

滇中亚高山 5 种典型森林乔木层生物量及 碳储量分配格局

侯芳^{1,2}, 王克勤^{1,2}, 宋娅丽^{1,2}, 杨棋茗¹, 陈登煜¹

(1. 西南林业大学 生态与水土保持学院, 昆明 650224;

2. 云南玉溪森林生态系统国家定位观测研究站, 云南 新平 653400)

摘要:通过标准地调查和生物量实测相结合的方法,对滇中亚高山 5 种典型森林——华山松(HSS)、云南松(YNS)、滇油杉(DYS)、高山栎(GSL)和常绿阔叶林(CL)乔木层植物各器官碳含量、生物量、碳储量及分配特征进行了比较研究。结果表明:HSS, YNS, DYS, GSL, CL 各器官碳含量变幅分别为(471.49±37.01)~(512.32±6.45) g/kg, (465.13±7.44)~(499.80±17.58) g/kg, (480.12±15.67)~(540.09±33.19) g/kg, (456.13±66.35)~(516.02±41.53) g/kg 和(504.28±59.65)~(576.10±37.33) g/kg。CL 各器官的碳含量均值为其他各森林类型的 1.07~1.14 倍。HSS 和 CL 生物量高于 5 种典型森林类型的生物量均值[(191.264±12.92) t/hm²], YNS, DYS 和 GSL 生物量低于生物量均值的 203.06%, 1 928.25% 和 1 744.40%。不同森林类型各器官生物量均值总体上表现为干>枝>根>叶>皮, 树干生物量均值分别为枝、根、叶和皮的 6.40, 2.38, 8.18, 3.53 倍。不同森林类型各器官碳储量与生物量呈正比例关系, 碳储量大小表现为 HSS>CL>YNS>DYS>GSL。综上, 华山松、云南松和常绿阔叶林乔木层植物碳储量较高, 固碳能力较强, 应加大保护力度, 提高林分质量增加林分碳密度, 制定出切实可行的森林管理措施, 更好地发挥其在应对气候变化中的碳汇功能。

关键词:滇中亚高山; 乔木层; 生物量; 碳储量

中图分类号:S718.5

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2018)06-0029-07

Biomass of Tree Layer and Distribution of Carbon Storage in Five Typical Forest Types in Subalpine of Middle of Yunnan Province

HOU Fang^{1,2}, WANG Keqin^{1,2}, SONG Yali^{1,2}, YANG Qiming¹, CHEN Dengyu¹

(1. College of Ecology and Soil and Water Conservation, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China; 2. National Station for Forest Ecosystem in Yuxi, Xinping, Yunnan 653400, China)

Abstract: Carbon contents, biomass, carbon storage of different organs including leaf, branch, trunk, bark and root, and their distributions in *Pinus armandii* (HSS), *Pinus yunnanensis* (YNS), *Keteleeria evelyniana* (DYS), *Quercus semicarpifolia* (GSL) and Evergreen broad-leaf (CL) stands in subalpine of the middle of Yunnan Province were studied using standard plot sampling combined with biomass measurements. The results showed that the carbon contents of different organs in HSS, YNS, DYS, GSL, CL were (471.49±37.01)~(512.32±6.45) g/kg, (465.13±7.44)~(499.80±17.58) g/kg, (480.12±15.67)~(540.09±33.19) g/kg, (456.13±66.35)~(516.02±41.53) g/kg, and 504.28±59.65~576.10±37.33 g/kg, respectively; the carbon content of CL was 1.07~1.14 times higher than the other forests. Biomass of HSS and CL was higher than the average biomass of five forest types [(191.264±12.92) t/hm²], the biomass of YNS, DYS and GSL was 203.06%, 1 928.25% and 1 744.40% lower than the average; the average biomass of different organs in five forest types decreased in the order: trunk>branch>root>leaf>bark, the average biomass of trunks was 6.40, 2.38, 8.18 and 3.53 times of branch, root, leaf and bark, respectively; carbon storage of different organs in 5 forest types was proportional to biomass, which decreased in the order: HSS>CL>YNS>DYS>GSL. In conclusion, carbon storage of HSS, YNS and CL was higher, which had a

收稿日期:2018-01-03

修回日期:2018-01-25

资助项目: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(111443);云南省高校优势特色重点学科(生态学)建设项目(050005113111);国家林业局生态学重点学科

第一作者:侯芳(1996—),女,山西大同人,硕士,研究方向为森林生态系统碳储量。E-mail:CHNhoufang@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

great contribution to vegetation carbon in Yunnan Province. Carbon sequestration abilities of HSS, YNS and CL were stronger than the others. We should increase protection and improve forest quality by increasing forest quality and carbon density, formulate feasible forest management measures, and make them play better roles in carbon sinks in response to climate change.

