

# 滇中亚高山典型森林林下植被碳氮储量及其分配格局

侯芳<sup>1,2</sup>, 王克勤<sup>1,2</sup>, 宋娅丽<sup>1,2</sup>, 李加文<sup>3</sup>, 杨云陆<sup>1</sup>, 李有邦<sup>1</sup>

(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 653499; 3. 云南省新平彝族傣族自治县林业局, 云南 新平 653499)

**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)林下植被(灌木层、草本层和凋落物层)各组分生物量、碳氮储量及其分配格局进行了研究。结果表明:(1)在 5 种森林群落中,林下灌木、草本和凋落物生物量变幅为 1.47~11.19 t/hm<sup>2</sup>, 0.01~0.63 t/hm<sup>2</sup>, 7.85~46.73 t/hm<sup>2</sup>。(2)灌木层的碳氮储量变幅在 0.77~5.94 tC/hm<sup>2</sup>, 10.97~92.84 kgN/hm<sup>2</sup>,碳氮储量的主要营养器官分别为茎和叶;草本层为 0.01~0.29 tC/hm<sup>2</sup>, 0.07~5.35 kgN/hm<sup>2</sup>,均呈现出地上部分>地下部分;凋落物为 2.15~13.03 tC/hm<sup>2</sup>, 42.07~320.58 kgN/hm<sup>2</sup>,碳氮储量随分解程度加深各有不同。(3)5 种林分林下灌草及凋落物碳储量大小顺序为:CL>YNS>DYS>HSS>GSL;氮储量为:CL>YNS>DYS>GSL>HSS。综上,常绿阔叶林和云南松林下灌草和凋落物具有较高的碳氮贮能力,滇油杉的碳氮贮潜力较大,应提高林分质量增加林分密度,加大保护管理力度,制定科学可行的森林管理措施,为林下植被与上层林木的协同发展以及今后研究林下植被对于全球气候变化的响应提供理论支撑。

**关键词:**碳氮储量;分配格局;林下植被;滇中亚高山

**中图分类号:**S718.5

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2019)01-0061-08

## Carbon and Nitrogen Storage and Distribution in Understory of Five Typical Forest Types in Subalpine of Middle Yunnan Province

HOU Fang<sup>1,2</sup>, Wangke Qin<sup>1,2</sup>, SONG Yali<sup>1,2</sup>, LI Jiawen<sup>3</sup>, YANG Yunlu<sup>1</sup>, LI Youbang<sup>1</sup>

(1. College of Ecology and Soil & Water Conservation, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China; 2. National Station for Forest Ecosystem in Yuxi, Xinping, Yunnan 653499, China; 3. Forestry Bureau of Yi and Dai Nationality Autonomous County in Xinping, Yunnan 653499, China)

**Abstract:** Biomass, carbon and nitrogen storage of five different forest types, including shrub layer, herb layer and litter, and their distributions of *P. armandii* (HSS), *P. yunnanensis* (YNS), *Keteleeria evelyniana* (DYS), *Q. aquifolioides* (GSL) and *Evergreen broad-leaf* (CL) ecosystems, were studied in subalpine of middle Yunnan Province by using standard plot sampling and biomass measurements. The results showed that: (1) among the five typical forest communities, the ranges of shrubs, herbs and litter biomass were 1.47~11.19 t/hm<sup>2</sup>, 0.01~0.63 t/hm<sup>2</sup> and 7.85~46.73 t/hm<sup>2</sup>, respectively; (2) the ranges of carbon and nitrogen storages of the shrub layer were 0.77~5.94 tC/hm<sup>2</sup> and 10.97~92.84 kgN/hm<sup>2</sup>, and the main vegetative organs of carbon and nitrogen storages were stem and leaf; the ranges of carbon and nitrogen storage in herb layer were 0.01~0.29 tC/hm<sup>2</sup> and 0.07~5.35 kgN/hm<sup>2</sup>; carbon and nitrogen storages in different forest shrub layers decreased in the order: overground part>underground part; the ranges of litter were 2.15~13.03 tC/hm<sup>2</sup> and 42.07~320.58 kgN/hm<sup>2</sup>, and the carbon and nitrogen reserves varied with the degrees of decomposition; (3) carbon storages of the shrub and litter of five typical forests followed the order: CL>YNS>DYS>HSS>GSL; nitrogen reserves followed the order of: CL>YNS>DYS>GSL>

收稿日期:2018-02-04

修回日期:2018-02-27

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,硕士研究生,主要从事森林生态系统碳储量研究。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

HSS. In conclusion, higher carbon and nitrogen storage capacities of undergrowth layers were founded in *P. yunnanensis* and *Evergreen broad-leaf* forest, carbon and nitrogen storage potential of *Keteleeria evelyniana* was relatively larger. The quality and density of forest should be improved, the protection and management should be intensified, and scientific and feasible forest management measures should be formulated. This study would provide theoretical support for the collaborative development between undergrowth and upper trees and the future research of response of the undergrowth to the global climate change.

