

等高反坡阶对滇中云南松林下碳储量及增量分配格局的影响

李学峰, 宋娅丽, 王克勤, 张雨鉴, 杨小倩

(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林下植被层和土壤层碳储量进行了估算,并分析了 8 a 后各层碳增量及分配格局。结果表明:(1)布设等高反坡阶后灌木叶、已分解凋落物及土壤层碳含量显著高于对照,对照和布设等高反坡阶处理下灌木层、草本层、凋落物层及土壤层碳含量变幅分别为 441.2~484.4 g/kg, 371.0~433.6 g/kg, 70.4~458.5 g/kg, 4.1~20.0 g/kg;(2)不同处理下林下植被层中凋落物层生物量最高,其次为灌木层、草本层,等高反坡阶处理下灌木层、草本层、凋落物层的生物量分别比对照显著高出 8.17%, 13.24%, 9.29%, 布设等高反坡阶显著提高了林下植被各层生物量;(3)林下植被层和土壤层碳储量表现为土壤层>凋落物层>灌木层>草本层,碳增量则表现为土壤层>凋落物层>草本层>灌木层,等高反坡阶处理下灌木层(高 11.64%)、草本层(高 15.63%)与土壤层(高 50.74%)碳储量皆高于对照,灌木层、草本层、凋落物及土壤层碳增量与对照相比则分别增加了 28.21%, 27.17%, 15.54%, 34.92%。等高反坡阶可有效促进植物生长,提高林下植被层及土壤层碳储量的积累,因此人工造林时可因地制宜适度应用等高反坡阶措施,加快当地碳库及生态环境的恢复速率,提高云南松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

中图分类号:S718.5

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2019)04-0019-07

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

LI Xuefeng, SONG Yali, WANG Keqin, ZHANG Yujian, YANG Xiaoqian

(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 of the undergrowth vegetation layer and soil layer of Yunnan pine forest under contour reverse-slope terrace was estimated, and the carbon increase of each layer after 8 years was analyzed. The results showed that: (1) The contents of carbon in shrub leaves, decomposed litter and soil layer under contour reverse-slope terrace were significantly higher than that of the control; and the carbon contents of shrub layer, herb layer, litter layer and soil layer under the control and contour reverse-slope terrace were 441.2~484.4 g/kg, 371.0~433.6 g/kg, 70.4~458.5 g/kg, 4.1~20.0 g/kg, respectively; (2) the litter layer biomass in the understory vegetation layer was the highest under different treatments, followed by the shrub layer and the herb layer; the biomass of the shrub layer, the herb layer and the litter layer under contour reverse-slope terrace were significantly 8.17%, 13.24%, 9.29% higher than the control. respectively; the biomass of each layer of undergrowth vegetation layer significantly increased; (3) the carbon storage of understory vegetation layer and soil layer decreased in the order: soil layer>litter layer>shrubs layer>herb layer; and carbon increment decreased in the order: soil layer>litter layer>herb layer>shrubs layer; carbon storage of shrub layer, herb layer and soil layer) was 11.64%, 15.63%, 50.74% higher than that of the control, respectively; the soil

收稿日期:2018-10-13

修回日期:2018-10-30

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)

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:王克勤(1964—),男,甘肃庄浪人,博导,教授,主要从事小流域环境综合治理的理论与技术研究。E-mail:wangkeqin7389@sina.com

carbon increment in the shrub layer, herb layer, litter layer and soil layer increased by 28.21%, 27.17%, 15.54% and 34.92%, respectively. The measurement of contour reverse-slope terrace can effectively promote plant growth and increase the accumulation of carbon storage in the understory vegetation layer and soil layer. Therefore, it is possible to apply appropriate contour reverse-slope terrace measures in accordance with local conditions during the afforestation to accelerate the recovery of local carbon pools and ecological environment, and increase the production capacity of the Yunnan pine ecosystem.