Keywords: subalpine of middle of Yunnan Province; tree layer; biomass; carbon storage

森林是陆地生态系统的重要碳库,森林植被碳储量占陆地植被碳储量的 76%~98%,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^[1-2]。森林植被碳储量动态变化与森林年龄结构、土壤条件、面积变化、森林演替、人类经营活动以及当地环境变化等因素密切相关,是评价森林生态系统可持续发展的重要指标。因此,研究森林植被碳源、碳汇变化不仅对估算森林碳收支、评估森林在减缓大气 CO₂ 浓度上升、制定应对气候变化管理政策等方面有重要意义,而且对森林植被恢复与重建也有现实的指导作用^[3]。过去 10 年,我国不少学者基于国家尺度或省域尺度对森林生态系统进行了研究,并取得了显著的成就,研究集中于不同地区不同森林类型的碳储量、碳固定及其与林龄、森林结构、管理措施和生境条件的关系等方面^[4-8]。

然而,由于研究对象的地域差异、采用的数据来源与估算方法的差异,导致森林碳储量估算结果存在较大的不确定性。同时,当前研究通常采用固定的植被含碳量转换因子(0.50 或 0.45)和生物量来计算碳储量^[5,9]。但由于不同林型、同一树种的不同器官、同一林型的不同生长阶段、不同起源的同一树种,差异均可能较大,从而对森林植被碳储量的估算产生不同程度的影响。更精确的估算应该是通过实地采集样品来测定不同植被或不同器官碳含量来计算碳储量,从而使估算结果更加准确。因此,开展更多区域尺度的基于样地调查和植物器官碳含量的研究来获得更加精确的参数和数据,可以减小碳储量估算结果的不确定性。同时,区域尺度不同类型的森林生态系统的碳储量研究仍需要不断开展,以丰富世界森林生态系统案例研究。

滇中亚高山磨盘山地处云贵高原、横断山地和青藏高原南缘的地理结合部,自然条件独特,境内由山峰和支脉构成窄长和深度切划的中山山地地貌,其中典型森林生态系统具有涵养水源、保持水土和调节全球气候变化的作用。本文以滇中亚高山典型森林生态系统为研究对象,应用野外样地调查方法,根据磨盘山典型植被类型碳含量的实测数据和生物量模型,估算华山松林(*Pinus armandii* forest)、云南松林(*Pinus yunnanensis* forest)、滇油杉林(*Keteleeria evelyniana* forest)、高山栎林(*Quercu semicarpifo-*

lia forest)和常绿阔叶林(Evergreen broad-leaf forest)生态系统乔木层植物生物量和碳储量,分析碳储量分配格局及其影响因素,以期为提高国家尺度的森林碳汇估算精度和当地森林碳汇估算研究提供基础数据,对亚热带地区的森林资源和可持续经营管理具有一定的现实科学意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于云南省玉溪市新平县森林生态系统国家定位观测研究站(23°46′18″—23°54′34″N, 101°16′06″—101°16′12″E)。土壤以第三纪古红土发育的山地红壤和玄武岩红壤为主,高海拔地区有黄棕壤分布。土壤厚度以中厚土壤层为主,局部为薄土层。磨盘山国家森林公园地处低纬度高原,是云南亚热带北部与亚热带南部的气候过渡地区,又有着典型的山地气候特点。磨盘山海拔高差大(1 260.0~2 614.4 m),气候垂直变化明显,由山底沟谷的亚热带气候向山顶的北亚热带气候过渡,山顶中段的高山草甸,则属中亚热带气候。年平均气温 15℃,年平均雨量为 1 050 mm。极端最高气温 33.0℃,极端最低气温 -2.2℃,全年日照时数 2 380 h。磨盘山地区是我国亚热带地区以云南特有植物种为优势的中山半湿性常绿阔叶林为主的重要原始森林区,分布有高等植物树蕨(*Arthropteris palisotii*)、梭罗树(*Reevesia pubescens*)、普洱茶(*Camellia assamica*)、楠木(*Phoebe chinensis* Chun)等 98 科 137 属 324 种。随海拔的升高,磨盘山森林植被呈现出明显垂直分布特征,主要分布的森林植被类型有亚热带常绿阔叶林、亚热带中山针阔混交林、针叶林和高山矮林等。

1.2 样地调查与室内分析

1.2.1 样地的布设 本研究选择 5 种典型森林作为研究对象,分别为华山松林、云南松林、滇油杉林、高山栎林和常绿阔叶林,各林分的具体情况见表 1。通过实地踏查,2017 年 7 月在研究区采用随机方法对样地进行设置,每个林分设置 3 个重复样地,面积为 20 m×20 m,共 15 个样地。每个重复样地之间在 20 km 的范围内,以确保样地之间有着相近的气候、土壤等环境条件。