**Keywords:** C and N storage; distribution pattern; understory; subalpine of middle Yunnan Province

大气中的碳、氮氧化物浓度升高导致全球气候变暖是当今社会共同关注的问题。森林生态系统的基本功能是碳循环,且森林在缓解全球气候变化、改善区域小气候和碳固存方面发挥着不可替代的作用<sup>[1]</sup>。森林碳储量占陆地碳储量的60%,直接影响大气CO<sub>2</sub>浓度变化<sup>[2]</sup>。氮元素是植物营养器官的重要组成元素并影响植物光合作用<sup>[3]</sup>,而氮的储量作为森林生长发育和碳源碳汇转换的重要因子,也引起了广泛关注。由于不同森林生态系统的群落组成和结构、植物生产力水平以及地域的不同引起土壤环境变化而产生碳、氮储量的差异,对于预测和评价我国森林生态系统的碳、氮贮存能力和生态效益评估有科学指导意义。

林下植被是森林生态系统的重要组成部分,对森林生态系统的稳定性、生产力及养分循环具有重要影响<sup>[4]</sup>,林下植被影响上层林木的更新,其凋落物作用于下层土壤腐殖质的吸收和循环<sup>[5]</sup>。近年来,由于人类活动日益加剧,导致了森林生态系统退化,林下植被生长发育不良,生物多样性丧失,直接或间接的影响森林生态系统的平衡<sup>[6]</sup>。目前碳氮储量的研究多集中于乔木层而忽略了林下植被<sup>[7]</sup>,而林下植被碳氮储量对碳氮平衡影响显著,它侧面反映林分特征和林分的分解速率<sup>[8]</sup>。林下植被的物种组成及多样性、现存量、养分特征及分解特性也成了许多学者研究的热点<sup>[4]</sup>,林下植被碳氮动态与整个森林生态系统碳氮平衡的关系亟待解决。

滇中高山磨盘山位于云贵高原、横断山脉和青藏高原南缘结合部,自然条件独特,境内由山峰和支脉构成窄长和深度切削的中山山地地貌,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,根据磨盘山典型森林植被的实测数据和生物量模型,估算华山松林(*P. armandii* forest)、云南松林(*P. yunnanensis* forest)、滇油杉林(*Keteleeria evelyniana* forest)、高山栎林(*Q. aquifolioides* forest)和常绿阔叶林(*Evergreen broad-leaf* forest)林下植被层(灌木层、草本层

和凋落物层)碳、氮储量,分析其分配格局及影响因素,为滇中亚地区森林的可持续发展和林下植被的经营管理提供依据。

## 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,由山底沟谷的南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*)、野茶树(*Eurya alata* Kobuski)、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。

此次研究选取的华山松林下灌草主要有:杨梅(*Myrica rubra*)、菝葜(*Smilax china*)、粗叶悬钩子(*Rubus alceaefolius*)、紫茎泽兰(*Ageratina adenophora*)、沿阶草(*Ophiopogon bodinieri*)等;云南松林下灌草主要有:乌饭树(*Vaccinium bracteatum* Thunb.)、羊胡子草(*Carex callitrichos* V. Krecz)、碎米花杜鹃(*Rhododendron spiciferum* Franch)、槲栎(*Quercus aliena* Blume var. *aliena*)等;滇油杉林下灌草主要有:铁籽(*Eurya pyracanthi*

folia P. S. H su)、油茶(*Camellia oleifera*)、云南含笑(*Michelia yunnanensis*)、紫茎泽兰(*Ageratina adenophora*)、锈叶杜鹃(*Rhododendron siderophyllum*)、四脉金茅(*Eulalia quadrinervis*)等;高山栎林下灌草主要有:白栎(*Quercus fabri* Hance)、白杜鹃(*Exochorda racemosa*)、地檀香(*Gauhheria forestii*)、厚皮香(*Ternstroemiagym nanthera* (Wight-Am.) Sprague)、南烛(*Vaccinium bracteatum* Thunb)、铁籽(*Eurya pyracanthi folia* P. S. H su)等;常绿阔叶林下灌草主要有:毛蕊红茶(*Camellia mairei*)、光叶柯(*Lithoearpus mairei*)、南烛(*Vaccinium bracteatum* Thunb)、碎米花(*Rhododendron*

*spiciferum*)、沿阶草(*Ophiopogon bodinieri*)等。

1.2 研究方法

1.2.1 样地布设 本研究选择华山松林、云南松林、滇油杉林、高山栎林和常绿阔叶林 5 种典型森林作为研究对象,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,每个林分类型分别设置 3 块面积为 20 m × 20 m 的标准样地作为重复,共 15 块。每个重复样地在 20 km 的范围内,并且保证每个样地的土壤、气候条件相似。每个样地按对角线方向设置 5 个 2 m × 2 m 的小样方,调查林下灌木生物量,同样设置 5 个 1 m × 1 m 的小样方用于草本、凋落物现存量的测定。