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

由于人类社会的生产生活使全球 CO_2 浓度不断升高,引起了海平面升高、气候反常及两极冰川融化等一系列全球性的生态环境问题,因此世界各国政府和学者均极为关注如何提高生态系统碳储量及固定这一科学问题。森林生态系统作为陆地生态系统的主体,其储存了陆地生态系统中近 2/3 的有机碳,在减缓全球气候变化、改善生态环境及涵养水源等方面有不可替代的作用^[1],也是结构最为复杂、占地面积最大、分布最广的陆地生态系统^[2]。近年来,国内外学者在不同尺度上(全球、国家的大尺度及区域小尺度)对森林生态系统中植被及土壤碳储量进行了研究,研究集中于海拔、林龄组成、林分类型、气候、土壤母质等自然条件和人类经营活动对植被及土壤碳储量的影响^[3-6]。植被及土壤碳储量是评价森林生态系统可持续发展的重要指标,森林生态系统中林下植被层碳储量占到森林生态系统碳储量的 0.90%~5.60%^[7],为植被碳储量的 2.75%~20.92%^[8-9],土壤层碳储量占整个生态系统碳储量的 74.95%~83%^[10],两者均不可忽视。由于各地区不同生态系统中林下植被层及土壤层的碳储量结果存在较大差异,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林下植被层及土壤层碳储量研究具有重要意义。

等高反坡阶作为人为经营措施中常用的坡耕地水土保持控制措施,可有效增加土壤中有有机碳、氮、磷、钾等营养物质的固定,增加降雨入渗从而减少表层土壤肥力流失^[11-13]。而土壤营养元素、腐殖质及水分流失的减少则会增加微生物和分解者的数量,加速营养物质的积累,进而增加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^[12,14-15]。目前对等高反坡阶的研究集中于坡耕地氮磷流失特征、产流产沙特征^[14-16]等方面,而探讨布设等高反坡阶后对森林生态系统林下植被及土壤碳储量、碳增量分配格局影响的研究仍鲜见报道。因此,本文以滇中云南松(*Pinus yunnanensis*)次生林为研究对象,应用野外样地调查法和直接收获法,根据滇中云南松林下植被层(包括灌木层、草本层和凋落

物层)及土壤层各组分碳含量的实测数据,研究布设等高反坡阶 8 a 后林下植被层及土壤层碳含量、生物量、碳储量及碳增量分配格局的变化,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 $24^{\circ}14'43''$ — $25^{\circ}12'48''$,东经 $102^{\circ}44'51''$ — $102^{\circ}48'37''$,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°C ,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^3 。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针叶林。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 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 样地的布设 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 月在云南松林的典型次生林中设置 6 个 $20\text{ m}\times 20\text{ m}$ 的标准样地(表 1),以确保样地之间有着相近的气候、土壤等环境条件,并作如下处理:1,2,3 样地为对照组,无人为

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,每两个等高反坡阶之间的垂直距离为 4 m。等高反坡阶剖面示意图见图 1,样地基本情况见表 1。

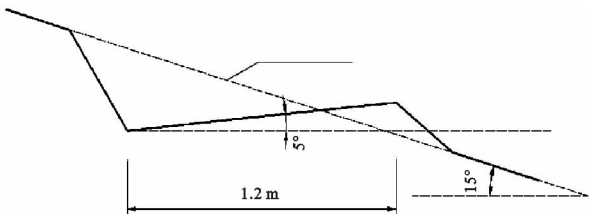


图 1 等高反坡阶剖面示意图

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 ⁻²)	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	2100	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:NE 表示北偏东。

1.2.2 林下植被层及土壤层样品的采集与测定 分别于 2009 年 11 月和 2017 年 11 月生长季结束后,在 6 个样地中分别设置 5 个 2 m×2 m 的灌木林样方和 5 个 1 m×1 m 的草本样方。记录灌木层的种类、主干高及其盖度;记录草本层的种类、密度和高度。将样方内所有灌木层或草本层植物全部收获,灌木层分根、枝、叶分别称鲜重,草本层分地上部分和地下部分分别称鲜重。林下植被层根系采用挖掘法,每 10 cm 为一层,灌木及草本分别挖至 70,40 cm^[17]。凋落物则采用五点取样法分别随机围取 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 3 层收集并称鲜重。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,计算鲜重/干重比,推算各部分干重生物量。烘干后的样品粉碎后过 100 目筛,用于分析碳含量。

在各标准调查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 cm³)分别在 0—10,10—20,20—30,30—50,50—70,70—100 cm 层系统地排列 5 个点取混合样约 500 g 土样装入布袋中,运回实验室风干待测。