表 1 不同森林类型的基本特征

森林类型	样地	海拔/ m	坡向	林龄/ a	郁闭度/ %	密度/ (株·hm ⁻²)	平均 胸径/cm	平均 树高/m
华山松林(HSS)	1	2119	NE10°	19	60	3578	12.3	10.9
	2	2178	NE2°	18	65	3387	11.0	10.3
	3	2156	NE16°	19	73	3433	12.1	9.9
云南松林(YNS)	1	2193	NW52°	22	73	1428	10.2	8.4
	2	2158	NW60°	24	82	1389	12.5	11.0
	3	2236	NW58°	22	75	1495	11.0	9.0
滇油杉林(DYS)	1	2288	NW12°	18	65	285	11.3	12.1
	2	2375	NW10°	19	70	314	11.0	15.0
	3	2292	NW8°	18	61	301	12.1	14.0
高山栎林(GSL)	1	2208	NE53°	14	92	1037	9.0	4.5
	2	2373	NE42°	15	88	1131	10.0	4.0
	3	2281	NE56°	15	90	1072	10.6	4.0
常绿阔叶林(CL)	1	2258	NW23°	16	85	4614	9.5	9.0
	2	2193	NW35°	14	90	4742	9.0	9.2
	3	2236	NW18°	16	87	4528	8.9	8.9

注:NE 代表东北方向,NW 代表西北方向。

1.2.2 样地植被生物量及碳含量测定 参照国家林业局森林资源清查的操作规范,以森林中胸径(DBH)≥5 cm 的林木作为起测径阶,对标准样地内所有 DBH≥5 cm 的林木进行每木检尺,记录物种名、胸径和树高。分别根据付梦瑶^[10]、刘林森^[11]、李久林^[12]、刘兴良^[13]和沈燕^[14]等所建立的生物量模型直接估算华山松、云南松、滇油杉、高山栎和常绿阔叶林乔木层植物不同器官(叶、枝、干、皮和根)的生物量。采集每个林分内各器官样品,带回实验室,经烘干、粉碎并过 100 目筛后,采用重铬酸钾—外加热硫酸氧化法测定样品的有机碳含量。

1.2.3 植被碳储量的计算及数据处理 本研究中森林植被碳储量仅指生态系统中乔木层的活生物量,未包括林下灌木层、草本层、枯落物层碳储量。根据各植被类型生物量模型可计算得到所有调查样地内乔木层植被各器官生物量(t),将其乘以各器官的碳含量(g/kg)得到乔木层植被各器官碳储量(t/hm²),各器官累计相加得到乔木层植被碳储量(t/hm²)。

采用 Excel 2010 和 SPSS 20.0 统计分析软件进行图表处理和数据处理分析,采用单因素方差分析(One-Way ANOVA)检验森林类型与各组分碳储量的差异性,并用最小显著差异法(LSD)进行多重比较,显著性差异检验在 0.05 水平。

2 结果与分析

2.1 滇中亚高山典型森林碳含量特征

如表 2 所示,不同森林类型 HSS,YNS,DYS,GSL,CL 各器官碳含量变幅分别为(471.49±37.01)~(512.32±6.45) g/kg,(465.13±7.44)~(499.80±

17.58) g/kg,(480.12±15.67)~(540.09±33.19) g/kg,(456.13±66.35)~(516.02±41.53) g/kg 和(504.28±59.65)~(576.10±37.33) g/kg。不同森林类型各器官碳含量变幅与其他地区不同树种碳含量变化基本一致,如山西太岳山不同林龄油松林碳含量波动范围为 411.2~556.0 g/kg^[8]、河南洛宁县刺槐人工林为 436.6~495.8 g/kg^[15]、川西苦竹和桦木分别为 348.5~518.6 g/kg 和 451.9~513.7 g/kg^[4]。不同森林类型各器官的碳含量不同,碳含量均值高低排列依次为:叶>根>枝>皮>干。这与湖南会同杉木各器官排列顺序一致^[16],与山西太岳山油松林(枝>干>皮>根>果)^[8]、川西桦木碳含量(枝>干>叶>根)^[4]、广西哨平试验场红锥林(皮>干>叶>枝>根)和杉木林(皮>叶>干>枝>根)^[7]分布略有不同。不同类型森林各器官碳含量变化不大,除叶和根明显较高外,其他各部位没有明显差异。总体来看,CL 各器官的碳含量高于其他森林类型,为其他各森林类型的 1.07~1.14 倍,各森林类型与其他林木碳含量变化规律基本一致。

2.2 滇中亚高山典型森林生物量特征

由表 3 可以看出,不同森林类型生物量随林型的不同而差异较大,HSS 的生物量远高于其他 4 种林型,分别为 YNS,DYS,GSL 和 CL 的 8.44,55.78,50.72,1.51 倍。而 HSS 和 CL 生物量高于滇中亚高山 5 种典型森林类型的生物量均值[(191.264±12.920 t/hm²),YNS,DYS 和 GSL 生物量低于生物量均值的 203.06%,1 928.25%和 1 744.40%。不同森林类型各器官生物量均值总体上表现为干>枝>根>叶>皮,树干生物量均值分别为枝、根、叶和皮的 6.40,