表 1 不同森林类型的基本特征

森林类型	海拔/ m	林龄/ a	郁闭度/ %	密度/ (株·hm <sup>-2</sup> )	土壤类型	坡位
华山松林(HSS) <i>P. armandii</i> forest	2151	19	66	3466	山地红壤	中坡山地
云南松林(YNS) <i>P. yunnanensis</i> forest	2196	23	77	1437	山地红壤	中坡山地
滇油杉林(DYS) <i>Keteleeria evelyniana</i> forest	2318	18	65	300	山地红壤	中坡山地
高山栎林(GSL) <i>Q. aquifolioides</i> forest	2287	15	90	1080	山地黄棕壤	中坡山地
常绿阔叶林(CL) <i>Evergreen broad-leaf</i> forest	2229	15	87	4628	山地红壤	中坡山地

1.2.2 生物量测算与样品采集 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 的乔木作为起测径阶,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、树高和冠幅。分别根据付梦瑶等<sup>[9]</sup>、刘林森等<sup>[10]</sup>、李久林和梁士楚<sup>[11]</sup>、刘兴良等<sup>[12]</sup>和沈燕等<sup>[13]</sup>等所建立的生物量模型估算华山松、云南松、滇油杉、高山栎和常绿阔叶林的乔木层生物量。灌木层和草本层采用“样方收获法”分别测定灌木层(叶、根、茎)和草本层(地上部分和地下部分)的生物量,记录灌木层和草本层种类、株丛数、高度和覆盖度;凋落物小样方内按未分解层、半分解层和分解层分别测定凋落物鲜重。

1.2.3 林下植被碳氮储量的计算和数据处理 所有样品碳氮含量的测定分别采用重铬酸钾—外加热硫酸氧化法和碱解扩散法。本研究中森林林下植被的碳氮储量指植被层的灌木层、草本层和凋落物,将其生物量乘以各器官的碳氮含量,得到植被各器官碳氮储量。

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 不同类型森林林下植被层生物量

本研究中林下植被层生物量包括灌木层、草本层、凋落物层 3 个层次。林下植被层的生物量大小表现出凋落物层>灌木层>草本层(表 2)。灌木层生物量在不同器官叶、根、茎间的分配有差异,但灌木层生物量以 CL(11.19 t/hm<sup>2</sup>)和 YNS(5.29 t/hm<sup>2</sup>)最高,DYS(3.79 t/hm<sup>2</sup>)次之,HSS(1.79 t/hm<sup>2</sup>)和 GSL(1.47 t/hm<sup>2</sup>)最小。CL 的生物量分别是 HSS, YNS,DYS 和 GSL 的 6.25,2.11,2.95,7.58 倍。不同林分各器官在灌木层生物量中分配比例不同,但均以灌木茎所占比例最高(40.28%~44.61%),CL 为:灌茎>灌叶>灌根,其他 4 种林分均为:灌茎>灌根>灌叶。不同林分草本层生物量(0.13~0.63 t/hm<sup>2</sup>)相对于其他层次占比较小,HSS 和 GSL 草本层生物量分别是其他林分的 1.18~48.46,0.85~41 倍。各林分明显呈现出地上部分生物量大于地下部分,HSS, YNS, DYS 和 GSL 地上部分生物量均为地下部分生物量的 1.5 倍左右,而 CL 二者之比达 3 倍以上。

不同林分凋落物生物量大小顺序差异显著,表现为:CL>YNS>HSS>DYS>GSL。CL 凋落物生物量贡献率达 53.85%,YNS 凋落物生物量仅次于 CL 为 15.59%,HSS(11.45%)、DYS(10.06%)和 GSL

(9.05%)生物量差异不明显。各林分凋落物层的生物量表现出分解层>半分解层>未分解层,分解层和半分解层占比 38%~55%和 24%~39%。CL 各分解层次较其他林分相比占有绝对优势,未分解层、半分解层和分

解层分别是其他 4 种林分各层次的 2.63~6.47,2.44~5.98,4.99~6.68 倍。总体来看,凋落物是林下植被生物量的主体,占 69.51%~80.66%,灌木层占 14.48%~30.21%,草本层占 0.02%~5.41%。

表 2 不同林分林下植被的生物量

t/hm<sup>2</sup>

层次		HSS	YNS	DYS	GSL	CL
灌木层	叶	0.53±0.01aA	1.57±0.01bA	1.13±0.02cA	0.44±0.02aA	3.87±0.02dA
	根	0.54±0.12aA	1.59±0.32bA	1.14±0.15cA	0.44±0.15aA	2.33±0.13dB
	茎	0.72±0.09aB	2.13±0.09bB	1.53±0.21cB	0.59±0.01aB	4.99±0.10dC
	总量	1.79±0.22aC	5.29±0.42bC	3.79±0.38cC	1.47±0.18aC	11.19±0.25dD
草本层	地上部分	0.38±0.002aA	0.03±0.002bA	0.02±0.005bA	0.322±0.05aA	0.01±0.002bA
	地下部分	0.25±0.03aA	0.02±0.002bA	0.01±0.009bA	0.210±0.01aA	0.003±0.0003bA
	总量	0.63±0.03aB	0.05±0.004bB	0.04±0.014bB	0.533±0.06aB	0.01±0.002bA
凋落物	未分解层	1.73±0.45aA	3.89±0.45bA	1.59±0.56aA	1.72±0.56aA	10.26±0.51cA
	半分解层	3.88±0.59aB	4.56±0.59bAB	3.35±0.27aB	1.86±0.27cA	11.11±0.66dA
	分解层	4.33±0.36aC	5.08±0.96abBC	3.80±0.99aB	4.28±1.01aB	25.36±0.91cB
	总量	9.94±1.40aD	13.53±2.00dD	8.73±1.82abC	7.851±1.84bcC	46.73±2.08 eC