以上植物和土壤样品均采用 TOC 分析仪法(TOC-L-CPH-SSM5000A 型)测定全碳含量(TC)^[18]。

1.2.3 林下植被层及土壤层碳储量和碳增量的计算 本研究中林下植被层及土壤层碳储量为 2017 年测定生态系统中林下植被层的碳储量,包括灌木层、草本层及凋落物层的碳储量;土壤层碳储量包括 0—10,10—20,20—30,30—50,50—70,70—100 cm 共 6 层的碳储量。林下植被层各部分的碳储量(t/hm²)由各部分的碳含量(%)与对应部分生物量(t/hm²)的乘积获得。林下植被层与土壤层碳增量分别由

2017 年的碳储量与 2009 年的碳储量差值获得。土壤层碳储量计算公式如下^[19]:

$$T_N = \sum C_N P_N D_N \tag{1}$$

式中: T_N 为 N 层土壤剖面深度内总土壤碳储量(g/cm³); C_N 为第 N 层中土壤碳含量(%); P_N 为第 N 层土壤容重(g/cm³); D_N 为 N 层剖面厚度(cm)。

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林下植被及凋落物层各组分碳含量、生物量、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下植被层及土壤层碳含量的影响

由表 2 可知,对照和布设等高反坡阶处理下云南松林灌木层、草本层、凋落物层及土壤层各组分碳含量变幅分别为 441.120~484.43,371.03~433.62,70.42~458.52,4.14~20.01 g/kg,各组分平均碳含量则分别为 449.10,402.43,259.14,8.72 g/kg。云南松林下植被灌木层叶、凋落物层已分解部分及土壤层各组分碳含量在布设等高反坡阶后与对照相比存在显著性差异($p<0.05$)。布设等高反坡阶后灌木层叶与凋落物层已分解部分的碳含量比对照高出 8.71%,11.51%,土壤层 0—10,10—20,20—30,30—50,50—70,70—100 cm 平均碳含量分别比对照高出 60%,78%,1.05%,0.64%,0.45%,0.22%。对照和布设等高反坡阶后各组分平均碳含量高低排列依次为:灌木层>草本层>凋落物层>土壤层。灌木层叶

分别比枝、根高出 6.26%,4.58%,草本层地上部分为地下部分的 1.16~1.17 倍,凋落物层已分解部分仅为未分解和半分解部分的 15.35%~18.35%,19.82%~21.97%。土壤层碳含量分布规律明显,即随着土层深度的增加土壤各层碳含量逐渐降低,70—100 cm 土层碳含量仅为 0—10 cm 的 25.00%~32.80%。

表 2 等高反坡阶下云南松林下植被层及土壤层碳含量特征 g/kg

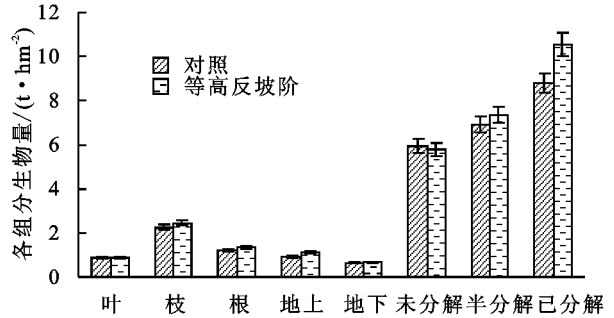
分层		采集器官	对照	等高反坡阶
林下植被层	灌木层	叶	445.62±68.57aA	484.43±57.86aB
		枝	431.41±9.30aA	443.79±12.82aA
		根	441.20±10.64aA	448.13±13.46aA
	草本层	地上	431.82±31.69aA	433.62±40.64aA
		地下	373.28±20.72bA	371.03±21.27bA
		未分解	458.52±29.83aA	427.83±38.52aA
	凋落物层	半分解	355.24±47.39bA	357.32±30.68bA
		已分解	70.42±4.13cA	78.50±2.34cB
		0—10 cm	12.54±1.83aA	20.01±4.63aB
		10—20 cm	7.34±1.12bA	13.04±0.73bB
土壤层		20—30 cm	5.82±1.24cA	11.84±3.61bcB
		30—50 cm	4.73±0.64cdA	7.73±0.32cB
		50—70 cm	4.92±0.48cdA	7.13±1.36cB
		70—100 cm	4.14±0.31dA	5.03±0.74dA

