—50 cm	0.67±0.02bA	0.88±0.04bcB
	50—70 cm	0.69±0.01bA	0.84±0.03bcB
	70—100 cm	0.89±0.03aA	0.91±0.05bB
合计	3.98±0.19A	5.37±0.21B	
总和	24.29±4.29A	31.50±5.07B	

注:同列不同小写字母表示同一处理下各组分不同器官间碳含量差异显著( $p<0.05$ ),同行不同大写字母表示不同处理下各组分相同器官间碳含量差异显著( $p<0.05$ )。

## 2.4 等高反坡阶对云南松生态系统碳储量、碳增量分配特征的影响

对照与等高反坡阶下云南松林生态系统中土壤层

碳储量均处支配地位,分别占整个生态系统碳储量的68.22%和74.97%(图3),其次为乔木层(20.05%和25.28%)、凋落物层(3.37%和4.52%)、灌木层(1.20%和1.47%)及草本层(0.42%和0.50%)。乔木层、土壤层、凋落物层、草本层及灌木层碳增量分别占整个生态系统碳增量的63.65%和64.67%,16.39%和17.05%,12.98%和14.57%,3.71%和3.78%以及1.58%和1.61%。等高反坡阶处理下土壤层碳增量在整个生态系统所占的比例与对照相比高出9.89%,乔木层与土壤层较对照增加了1.60%和4.04%。综上所述等高反坡阶显著提升了土壤层在碳储量及碳增量的分配比例,说明等高反坡阶主要影响生态系统地下部分的储量与碳增量分配。



注:A和B分别代表对照和等高反坡阶。

图3 等高反坡阶下云南松生态系统碳储量和碳增量分配特征

### 3 讨论

目前国内外研究中生物量的估算主要采用直接收获法和相对生长法,而生物量又是研究森林生态系统碳储量和碳增量必不可少的基础<sup>[21-22]</sup>,本研究采用直接收获法与室内试验结合的方法估算等高反坡阶下云南松林生态系统的生物量使得结果更为准确。云南松林为云南分布最广的森林类型,是西南地区的主要森林碳库之一,生态系统中乔木及土壤层碳储量是其最主要的组成部分(约占70%)<sup>[23]</sup>,其变化将影响云南整个森林生态系统的碳汇功能。本研究中对照与等高反坡阶下云南松林生态系统的总生物量分别为96.95,105.82 t/hm<sup>2</sup>,高于黄土高原子午岭油松林生态系统的生物量94.24 t/hm<sup>2</sup><sup>[24]</sup>。其原因在于研究区滇中云南松地处亚热带和暖温带混合型气候区,年积温远高于黄土高原地区,水热条件优越植被生长迅速。等高反坡阶处理下云南松林各植被层(乔木、灌木、草本、凋落物)生物量均高于对照(高出8.17%~13.24%),这主要是由于云南山区干湿季降雨季节分配严重不均,等高反坡阶可有效地在不同季

节截留降雨和养分<sup>[13-17]</sup>,提高土壤的水分、养分含量,促进植物生长,从而增加各组分生物量。

等高反坡阶作为水土保持措施,在本研究中提高了云南松林生态系统各组分的碳储量(乔木层8.04%、灌木层11.64%、草本层15.63%、土壤层50.74%),说明等高反坡阶可作为有效增加该地区云南松生态系统碳储量的重要生态措施。各层中碳储量提高在土壤层最为显著,原因在于等高反坡阶促进了植被层的生长和碳循环,使土壤表层碳得以积累;其次等高反坡阶增加了降雨入渗使地表碳中的可溶性的碳得以大量渗入到土壤层中。本研究中,云南松林生态系统碳储量为128.45~176.21 t/hm<sup>2</sup>,低于我国森林生态系统碳储量的均值285.33 t/hm<sup>2</sup><sup>[6]</sup>,而植被层(36.86 t/hm<sup>2</sup>)、凋落物层(5.88 t/hm<sup>2</sup>)、土壤层(109.86 t/hm<sup>2</sup>)的碳储量同样低于全国平均碳储量(57.07, 8.21, 171.21 t/hm<sup>2</sup>)<sup>[6]</sup>。说明当地农民为了经济利益大量砍伐云南松后,对该地区云南松林生态系统碳储量的降低影响显著。因此,提高研究区云南松林生态系统碳储量,因地制宜制定有效的森林管理措施这一问题亟待解决。

布设等高反坡阶8a后云南松林乔木层、灌木层、草本层、凋落物层及土壤层分别比对照的各层碳增量增加了31.76%,28.21%,27.17%,15.54%和34.92%,云南松林生态系统总碳增量比对照高出29.68%,年均固碳增量分别为2.24,0.06,0.13,0.47及0.58 t/hm<sup>2</sup>。说明布设等高反坡阶后增强了云南松林生态系统各层的碳汇潜力,尤其是乔木和土壤层的碳汇能力。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再分配,有效拦截径流于阶内,从而减少地表径流量、土壤侵蚀量增加入渗,显著提高土壤的碳固定能力和保水保肥效果<sup>[14]</sup>。因此,等高反坡阶可考虑作为森林固碳的生态管理措施,从而提高整个生态系统的碳储量。