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同一林下植被层不同器官间碳含量差异显著( $p<0.05$ )。

## 2.2 不同类型森林林下植被层的碳氮储量

CL 林下灌草及凋落物的碳氮储量明显高于其他林分,碳储量分别为 HSS, YNS, DYS 和 GSL 的 4.49, 2.35, 4.29, 5.98 倍,氮储量分别为 6.92, 2.10, 5.46, 6.14 倍(表 3)。凋落物是林下植被的主体部分,碳氮储量分别介于 2.15~13.03 tC/hm<sup>2</sup>, 42.07~320.58 kgN/hm<sup>2</sup>, 分别占林下植被层的 61.24%~71.24%和 39.86%~77.53%。凋落物碳储量在不同林分间有差异,CL 和 YNS 显著高于 HSS, DYS 和 GSL( $p<0.05$ ),但后 3 者差异不显著。HSS, YNS, DYS 和 GSL 的凋落物氮储量差异不明显,CL 的凋落物氮储量为 320.58 kgN/hm<sup>2</sup>, 是其他 4 种林分的 4.06~7.62 倍。

灌木层碳氮储量分别介于 0.77~5.94 tC/hm<sup>2</sup>, 10.97~92.84 kgN/hm<sup>2</sup>,灌木层中碳、氮贮存的主要营养器官分别是茎和叶。CL 和 YNS 灌木层的碳氮储量明显高于 HSS, GSL 和 DYS。草本层碳氮储量占林下植被及凋落物的 0.03%~7.89%和 0.02%~20.59%,不同林分碳储量以 HSS(0.29 tC/hm<sup>2</sup>)和 GSL(0.25 tC/hm<sup>2</sup>)最大,氮储量以 YNS(0.80 kgN/hm<sup>2</sup>)和 HSS(5.35 kgN/hm<sup>2</sup>)最大。CL 草本层的碳氮储量在林下植被层中占比(0.03%和 0.02%)相对于其他林分较小。不同层次碳氮储量大小与生物量大小变化一致,灌木层和凋落物层的生物量均以 CL 最大导致其林下植被碳氮储量偏大。

表 3 不同林分林下植被的碳氮储量

层次		碳储量/(tC·hm <sup>-2</sup> )					氮储量/(kgN·hm <sup>-2</sup> )				
		HSS	YNS	DYS	GSL	CL	HSS	YNS	DYS	GSL	CL
灌木层	叶	0.29±0.05aA	0.79±0.05bA	0.55±0.06cA	0.24±0.06aA	2.17±0.05dA	4.13±0.63aA	34.90±0.63bA	16.00±0.01cA	3.66±0.91aA	61.48±10.71dA
	根	0.28±0.01aA	0.86±0.01bA	0.49±0.02cAB	0.23±0.02aA	1.21±0.02dB	3.72±0.42aA	19.10±0.42bB	5.30±0.001cB	3.32±0.86aA	12.97±3.47dB
	茎	0.36±0.05aB	1.04±0.06bB	0.65±0.07cC	0.30±0.07aA	2.56±0.06dA	4.44±0.59aA	24.00±0.60bC	4.70±0.002aB	3.99±0.20aA	18.39±2.67cC
	总量	0.93±0.11aC	2.69±0.11bC	1.70±0.14cD	0.77±0.14dB	5.94±0.13 eC	12.29±1.63aB	78.00±1.65bD	26.00±0.01cC	10.97±1.97aB	92.84±16.85dD
草本层	地上部分	0.17±0.0002aA	0.01±0.0001bA	0.01±0.0004bA	0.15±0.001aA	0.01±0.0002bA	2.89±0.07aA	0.50±0.07bA	0.10±0.0001cA	2.63±0.01aA	0.05±0.01bA
	地下部分	0.12±0.003aA	0.01±0.0003bA	0.01±0.0004bA	0.10±0.004aA	0.002±0.004bB	2.46±0.07aA	0.30±0.08bB	0.10±0.0001bA	2.21±0.01aA	0.03±0.01bA
	总量	0.29±0.003aB	0.02±0.0004bA	0.02±0.001bA	0.25±0.01aB	0.01±0.004bA	5.35±0.15aB	0.80±0.15bC	0.20±0.0002cB	4.84±0.02aB	0.07±0.01bA
凋落物	未分解层	0.99±0.01aA	0.59±0.01bA	0.94±0.12aA	1.02±0.13aA	6.44±0.12cA	11.49±0.89aA	40.10±2.31bA	15.60±0.01cA	18.92±3.02cA	116.11±9.01dA
	半分解层	1.46±0.41aB	1.85±0.02aB	1.27±0.15aB	0.73±0.05bB	4.53±0.47cB	18.46±0.69aB	31.20±0.69bB	25.10±0.01cB	20.21±1.99aA	123.88±10.78dA
	分解层	0.56±0.17aC	2.92±0.08bC	0.51±0.02aC	0.40±0.02aC	2.07±0.20bC	12.12±0.92aA	7.30±0.28bC	8.90±0.001bC	12.44±2.94aB	80.59±8.04cB
	总量	3.01±0.60aD	5.37±0.10cD	2.71±0.30abD	2.15±0.20bD	13.03±0.79dD	42.07±2.49aC	78.60±3.28bD	49.60±0.02aD	51.48±7.94aC	320.58±27.82cC