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($p<0.05$),下表同。

2.2 等高反坡阶对云南松林下植被层生物量的影响

云南松林下植被层各组分生物量如图 2 所示,不同处理下凋落物层的生物量(21.68~23.69 t/hm²)最高,其次是灌木层(4.32~4.68 t/hm²),最低的为草本层(1.59~1.80 t/hm²),分别占林下植被层总生物量的 78.54%~78.58%,15.51%~15.67%,5.75%~5.96%。灌木层各组分中灌木枝生物量(2.25~2.44 t/hm²)最高,约占本层生物量的 52.10%;其次为灌木根(1.22~1.34 t/hm²)、灌木叶(0.86~0.89 t/hm²);草本层地上生物量(0.94~1.13 t/hm²)高于地下部分(0.65~0.67 t/hm²);凋落物层中各组分表现为:已分解凋落物(8.81~10.55 t/hm²)生物量最高约占本层生物量的 42.58%,分别比半分解凋落物(6.92~7.36 t/hm²)、未分解凋落物(5.79~5.95 t/hm²)约高出 26.05%,39.12%。

等高反坡阶处理下灌木层、草本层、凋落物层的生物量分别比对照高出 8.17%,13.24%,9.29% ($p<0.05$),林下植被层各组分生物量基本均显著高于对照($p<0.05$),凋落物层中已分解凋落物比对照高出 19.67%,说明布设等高反坡阶后显著促进了云南松生态系统碳的积累。



注: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林下植被层生物量特征

2.3 等高反坡阶对云南松林下植被层及土壤层碳储量的影响

由表 3 可知,对照与等高反坡阶下林下植被层碳储量由高到低依次为凋落物层(5.81~5.94 t/hm²)、灌木层(1.89~2.11 t/hm²)、草本层(0.64~0.74 t/hm²),其中凋落物层、灌木层及草本层分别占据云南松林下植被层总碳储量的 67.50%~69.60%,22.66%~24.10%,7.76%~8.39%。等高反坡阶处理下的灌木层、草本层及凋落物层碳储量分别对照高出 11.64%,15.63%,2.24%,说明等高反坡阶显著提高了灌木层、草本层的碳储量($p<0.05$),其中各层最显著的为灌木的叶、枝,草本地上及已分解凋落物分别比对照增加了 13.16%,11.34%,22.50%,33.87% ($p<0.05$)。

土壤层各层碳储量与碳含量趋势基本一致,即随土层深度的增加土壤碳储量亦随之减少,0—10 cm 土层比 70—100 cm 土层的土壤碳储量高出 181.20%~277.49%。不同处理下的林下植被层与土壤层碳储量幅度范围分别为 8.34~8.79 t/hm²,87.63~132.09 t/hm²,土壤层碳储量显著高于林下植被层。等高反坡阶下土壤层碳储量为 132.09 t/hm²,与对照相比显著增加了 50.74% ($p<0.05$),尤其以 0—50 cm 的土层最为明显。0—10,10—20,20—30,30—50 cm 分别比对照高出 59.62%,83.59%,109.85%,52.16%。

2.4 布设等高反坡阶对云南松林下植被层及土壤层碳增量的影响

由表 4 可知,对照与等高反坡阶下云南松林碳增量集中表现在凋落物层和土壤层,凋落物层比灌木层、草本层分别高出 724.32%~795.50%,251.80%~285.25%;土壤层比灌木层、草本层分别高出 907.48%~981.32%,333.43%~361.48%。土壤层中表层碳增量最高,0—10 cm 土层的碳增量为 70—100 cm 土层的 281.20%~396.79%。

等高反坡阶显著提高了灌木层、草本层、凋落物和土壤层的碳增量,与对照相比分别提高 28.21%,27.17%,15.54%,34.92%,受等高反坡阶影响灌木

层中叶、枝及根的碳增量分别比对照高出 30.00%, 16.67%, 30.43%, 各器官碳增量表现为根>叶>枝, 根的碳增量分别比叶、枝高出 125.68%~131.04%, 285.11%~343.56%, 说明等高反坡阶对灌木层地下部分的影响显著高于地上部分。草本层的地上、地下分别比对照高出 27.12%, 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, 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%, 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, 10—20, 20—30, 30—50, 50—70, 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%, 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, 土层越深其碳增量受等高反坡阶影响越小。