2.38,8.18,3.53 倍。HSS,YNS,DYS,GSL,CL 地上部分总生物量(干、枝、叶和皮)分别占总生物量的 87.53%,67.56%,85.79%,73.48%和 86.58%,树干生物量分别为地上部分生物量的 51.40%,67.47%,84.18%,69.16%和 68.14%,说明树干极易限制地

上部分生物量,这种限制在 DYS 中尤为显著。地上部分生物量的绝对值以 HSS>CL>YNS>DYS>GSL,反映了针、阔叶林树种间的差异。根系生物量占各森林总生物量的 12.47%~32.44%,地上部分生物量同样不能忽略。

表 2 不同森林类型各器官碳含量

g/kg

项目	HSS	YNS	DYS	GSL	CL
叶	482.41±33.05aA	485.65±33.39aA	535.98±41.10bA	516.02±41.53cA	576.10±37.33dA
枝	471.49±37.01aA	493.42±37.38bA	504.03±56.21cB	507.98±26.48cA	566.51±41.79dA
干	490.13±17.40aA	499.80±17.58aA	480.12±15.67bC	456.13±66.35cB	504.28±59.65aB
皮	512.32±6.45bA	477.64±6.72bB	512.24±1.60aB	488.05±11.72bC	542.32±37.51cB
根	495.40±7.36aA	465.13±7.44bB	540.09±33.19cA	508.21±53.74aA	566.47±48.31dA

注:同行不同小写字母表示不同森林类型同一器官间碳含量差异显著($p<0.05$),同列不同大写字母表示相同森林类型不同器官间碳含量差异显著($p<0.05$),下表同。

表 3 不同森林类型各器官生物量

t/hm²

项目	HSS	YNS	DYS	GSL	CL
叶	56.27±0.98aA	6.57±0.19bA	0.37±0.02cA	1.03±0.59cA	11.19±1.11dA
枝	140.09±3.91aB	6.31±0.95bA	0.88±0.09cB	0.89±0.02cA	54.53±4.41dB
干	236.67±9.00aC	28.77±3.09bB	6.81±0.20cC	5.27±0.24cB	204.95±8.16aC
皮	27.38±1.19aD	0.99±0.20bC	0.03±0.16bA	0.43±0.03bC	30.12±2.35aD
根	65.58±2.95aA	20.47±1.98bD	1.34±0.08cB	2.75±0.15cD	46.62±1.33dB
合计	526.00±18.02aE	63.11±12.41bE	9.43±1.28cC	10.37±2.53cE	347.41±30.36dE

2.3 滇中亚高山典型森林碳储量

由表 4 可以看出,滇中亚高山 5 种典型森林碳储量为(5.00±1.21)~(255.71±9.95) t/hm²。不同森林类型各器官碳储量与生物量呈正比例关系,与生物量趋势相同,碳储量大小表现为 HSS>CL>YNS>DYS>GSL。不同林型碳储量和同一器官在不同林型间的碳储量差异显著($p<0.05$)。其中,变异偏大的是 YNS 的叶(变异系数为 0.40)和 GSL 的根(变异系数为

0.51),变异较小的是滇油杉的枝(变异系数为 0.02)。地上部分中树干与其他器官相比碳储量最高,为重要的碳库,HSS,YNS,DYS,GSL 和 CL 的树干碳储量分别占总碳储量的 45.32%,46.89%,48.22%,48.20%和 56.35%。其次碳储量较高的为枝和根,两者相加占总碳储量38.53%,41.18%,35.58%,37.00%和 31.24%。根系部分除 DYS 和 GSL 差异不显著外,其他各林型差异性显著($p<0.05$)。

表 4 不同森林类型各器官碳储量

t/hm²

项目	HSS	YNS	DYS	GSL	CL
叶	27.14±1.27aA	3.19±1.28bA	0.16±0.06cA	0.53±0.10dA	6.45±1.43aA
枝	66.05±3.20aB	3.11±1.23bA	1.21±0.02cB	0.45±0.07dA	30.89±3.62eB
干	115.88±3.28aC	14.38±1.31bB	3.93±1.10cC	2.41±0.32cB	103.36±13.70dC
皮	14.03±0.98aA	0.47±0.09bC	1.16±0.03cB	0.21±0.01bC	16.34±2.11dD
根	32.49±1.22aD	9.52±1.23bD	1.69±0.26cB	1.40±0.71cD	26.41±2.38dB
合计	255.71±9.95aE	30.67±5.14bE	8.15±1.47cD	5.00±1.21dE	183.44±23.24eE