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同一林下植被层不同器官间碳含量差异显著( $p<0.05$ )。

2.3 不同类型森林林下植被层的碳氮分配特征

不同林分灌木层各器官碳氮分配略有差异,碳储量主要分配灌木茎中,HSS,YNS,DYS,GSL 和 CL 中所占比例分别为 38.49%,38.82%,38.37%,38.96%和 43.04%,均在 35%以上(图 1A)。HSS 和 CL 碳分配为茎>叶>根,YNS,DYS 和 GSL 为:茎>根>叶。氮储量在不同森林类型各器官分配差异明显,HSS,YNS 和 GSL 中的分配顺序为茎>叶>根,DYS 的分配顺序为叶>根>茎,CL 的分配顺序为叶>茎>根(图 1B)。CL 和 DYS 的灌木叶在氮储量方面具有优势,CL 灌木叶氮储量是 HSS,YNS 和 GSL 灌木叶的 1.97,1.48,1.99 倍,DYS 灌木叶氮储量是 HSS,YNS 和 GSL 灌木叶的 1.83,1.38,1.84 倍。

草本层中,各林型碳储量均以地上部分大于地下部分且 HSS,YNS,DYS 和 GSL 相差在 18.90%~

20.56%的范围内,CL 的地上草本较地下相比具有明显碳储量优势(相差 42.86%)(图 2A)。HSS,DYS 和 GSL 的草本氮储量地上部分与地下部分差异分别为 8.06%,11.94%,8.68%,而 YNS 和 CL 二者相差分别为 25.00%和 28.88%,均在 20%以上(图 2B)。总体来看,草本地上部分和地下部分碳氮分配差异不显著。

凋落物层中,碳氮储量总体集中在半分解层中。HSS(48.53 tC/hm<sup>2</sup>)和 DYS(46.85 tC/hm<sup>2</sup>)半分解成碳储量最大,YNS(34.50 tC/hm<sup>2</sup>)、GSL(33.95 tC/hm<sup>2</sup>)和 CL(34.75 tC/hm<sup>2</sup>)差异不大。YNS 分解层碳储量是其他 4 种森林分解层的 2.92~3.44 倍(图 3A)。YNS 的凋落物氮储量随着分解程度增加而越来越小,HSS,DYS,GSL 和 CL 的氮储量在半分解时达到最大,是未分解层和分解层的 1.07~1.61,1.53~2.82 倍(图 3B)。