表 3 等高反坡阶下云南松林下植被层及

凋落物层碳储量特征 t/hm ²			
分层	采集器官	对照	等高反坡阶
林下植被层	灌木层	叶	0.38±0.06aA
		枝	0.97±0.11cA
		根	0.54±0.07bA
	草本层	地上	0.40±0.05bA
		地下	0.24±0.03aA
	凋落物层	未分解	2.73±0.47aA
		半分解	2.46±0.39aA
		已分解	0.62±0.08bA
		0—10 cm	18.25±0.30aA
		10—20 cm	11.09±0.55bA
土壤层		20—30 cm	8.73±0.46cA
		30—50 cm	14.82±1.04dA
		50—70 cm	15.27±0.75dA
		70—100 cm	19.47±0.90aA
			20.15±0.93bA

2.5 布设等高反坡阶对云南松林下植被层及土壤层碳储量、碳增量分配特征的影响

由图 3 可知,不同处理的林下植被层碳储量和碳增量中凋落物层均占支配地位,其次为灌木层,草本层最小,其碳储量和碳增量在对照中分别占 69.66%, 72.93%, 在等高反坡阶中分别占 67.57%, 71.15%, 均高于 65%。灌木层在对照和等高反坡阶中分别占林下植被层总碳储量的 22.66%, 24.01%, 总碳增量的 8.14%, 8.63%, 而草本层在对照和等高反坡阶中分别占林下植被层总碳储量的 7.68%, 8.41%, 总碳增量的 18.93%, 20.22%。土壤层的碳储量和碳增量分配中均随土层深度加深而降低,其中 0—50 cm 土层的碳储量和碳增量在对照中分别占 60.36%, 60.30%, 在等高反坡阶中分别占 68.41%, 67.41%, 均高于 60%, 说明土

壤中的碳储量及碳增量大部分均集中在表层土壤,且受等高反坡阶影响显著,提高了其在土壤层碳储量及碳增量的比重。

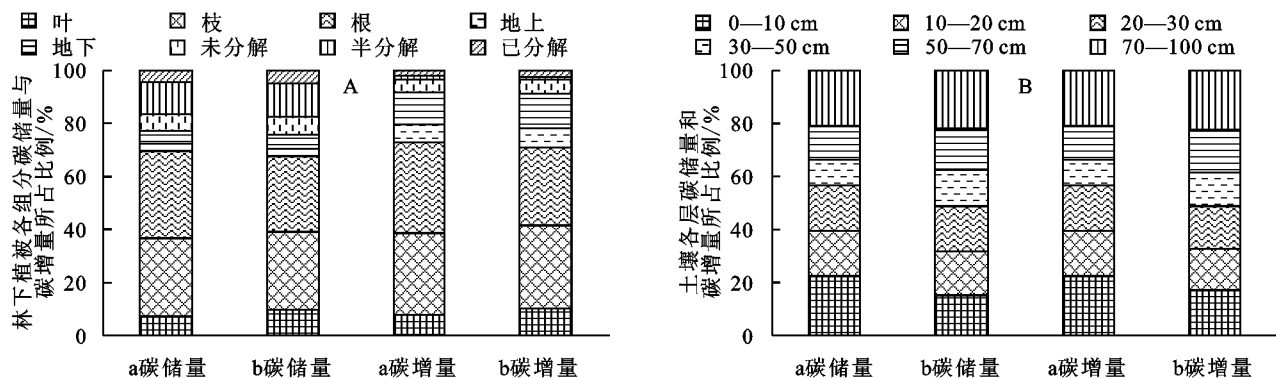
表 4 等高反坡阶下云南松林下植被层及土壤层碳增量特征

t/hm ²			
分层	采集器官	A 碳增量	B 碳增量
林下植被层	灌木层	叶	0.10±0.01bA
		枝	0.06±0.007aA
		根	0.23±0.03cA
	草本层	地上	0.59±0.07aA
		地下	0.33±0.02bA
	凋落物层	未分解	1.66±0.17bcA
		半分解	1.50±0.04bA
		已分解	0.38±0.02aA
		0—10 cm	0.83±0.13aA
		10—20 cm	0.50±0.02cA
土壤层		20—30 cm	0.40±0.01dA
		30—50 cm	0.67±0.02bA
		50—70 cm	0.69±0.01bA
		70—100 cm	0.89±0.03aA
			0.91±0.05bB