为提高试验区云南松林生态系统的碳储量和恢复速率,一边要加大天然林的保护力度,减少周边居民薪伐对森林碳储量和碳汇潜力产生不利影响;另一边在山坡适度发展等高反坡阶措施,提高当地生态系统碳储量和环境的恢复速度。同时,在全球气候变化的影响下,对等高反坡阶下不同林龄云南松生态系统的碳储量、碳增量、固碳速率及分解作用中CO<sub>2</sub>释放量等都需要更为系统的研究,为评价等高反坡阶对该地区森林生态系统碳汇能力的作用提供了一些必要参数。

## 4 结论

(1) 受等高反坡阶影响云南松生态系统的生物量(55.56%)得到了显著提升,乔木层、凋落物层、灌木层及草本层分别比对照高出 9.07%, 9.29%, 8.17% 和 13.24%;生态系统中各层生物量由高到低依次乔木层、凋落物层、灌木层及草本层,分别占总生物量的 71.51%, 22.38%, 4.44% 及 1.67%。

(2) 等高反坡阶显著提高了云南松林生态系统碳储量(27.10%),土壤层、乔木层、凋落物层、灌木层及草本层分别比对照高出 50.74%, 8.74%, 2.24%, 11.64% 和 15.63%;生态系统各组分中碳储量由高到低依次为土壤层、乔木层、凋落物层、灌木层及草本层,分别占总碳储量的 72.12%, 22.26%, 3.86%, 1.31% 和 0.45%。

(3) 等高反坡阶显著提高了云南松林生态系统碳增量(29.68%),其中乔木层、灌木层、草本层、凋落物和土壤层分别比对照提高 31.76%, 28.21%, 27.17%, 15.54% 和 34.92%;生态系统各组分中碳增量由高到低依次为乔木层、土壤层、凋落物层、草本层及灌木层分别占总碳增量的 64.22%, 16.76%, 13.68%, 3.75% 和 1.60%。

### 参考文献:

[1] Sullivan M, Talbot J, Lewis S, et al. Diversity and carbon storage across the tropical forest biome[J]. *Scientific Reports*, 2017, DOI:10.1038/srep39102.

[2] Banaitis M R, Langley-Turnbaugh S J, Aboueiassa A. Variations of soil organic carbon in three urban parks: a Maine case study[J]. *International Journal of Applied Environmental Sciences*, 2007, 2(2):119-129.

[3] Liu G, Fu B, Fang J. Carbon dynamics of Chinese forests and its contribution to global carbon balance[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(5):733-740.

[4] Piao S, Fang J, Ciais P, et al. The carbon balance of terrestrial ecosystems in China[J]. *Nature*, 2010, 458(7241):1009-1013.

[5] Ren H, Li L, Liu Q, et al. Spatial and temporal patterns of carbon storage in forest ecosystems on Hainan island, southern China [J]. *Plos One*, 2014, 9(9): e108163.

[6] 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.

[7] Houghton R A. Aboveground forest biomass and the

global carbon balance[J]. *Global Change Biology*, 2005, 11(6):945-958.

[8] 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.

[9] Li Y, Zhou G, Huang W, et al. Potential effects of warming on soil respiration and carbon sequestration in a subtropical forest[J]. *Plant & Soil*, 2016, 409(1/2):1-11.

[10] 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].*生态学杂志*, 2017, 36(6): 1465-1472.

[11] 许文强,杨辽,陈曦,等.天山森林生态系统碳储量格局及其影响因素[J].*植物生态学报*, 2016, 40(4):364-373.

[12] 刘淑琴,夏朝宗,冯薇,等.西藏森林植被乔木层碳储量与碳密度估算[J].*应用生态学报*, 2017, 28(10):3127-3134.

[13] 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.

[14] 陈敏全,王克勤.等高反坡阶对坡耕地土壤碳库的影响[J].*水土保持通报*, 2015, 35(6):41-46, 52.

[15] 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.

[16] 武军,王克勤,华锦欣.松华坝水源区等高反坡阶对坡耕地雨季土壤水分空间分布的影响[J].*水土保持通报*, 2016, 36(1):57-60.

[17] 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.

[18] 张博文.植物根系研究方法及其趋势[J].*农业科学与技术:英文版*, 2017, 18(12):2295-2298, 2302.

[19] 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):195-200.

[20] 邵月红,潘剑君,许信旺,等.浅谈土壤有机碳密度及储量的估算方法[J].*土壤通报*, 2006, 37(5):1007-1011.

[21] 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贮量比较[J].*生态学报*, 2016, 36(1):244-251.

[22] Ordóñez J A B, Jong B H J, García-Oliva F, et al. Carbon content in vegetation, litter, and soil under 10 different land-use and land-cover classes in the Central Highlands of Michoacan, Mexico [J]. *Forest Ecology and Management*, 2008, 255(7):2074-2084.

[23] 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.

[24] 杨玉姣,陈云明,曹扬.黄土丘陵区油松人工林生态系统碳密度及其分配[J].*生态学报*, 2014, 34(8):2128-2136.