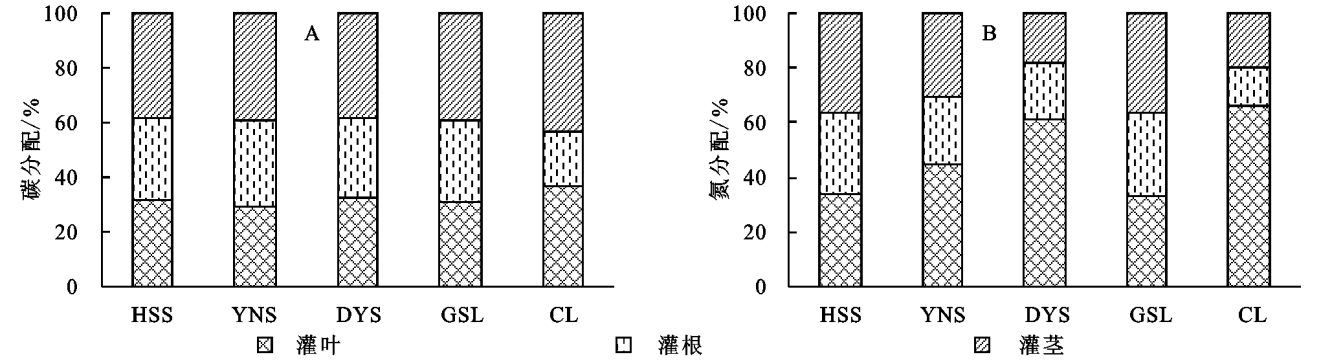


图 1 不同森林类型灌木层各组分碳、氮储量分配特征

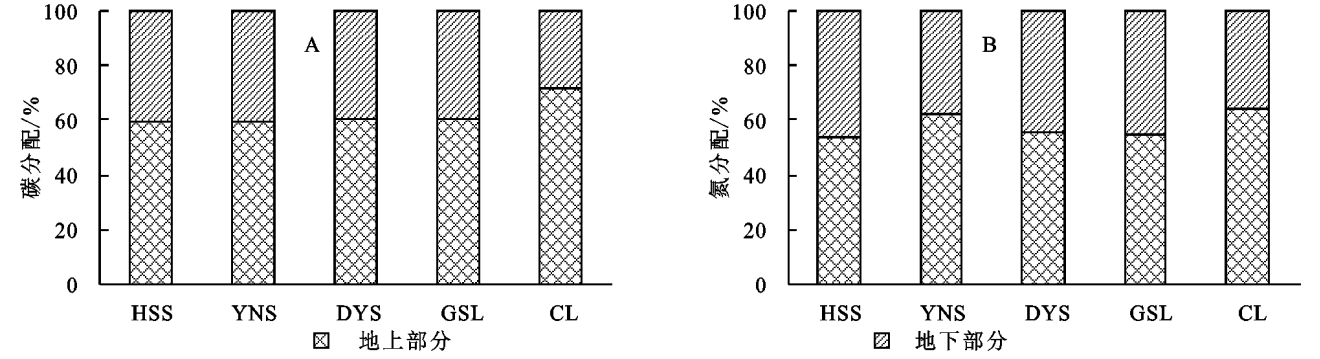


图 2 不同森林类型草本层各组分碳、氮储量分配特征

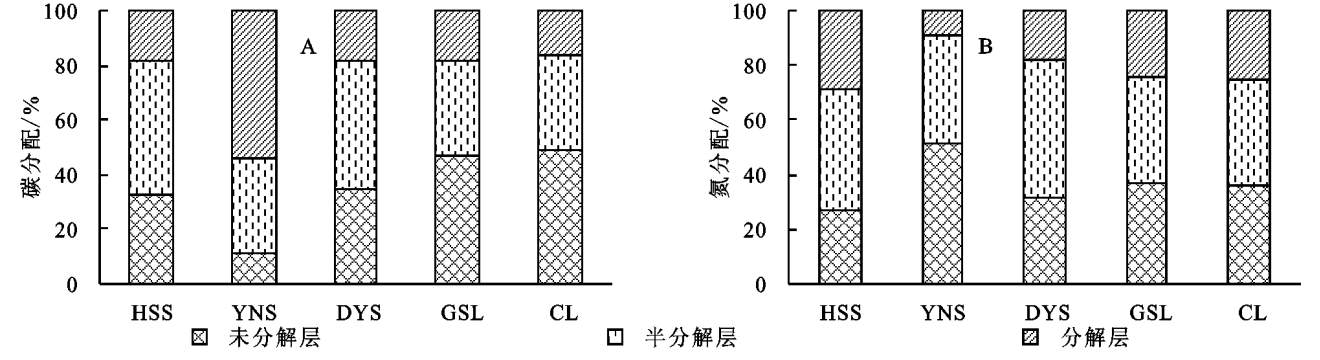


图 3 不同森林类型凋落物层各组分碳、氮储量分配特征

### 3 讨论

#### 3.1 不同类型森林林下植被层生物量

生物量是研究森林生态系统碳氮储量的基础。林下植被的生物量与乔木层的优势度、平均胸径、树冠覆盖度等林分特征因子有明显的相关性<sup>[6]</sup>。林下植被的生物量反映林下植被的生长状况,体现其在森林生态系统中占有资源量的多少,对群落的稳定和健康发展有积极意义。本研究林下植被生物量测算采用相对生长法,又称生物量模型法,该法简单易行、可推算大尺度森林碳氮储量,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。

本研究区华山松林下草本层生物最高(0.63 t/hm<sup>2</sup>),较云南松、滇油杉、高山栎和常绿阔叶林高出1.18~48.46倍,草本层和灌木层生物量略高于秦岭天然华山松林下草本层0.60 t/hm<sup>2</sup>和灌木层1.34 t/hm<sup>2</sup><sup>[13]</sup>,而凋落物的生物量低于秦岭29.43 t/hm<sup>2</sup><sup>[14]</sup>。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,降雨量和日温差较大,华山松林郁闭度较小导致林下灌草长势良好,生物量累积具有一定优势,但温差大导致凋落物分解速率加快,其累积弱于秦岭地区。同时,秦岭中段华山松林海拔仅1000余米,一定程度上表明该海拔范围内,凋落物生物量随海拔升高而降低。