2.4 滇中亚高山典型森林分配特征

由图 1 可以看出,不同森林类型各器官中,树干碳储量最高,其次是枝、根,最小的是叶和皮。树干在不同森林类型碳储量中占支配地位,在 HSS,YNS,DYS,GSL 和 CL 中所占比例分别为 44.99%,45.59%,72.19%,50.82%和 58.99%,均高于 40%。枝、根分别占总碳储量的 8.58%~26.63%和 12.47%~32.44%,树叶和树皮仅占 3.22%~10.70%和 0.29%~8.67%。除树干外,地上部分与地下部分碳分配之比达 0.71~

3.18。其中,HSS 树枝所占比例较大,可能是由于该树种枝中含有较多的木质素,从而揭示了 HSS 的枝相对于其他器官在碳储备方面具有优势^[6];YNS 的林龄相对较大导致其根系比例偏高;DYS 由于其自身生长特点,树干通直高大导致其树干占比较大;GSL 平均郁闭度高于其他林型(达 90%)导致了其树叶的比例偏大;CL 树干的碳分配系数是其他林型的 1.17~1.21 倍,导致该林分碳储量占比达总量的一半以上。

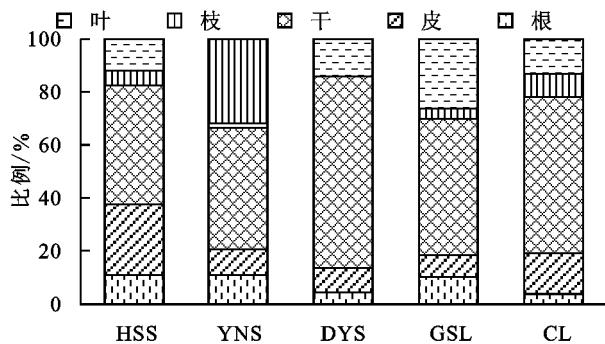


图1 不同森林类型各器官碳储量分配特征

3 讨论与结论

3.1 滇中亚高山典型森林碳含量

植被的碳含量是估算森林碳储量必须的基本参数^[17]。本研究中19年生华山松、23年生云南松、18年生滇油杉、15年生高山栎和15年生常绿阔叶林各器官碳含量的均值分别为490.35, 484.33, 514.49, 495.28, 551.14 g/kg, 其中滇油杉和常绿阔叶林高于国际通用的树木碳含量均值(500 g/kg)及亚热带17种树种各器官的碳含量均值(504 g/kg)^[18], 华山松、云南松和高山栎的碳含量均值均高于6种热带、亚热带阔叶树种(460.23 g/kg)^[19]。可见, 同一气候类型下, 不同树种各器官碳含量大小因树种不同而存在差异, 林木的碳含量也是研究碳储量的重要参数。另外, 同一森林类型的不同器官碳含量差异显著($p < 0.05$), 不同森林类型之间各器官碳含量的排列顺序也不尽相同。因此, 树种是影响各器官碳含量的重要因素之一, 这可能与植被类型、地域分布以及植被本身的生理特性有关。实测5种典型植被类型各器官的碳含量结果与常用转换系数也存在差异, 为了科学准确计算森林碳储量, 分区域分林种实测碳含量使得结果更为准确, 具有更高的参考价值。

3.2 滇中亚高山典型森林生物量

生物量是森林生态系统研究碳储量和碳平衡的基础, 也是最基本的数量特征之一。目前生物量测定方法中多采用直接收获法和相对生长法, 前者由于受到样地面积、树种和立地条件以及森林清查资料的限制, 对地形、植被扰动和破坏较大, 精度较低; 后者又称为生物量模型法, 简单易行、可推算大尺度森林碳储量, 不随时段不同而发生变化, 估测精度较高, 目前使用较为普遍。本研究同样采用生物量模型法对不同森林类型生物量进行有效评估。研究表明, 同种森林类型生物量往往随着林龄的增加而迅速增加^[8]。但本研究由于林分类型差异, 生物量结果并不随着林龄的增大而增加, 加之植被类型、植株大小、地域分布、气候及立地条件均会影响森林生物量, 导致滇中亚高山5种典型森林碳储量差异显著。

本研究中19年生华山松生物量最高, 为 $(526.00 \pm 18.02) \text{ t/hm}^2$, 较云南松、滇油杉、高山栎和常绿阔叶林高出1.51~55.78倍, 高于中国东部亚热带和温带地区的马尾松、华山松、油松、红松和樟子松生物量 $(65 \sim 200 \text{ t/hm}^2)$ ^[20]以及秦岭中段华山松林现存生物量 (79.45 t/hm^2) ^[6]。其原因在于云南省磨盘山处于滇中高原低纬度高海拔地区, 降雨量和日温差均较大, 华山松生长适宜, 生态功能较强, 加之园区内定期进行人工抚育使其生物量提高。