灌木根在对照和等高反坡阶中分别占林下植被层碳储量的 6.47%, 6.83%, 占林下植被层碳增量的 4.81%, 5.17%;凋落物层的未分解与半分解凋落物在不同处理下的林下植被层碳储量和碳增量中均占支配地位,其碳储量和碳增量在对照中分别占 32.73%, 29.50% 和 34.25%, 30.88%, 在等高反坡阶中分别占 28.21%, 29.92% 和 29.69%, 31.53%, 均高于 28%。而各组分中最小的草本地下部分在对照和等高反坡阶中仅分别占林下植被层碳储量的 2.88%, 2.84%, 占林下植被层碳增量的 6.76%, 7.21%。综上所述等高反坡阶显著提升了灌木根、凋落物半分解、已分解部分及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地下及近地部分的储量与碳增量分配。

3 讨论

植被及土壤碳含量作为目前估算森林碳储量的基本参数,国内外相关学者进行了大量研究,其中实测的植被典型器官、凋落物、土壤各层碳含量以及相关转换系数被集中研究来辅助碳储量计算^[20-22]。等高反坡阶作为干旱及雨量充沛地区有效的水土保持措施,虽未显著改变林下植被层中灌木及草本的碳含量,但显著增加了凋落物及土壤层的碳含量,尤其是已分解凋落物及表层土壤碳含量($p<0.05$)。说明植被各器官碳含量主要与植被类型、地域分布以及植被本身的生理特性有关,而等高反坡阶对凋落物层、土壤层碳含量影响显著。



注: A 图和 B 图分别代表对照和布设等高反坡阶处理下林下植被层碳储量和碳增量分配特征(a), 土壤层碳储量和碳增量分配特征(b); 图 A 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 B 中 0—100 cm 的分层属于土壤层。

图 3 等高反坡阶下云南松林下植被层及土壤层碳储量和碳增量分配特征

滇中云南松林下植被层的碳含量与其他地区不同类型生态系统的碳含量变幅存在一定差距, 如新疆阿尔泰地区的林下植被碳含量波动范围为 390~430 g/kg, 凋落物层为 500~510 g/kg^[23]。而本研究的凋落物层碳含量波动范围 70.4~458.5 g/kg, 天山地区的雪岭杉林下植被及凋落物层分别为 404~425.4, 431.8~425.8 g/kg^[10], 这是由于本研究对凋落物进行了分层处理, 采样时不仅取上层的未分解凋落物还对半分解及已分解凋落物进行了采集, 试验数据更为细致详实^[10,24]。布设等高反坡阶后灌木叶碳含量与对照相比产生显著性差异, 原因可能是布设等高反坡阶改变了地表结构, 灌木层的植物种类得以增多。已分解凋落物碳含量与对照相比差异显著, 则由于等高反坡阶作为水土保持措施增加了降雨截流, 使凋落物分解速率加快, 增加了已分解凋落物中腐殖质的含量。本研究中, 不同处理下, 灌木层、草本层和凋落物层平均碳含量差异性显著, 分别为 444, 409, 259 g/kg, 且均低于国际通用的灌木碳含量均值(450 g/kg)^[25]。

目前国内外研究中对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^[8,21], 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生态系统中林下植被的生物量。云南松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, 其林下植被层为生态系统碳储量的主要组成部分(约占 30%)^[25], 而林下植被的变化将影响云南整个森林生态系统的碳汇功能。本研究中云南松生态系统中林下植被层平均生物量为 28.88 t/hm², 高于黄土高原子午岭油松林中的林下植被层(9.11 t/hm²)^[26]。生物量较高的原因在于当地农民为满足经济及生活需求对云南松进行大面积采伐, 导致乔木层林分密度和林分郁闭度降低, 林下植被层得到充足的光照和养分, 从而增加林下植被层的生物量。同时, 等高反坡阶可有效地截留降雨和养分^[12-16], 提高土壤的水分、

养分含量促进植物生长而使其生物量增加, 也是林下植被层各组分生物量不同程度增加的主要原因。

云南松林中灌木层与草本层、凋落物层及土壤层碳储量均值分别为 2.70, 5.87, 109.86 t/hm², 其中凋落物层碳储量低于我国森林植被凋落物层碳储量均值(8.21 t/hm²)^[3], 林下植被层低于西藏林芝地区察隅中龄云南松林下植被层碳储量(5.73 t/hm²)^[27]。因此, 提高研究区云南松林林下植被层碳储量, 因地制宜制定有效森林管理措施这一问题亟待解决。而等高反坡阶下灌木叶、根、已分解凋落物及土壤层的碳储量显著高于对照, 原因在于布设等高反坡阶可改变研究区地表微地形, 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^[13]。另外, 云南松生态系统中林下植被层 8 年间等高反坡阶处理下碳增量与对照相比增加了 18.76%, 年均固碳增量 0.72 t/hm²; 土壤层碳增量增加了 34.92%, 年均固碳增量 0.67 t/hm², 说明等高反坡阶显著增强了云南松生态系统林下植被和土壤层的碳汇潜力。因此, 人工造林时应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。