云南松属于滇中亚地区乡土树种,耐干旱瘠薄能力较强,其林下灌木层和凋落物的生物量(5.29 t/hm<sup>2</sup>, 13.53 t/hm<sup>2</sup>)仅次于常绿阔叶林,使其成为滇中亚磨盘山地区第二大碳氮贮存林种。灌木层生物量高于滇西北地区云南松平均生物量和广西百色23 a生云南松(5.21 t/hm<sup>2</sup>),草本层生物量低于以上两地。凋落物层生物量高于广西百色23 a生云南松凋落物4.54 t/hm<sup>2</sup><sup>[15-16]</sup>。滇中亚高原地区云南松针叶更新速率较快导致凋落物生物量累积量大,加之该林分林龄大于其他林种灌木层生物量累积也具有一定优势,但也表明了该地云南松林下草本现存量受区域限制较大。

滇油杉在云南省西北部至中部均有分布,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<sup>2</sup>),仅为其他林分密度的6.48%~27.78%。林下灌草及凋落物生物量仅次于常绿阔叶林和云南松林,在生物量累积上具有较大潜力。由于上层乔木林分密度和郁闭度较小,林内光照、水分、土壤条件较好,灌木层生物量大于同纬度湖南会同杉木林灌木生物量2.59 t/hm<sup>2</sup><sup>[17]</sup>,草本层生物量低于会同14 a生杉木人工林下草本0.90 t/hm<sup>2</sup><sup>[18]</sup>,凋落物的生物量大于三明市忻口林场34 a生杉木人

工林凋落物的生物量4.88 t/hm<sup>2</sup><sup>[19]</sup>。

高山栎抗干扰能力强、具备旺盛的萌蘖能力,由于本研究区特定的海拔和中亚热带气候,受到常年强风、低温和土壤瘠薄的影响,形成林分郁闭度较大的山顶矮林,其生理特性有待于进一步研究。林下草本生物量仅次于华山松,是云南松、滇油杉和常绿阔叶林的10.66,15.23,41.00倍,但灌木层和凋落物生物量最小。生物量分别高于卧龙自然保护区川滇高山栎伴生灌木生物量(0.73 t/hm<sup>2</sup>)、草本生物量(0.36 t/hm<sup>2</sup>)、凋落物生物量(5.98 t/hm<sup>2</sup>)<sup>[11]</sup>。

滇中亚热带常绿阔叶林(15 a生)属于中山半湿性常绿阔叶林,林种结构复杂、物种丰富,林下灌木层和凋落物生物量最大,分别是其他4种林分的2.11~7.59倍和3.45~5.95倍,灌木层生物量是江西大岗山常绿阔叶林下灌木的4.16倍<sup>[20]</sup>,凋落物生物量是南亚热带常绿阔叶次生林平均生物量的20.14倍<sup>[21]</sup>,但草本层生物量是其他4种林分的0.02~0.37倍,是江西大岗山常绿阔叶林的0.06倍<sup>[20]</sup>。可见,该区域常绿阔叶林下植被层相比其他林分具有较高的生物量,尤其是林下灌木和凋落物,而草本层相对于上层林木不具有竞争优势,现存量较小。

#### 3.2 不同类型森林林下植被层的碳氮储量

本研究发现,林下植被的碳氮储量也是森林生态系统的重要组成部分之一,在维持森林生态系统的稳定性和多样性、促进养分循环以及森林演替中扮演着重要角色。而凋落物作为上层林木更新和下层土壤有机质交换的纽带,也起着不可替代的作用。近20 a来,林下植被的养分循环机制、与生态系统其他组分的关系以及其在生态系统中的地位已经成为大家关注的焦点。同时,由于所处的地理位置的不同而导致的气候条件、土壤类型、林木种类与特性等的不同对林下植被和凋落物的碳氮储量均有影响,即本研究体现出5种典型滇中亚高山森林碳氮储量的差异。

在研究的5种林分林下灌木碳氮储量中,常绿阔叶林在碳氮固存方面相比该区域其他树种具有一定优势,主要原因是常绿阔叶林林龄处于15 a左右,上层乔木生物量快速生长使得植被层生物量碳氮积累迅速增加,灌木层生物量高于其他林分类型。云南松的碳氮贮存能力仅次于常绿阔叶林,高于华山松、高山栎和滇油杉。林下灌木和草本碳氮储量变幅为2.04~11.88 tC/hm<sup>2</sup>,15.81~92.91 kgN/hm<sup>2</sup>,平均值5.04 tC/hm<sup>2</sup>,54.00 kgN/hm<sup>2</sup>,和其他地区相比较,高于西北黄土高原六盘山自然保护区华北落叶松人工林3.19 tC/hm<sup>2</sup>,90.00 kgN/hm<sup>2</sup>,华山松次生林3.45 tC/hm<sup>2</sup>,70.00 kgN/hm<sup>2</sup>的碳氮储量<sup>[22]</sup>,高于广西西南边陲大青山试