云南松为云南分布最广的森林类型, 因其生长迅速、适应性强、耐干旱瘠薄, 碳储量在针叶林碳储量中比例最高(约占70%)^[21]。但本研究中23年生云南松的生物量仅为 $(63.11 \pm 12.41) \text{ t/hm}^2$, 这与滇西北地区云南松林的生物量均值一致^[22], 但低于广西百色23年生云南松 (127.75 t/hm^2) ^[23]。生物量较低是由于20世纪80—90年代森工企业对当地云南松进行大面积采伐使其遭到破坏, 同时现有的云南松大多是退化云南松林, 采伐后环境质量进一步恶化, 更新难度加大。

滇油杉在云南省西北部至中部均有分布, 本研究中碳含量较高, 单株生物量可达到54.29 kg, 但因其耐寒耐旱能力相对较弱, 宜生长在土壤深厚湿润的地带, 加之人为破坏严重, 林分密度较低 (300 株/hm^2) , 仅为其他林分密度的6.48%~27.78%, 其生物量 $[(9.43 \pm 1.28) \text{ t/hm}^2]$ 分别为华山松、云南松、高山栎和常绿阔叶林的1.79%, 14.94%, 90.94%和2.71%, 低于贵州青岩20年生油杉 (52.58 t/hm^2) ^[12]、大岗山16年生杉木林 (148.30 t/hm^2) ^[24]和长沙市西区14年生杉木林 (100.58 t/hm^2) ^[17]。

高山栎抗干扰能力强、具备旺盛的萌蘖能力, 本研究中平均胸径9.87 cm, 而树高仅有4.17 m, 这是由于在特定海拔 $(2\ 208 \sim 2\ 373 \text{ m})$ 和气候(中亚热带气候)条件下, 受到常年强风、低温和土壤瘠薄的影响, 形成本地特有的山顶矮林, 生物量仅高于滇油杉, 其生理特性有待于进一步研究。刘兴良等^[25]研究的卧龙川滇高山栎仅地上部分生物量 (27.56 t/hm^2) 就大于本研究区, 原因是此地林木位于卧龙巴郎山阳坡, 下接河谷, 上接高山草甸, 具较好的水热条件。

滇中亚热带常绿阔叶林(15年生)碳含量最高 $[(551.14 \pm 42.92) \text{ g/kg}]$, 该类型以中山半湿性常绿阔叶林为主, 由于其结构复杂、物种丰富, 生物量 $[(347.41 \pm 30.36) \text{ t/hm}^2]$ 均高于云南松 $[(63.11 \pm 12.41) \text{ t/hm}^2]$ 、滇油杉 $[(9.43 \pm 1.28) \text{ t/hm}^2]$ 和高山栎 $[(10.37 \pm 2.53) \text{ t/hm}^2]$, 以及浙江天童52年生木荷—米槠林 (147.3 t/hm^2) ^[26]和美国南卡罗莱纳州60年生月桂叶栎林 (217.6 t/hm^2) ^[27], 略低于日本水俣65年生生长尾桫欏 (378.6 t/hm^2) ^[28]和新西兰尼尔森假山毛榉

成熟林(585.4 t/hm²)^[29]。说明滇中亚高山常绿阔叶林与相对成熟的林分相比较具有较高的生物量,同时由于其物种库丰富,矿质养分充足,使得其在生物量和碳储量的积累上蕴藏着巨大的潜力。

3.3 滇中亚高山典型森林碳储量及其分配特征

研究表明,乔木层碳储量在森林生态系统植被碳储量中所占比例远远高于灌木层、草本层、凋落物层之和,如广西凭祥市哨平试验场的南亚热带红锥林、杉木林、混交林乔木层分别占植被总碳储量的 97.25%, 88.06%, 92.37%^[7],长沙市杨树林、杉木林、毛竹林和马尾松林乔木层分别占 89.71%, 80.04%, 98.34% 和 89.62%^[17],四川阿坝藏族羌族自治州毕棚沟自然保护区岷江冷杉林、粗枝云杉人工林乔木层分别占 83.34% 和 79.08%^[30]。因此虽然本研究并未涉及灌木层、草本层、枯落物层碳储量,但使用较为科学的生物量模型法获得乔木层碳储量也同样能够得到与其他地区相同植被类型乔木部分相比较的预期结果。但值得指出的是,林下植被层是森林生态系统中最重要层次之一,在维护森林生态系统生物多样性、群落稳定性、群落演替动态以及维持森林生态系统的可持续发展方面起到了不可替代的作用,其碳储量仍需进一步研究。

普遍认为森林乔木层植被碳储量表现为随林龄增加呈二次曲线增长的趋势^[31],但本研究林分差异较大,还受到森林组成、林分密度、林分起源、地域分布、气候、光照环境、水分、土壤肥力、立地条件以及森林经营活动的影响,不同林龄的不同林分随着林龄增加并未呈现显著增加的趋势。本研究发现,不同林型乔木层碳储量变化依次为华山松>常绿阔叶林>云南松>滇油杉>高山栎,碳储量均值为(61.92±8.01) t/hm²,在我国森林植被乔木层碳储量均值之上(57.07 t/hm²)^[32]。不同林型各器官碳储量均值表现为干>枝>根>叶>皮,干、枝和根所占比例较高是由于其具有明显的净碳积累效应,树干在乔木层各器官碳累积中占有绝对优势^[30],而叶和皮则在积累的同时因衰老组织脱落具有较强的碳循环能力。