可见, 在滇中昆明松华坝地区布设等高反坡阶后, 云南松生态系统中林下植被及土壤层碳储量和碳增量均得到了有效提高, 促进了林下植被尤其是地下部分的生长, 从而减缓了土壤水分、养分流失以及土壤结构的破坏, 提升了整个生态系统的固碳能力。本试验区地处亚热带和暖温带混合型气候区, 为典型红壤坡地侵蚀区, 由于农牧民日常生活, 导致植被破坏较为严重, 影响了植被的恢复过程。因此, 为提高试验区林下植被恢复速率和碳储量, 一方面要合理控制林分密度, 适度的采光条件可以有效增加林下植被层碳储量的增长, 减少人为干扰对林下植被和土壤碳库的积累, 防止碳源—碳汇的转变; 另一方面

要在山地适度增设等高反坡阶措施,可显著增加林下植被种类和碳储量,提高土壤碳储量,增加碳储量的累积速率。同时,在全球气候变化的影响下,对等高反坡阶下云南松森林生态系统林下植被和土壤碳储量、碳增量、固碳速率以及分解作用中 CO_2 释放量等均需要更加系统地开展研究,为评价等高反坡阶对该地区森林生态系统碳汇能力的影响进一步提供科学依据。

4 结论

(1) 布设等高反坡阶后与对照相比有效提升了灌木叶、已分解凋落物及土壤层的碳含量,对照和布设等高反坡阶处理下各层碳含量由大到小依次为:灌木层(449.1 g/kg)>草本层(402.4 g/kg)>凋落物层(259.1 g/kg)>土壤层(8.7 g/kg);

(2) 等高反坡阶处理下灌木层、草本层、凋落物层的生物量分别比对照高出 8.17% 、 13.24% 、 9.29% ,林下植被层各组分生物量基本均显著高于对照,凋落物层中已分解凋落物比对照高出 19.67% ;

(3) 等高反坡阶处理下,灌木层(高 11.64%)、草本层(高 15.63%)与土壤层(高 50.74%)碳储量显著高于对照,灌木层、草本层、凋落物及土壤层碳增量与对照相比则分别增加了 28.21% 、 27.17% 、 15.54% 、 34.92% 。因此,等高反坡阶可作为增强云南松森林生态系统林下植被和土壤层碳汇潜力的有效措施。

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] Piao S, Fang J, Ciais P, et al. The carbon balance of terrestrial ecosystems in China[J]. *Nature*, 2010,458(7241):1009-1013.
- [3] 周玉荣,于振良,赵士洞.我国主要森林生态系统碳贮量与碳平衡[J]. *植物生态学报*, 2000,24(5):518-522.
- [4] Houghton R A. Aboveground forest biomass and the global carbon balance [J]. *Global Change Biology*, 2005,11(6):945-958.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.

- [9] 余蓉,项文化,宁晨,等.长沙市4种人工林生态系统碳储量与分布特征[J]. *生态学报*, 2016,36(12):3500-3509.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 陈敏全,王克勤,等.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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] ZHANG Bowen. Plant root research methods and trends [J]. *Agricultural Science & Technology*, 2017,18(12):2295-2298,2302.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 宋娅丽,韩海荣,康峰峰.山西太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.
- [21] Pablo P, Yamina R, Brenton L, et al. Modelling soil carbon content in south patagonia and evaluating changes according to climate, vegetation, desertification and grazing[J]. *Sustainability*, 2018,10(2). DOI:10.3390/su10020438.
- [22] J. A. B. Ordóñez, B. H. J. de Jong, F. García-Oliva, 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] 郑拴丽,许文强,杨辽,等.新疆阿尔泰山森林生态系统碳密度与碳储量估算[J]. *自然资源学报*, 2016,31(9):1553-1563.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 杨阳,冉飞,王根绪,等.西藏高原云南松生物量模型及碳储量[J]. *生态学杂志*, 2013,32(7):1674-1682.