在 21 世纪 60 年代左右,我国发生了 3 年自然灾害,森林植被遭到破坏,西南地区的森林碳密度在 1973 年后大幅度下降^[33]。2000 年,新平县实施“天保工程”后,区域天然林质量和碳储量均明显提高。

本研究中 19 年生华山松林碳储量为(255.71±9.95) t/hm²,远高于贵州开阳县 30 年生华山松(17.36 t/hm²)^[34],表明华山松在 20 a 左右生长较快,生物量的快速生长迅速增加了植被层生物量碳的积累^[35]。

云南松分布面积大,是云南省主要的森林碳库之一,其变化将影响云南整个森林的碳汇功能。本文的 23 年生云南松乔木层碳储量为(30.67±5.14) t/hm²,低于西藏林

芝地区察隅中林龄云南松[(67.63±19.06) t/hm²]^[36],而高于四川省中林龄云南松碳储量(19.29 t/hm²)^[37]。

滇油杉乔木层碳储量[(8.15±1.47) t/hm²]远低于广西中山区铁坚油杉乔木层的碳储量(67.54 t/hm²)^[38]。高山栎乔木层碳储量最小,为(5.00±1.21) t/hm²,仅相当于华山松和常绿阔叶林的 1.96% 和 2.73%,远低于黄土高原子午岭辽东栎林乔木层碳储量(53.45 t/hm²)^[39]。原因主要是由于高山栎自然稀疏严重,林分密度较小(1 080 株/hm²),碳含量较低(495.28 g/kg),生物量较小[(10.37±2.53) t/hm²]共同导致了其碳储量的积累较小。

本研究中常绿阔叶林属于典型滇中高原中山湿性常绿阔叶林,植被萌蘖能力强,乔木层碳储量为(183.44±23.24) t/hm²,高于江西大岗山常绿阔叶林(96.13 t/hm²)^[40]、四川老君山常绿阔叶林(139.67 t/hm²)^[41]、湖南鹰嘴界自然保护区常绿阔叶林(155.53 t/hm²)^[42]、广州常绿阔叶林(136.40 t/hm²)^[43],但均明显高于我国森林植被乔木层碳储量均值(57.07 t/hm²)^[32]。

可见,磨盘山国家森林定位研究站 5 种典型森林类型中,华山松林和云南松的乔木层碳含量虽低于滇油杉林和高山栎林,但两者的生物量偏高,而常绿阔叶林碳含量、生物量均较高,导致三者碳储量较高,对云南的乔木层植被碳储量有较大贡献,固碳能力较强,且仍具有一定的提高空间。因此,一方面应当在山地适度发展华山松、云南松和常绿阔叶林,因地制宜地进行人工造林,增加山地造林面积;第二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,防止碳源—碳汇的转变;第三要建立科学合理的森林经营管理模式,通过提高林分质量增加林分碳密度,制定出切实可行的森林管理措施,从而保护当地生态环境,并在应对气候变化中发挥更大的双赢策略和碳汇功能。同时,在气候变化的驱动下,今后需要更加系统地对滇中亚高山森林生态系统固碳速率、分解作用中 CO₂ 释放量及其固碳潜力开展研究,为科学评价该地区森林生态系统的碳汇能力和探讨合理的经营模式提供科学依据。

参考文献:

- [1] Piao S, Fang J, Ciais P, et al. The carbon balance of terrestrial ecosystems in China[J]. *Nature*, 2010, 458(7241):1009-1013.
- [2] Zhao D, Xie S Y. Carbon storage dynamics of forest vegetation in karst mountain: A case study in Youyang Tujia and Miao Autonomous County[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2013, 40(18):155-158.
- [3] 郭兆迪,胡会峰,李品,等. 1977—2008 年中国森林生物量碳汇的时空变化[J]. *中国科学:生命科学*, 2013, 43(5):421-431.

- [4] 黄从德,张健,邓玉林,等. 退耕还林地植被恢复初期碳储量及分配格局研究[J]. 水土保持学报,2007,21(4):130-133.
- [5] 马炜,孙玉军,郭孝玉,等. 不同林龄长白落叶松人工林碳储量[J]. 生态学报,2010,30(17):4659-4667.
- [6] 李晶晶,党坤良,周勇,等. 秦岭中段南坡华山松林能量结构特征和碳储量研究[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2013,41(11):58-66.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 徐侠,王丰,栾以玲,等. 武夷山不同海拔植被土壤易氧化碳[J]. 生态学杂志,2008,27(7):1115-1121.
- [10] 付梦瑶,贺军钊,宋良红,等. 三门峡山区典型森林植被乔木层生物量动态研究[J]. 河南科学,2016,34(3):332-337.
- [11] 刘林森. 滇西北云南松生物量模型回归分析[J]. 山东林业科技,2015,45(4):5-9.
- [12] 李久林,梁士楚. 贵州青岩油杉种群生物量研究[J]. 贵州师范大学学报:自然科学版,1997,15(1):7-12.
- [13] 刘兴良,郝晓东,杨冬生,等. 卧龙巴郎山川滇高山栎灌丛地上生物量及其模型[J]. 生态学杂志,2006,25(5):487-491.
- [14] 沈燕,田大伦,闫文德,等. 湖南沅陵天然次生白栎+樟木+杉木群落生物量及其分布规律[J]. 中南林业科技大学,2011,31(5):44-51.
- [15] 贾汉森,段劼,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.
- [16] 方晰,田大伦,项文化. 速生阶段杉木人工林碳素密度、贮量和分布[J]. 林业科学,2002,38(3):14-19.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 林喜珀,温小莹,黄芳芳,等. 6种热带、亚热带阔叶树种苗生态化学计量特征[J]. 林业与环境科学,2016,32(2):10-16.
- [20] 严昌容,陈灵芝,黄建辉,等. 中国东部主要松林营养元素循环的比较研究[J]. 植物生态学报,1999,23(4):351-360.
- [21] 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.
- [22] 张志华,王连春,郑东瑞,等. 滇西北云南松人工林林分生物量研究[J]. 安徽农业科学,2011,39(31):19203-19205.
- [23] 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.
- [24] 潘勇军,王兵,陈步峰,等. 江西大岗山杉木人工林生态系统碳汇功能研究[J]. 中南林业科技大学学报,2013,33(10):120-125.
- [25] 刘兴良,岳永杰,郑绍伟. 川滇高山栎种群统计特征的海拔梯度变化[J]. 四川林业科技,2005,16(4):9-15.
- [26] 杨同辉,宋坤,达良俊,等. 中国东部木荷—米槠林的生物量和地上净初级生产力[J]. 中国科学:生命科学,2010,40(7):610-619.
- [27] Giese L A B, Aust W M, Kolka R K, et al. Biomass and carbon pools of disturbed riparian forests[J]. Forest Ecology & Management, 2003,180(1):493-508.
- [28] Kira T, Ono Y, Hosokawa T. Biological Production in A Warm-Temperate Evergreen Oak Forest of Japan-JIBP Synthesis[M]. Tokyo: University of Tokyo Press, 1978.
- [29] Hart P B S, Clinton P W, Allen R B, et al. Biomass and macro-nutrients (above-and below-ground) in a New Zealand beech(*Nothofagus*) forest ecosystem: implications for carbon storage and sustainable forest management [J]. Forest Ecology & Management, 2003,174(1):281-294.
- [30] 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.
- [31] 胡海清,罗碧珍,魏书精,等. 小兴安岭7种典型林型林分生物量碳密度与固碳能力[J]. 植物生态学报,2015,39(2):140-158.
- [32] 周玉荣,于振良,赵士洞. 中国主要森林生态系统碳储量与碳平衡[J]. 植物生态学报,2000,24(5):518-522.
- [33] Fang J, Chen A, Peng C, et al. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998 [J]. Science, 2001,292(5525):2320-2322.
- [34] 夏婧. 贵州不同林龄华山松人工林生态系统碳储量[J]. 贵州林业科技,2015,43(2):6-9.
- [35] 李元玖,陈奇伯,熊好琴,等. 滇中高原华山松人工林碳储量及固碳释氧效益[J]. 中南林业科技大学学报,2015,35(2):79-84.
- [36] 杨阳,冉飞,王根绪,等. 青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.
- [37] 黄从德. 四川森林生态系统碳储量及其空间分布特征[D]. 四川雅安:四川农业大学,2008.
- [38] 李加博,韦秋思,吴庆标,等. 南亚热带中山区铁坚油杉生物量及碳储量研究[J]. 湖北林业科技,2017,46(1):14-18.
- [39] 韩娟娟. 子午岭辽东栎林碳储量与土壤理化性质研究[D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学,2010.
- [40] 王兵,杨清培,郭起荣,等. 大岗山毛竹林与常绿阔叶林碳储量及分配格局[J]. 广西植物,2011,31(3):342-348.
- [41] 何云玲,郭宗锋,刘雪莲. 四川省老君山常绿阔叶林乔木碳储量及其分布特征[J]. 生态环境学报,2015,24(11):1765-1770.
- [42] 宫超,汪思龙,曾掌权,等. 中亚热带常绿阔叶林不同演替阶段碳储量与格局特征[J]. 生态学杂志,2011,30(9):1935-1941.
- [43] 胡彦婷,管东生,王浩,等. 广州常绿阔叶林和果园生态系统碳储量[J]. 生态学杂志,2014,33(11):2873-2879.