验场格木林下灌草  $0.25 \text{ tC/hm}^2$ ,  $9.00 \text{ kgN/hm}^2$  的碳氮储量<sup>[23]</sup>, 低于四川阿坝藏族羌族自治州毕棚沟自然保护区岷江冷杉林  $9.13 \text{ tC/hm}^2$ ,  $230.00 \text{ kgN/hm}^2$ , 天然次生林下灌草  $7.80 \text{ tC/hm}^2$ ,  $190.00 \text{ kgN/hm}^2$  的碳氮储量<sup>[24]</sup>, 毕棚沟自然保护区地处四川盆地与青藏高原过渡带, 森林禁伐封育, 天然更新和人工更新并举, 另外该处林下灌草碳氮储量包括了地面苔藓, 使得森林碳氮储量高于滇中亚高山地区。

研究区中, 华山松、云南松、滇油杉凋落物碳储量高于高山栎, 从一定程度上表明滇中亚地区针叶林凋落物碳贮能力优于阔叶林(除 CL), 这与杨阳等<sup>[25]</sup>研究的西藏高原针、阔林碳储量结果不一致, 可能是由于该区域针叶木质纤维发达不易分解, 凋落物堆积从而导致了针叶林碳储量的增大。滇中亚各林分碳氮储量( $2.15 \sim 13.03 \text{ tC/hm}^2$ ,  $59.71 \sim 413.39 \text{ kgN/hm}^2$ )高于广西西南边陲大青山试验场格木人工林( $0.39 \text{ tC/hm}^2$ ,  $16.00 \text{ kgN/hm}^2$ )、马尾松混交林( $0.55 \text{ tC/hm}^2$ ,  $11.00 \text{ kgN/hm}^2$ )。本区域常绿阔叶凋落物碳储量( $13.03 \pm 0.79 \text{ tC/hm}^2$ )是其他林型的  $2.43 \sim 6.06$  倍, 高于我国森林生态系统平均碳密度  $8.21 \text{ t/hm}^2$ <sup>[26]</sup>。可见, 滇中亚高山常绿阔叶林凋落物碳累积相对于全国平均水平具有一定优势, 对于今后系统研究凋落物中的碳氮储量在气候驱动下分解为氮氧化物对森林生态系统稳定性机制提供基础。

### 3.3 不同类型森林林下植被层的碳氮分配特征

灌木叶是氮储量的主要营养器官, 在云南松、滇油杉和常绿阔叶林中表现的尤为明显, 在华山松和高山栎中氮储量在不同营养器官灌木根、茎、叶间差异不明显; 各林型(除 YNS)灌木层碳储量在不同营养器官中的分配比例均为茎>叶>根, 这是由于叶含有丰富的叶绿体, 有大量有机物存在, 枝干含有较多的木质素, 木质素的碳含量高, 所以叶和茎的碳储量较高, 而根主要进行水分和无机盐交换, 碳储量少<sup>[27]</sup>。但云南松灌木层碳分配为茎>根>叶, 云南松生长会先将营养分配到根系导致地下部分生长迅速, 地上部分生长缓慢, 其林下灌木分配比例出现差异可能是受乔木层云南松的生态适应对策影响<sup>[28]</sup>。在草本层中, 各林型碳氮储量均表现为地上部分大于地下部分, 这与广西凭祥市境内白云试验林场格木、红椎、马尾松林下草本碳氮分配一致<sup>[29]</sup>, 体现了叶是光合作用主要器官, 但碳分配与南岭杉木林下草本层<sup>[20]</sup>有差异, 可能是由于南岭地区多年生草本居多导致地下根系发达所致。凋落物不同层次碳氮储量随林型不同呈现差异, 阔叶林种(高山栎和常绿阔叶林)随分解程度增加碳储量所占比例减小, 这与江西地区常绿阔

叶林下调落物分配一致, 但针叶林(华山松、云南松、滇油杉)分配有差异<sup>[30]</sup>, 表明凋落物各层次碳分配差异与针、阔林种的关系。凋落物氮储量随着分解的进行先增大后减小, 在半分解时氮储量达到最大值。

在 5 种典型林分中, 碳储量均表现为凋落物>灌木层>草本层, 与广西 21~40 a 生软阔林碳分配一致, 与小于 21 a 生软阔林碳分配草本层>凋落物>灌木层有差异<sup>[31]</sup>, 与河南洛宁的 8 a, 15 a, 22 a 生的刺槐碳储量分配凋落物>草本层>灌木层有差异<sup>[32]</sup>, 表明林下灌草及凋落物的碳储量与所处林分的林龄和林分种类有关。但本研究由于林分类型的差异, 加之植株大小、气候条件、地域分布、立地环境等因素的影响, 林下植被层碳储量随林龄的系统分布有待进一步研究。而氮储量在所研究的 5 中林分中均表现出凋落物>灌木层>草本层, 与黄土丘陵地区典型刺槐、辽东栎林下灌草及凋落物分配一致<sup>[33]</sup>。综上分析, 滇中亚高山 5 种典型森林类型中, 常绿阔叶林和云南松林下灌草和凋落物具有较高的碳汇潜力和固氮功能, 同时也表明生物量碳氮之间存在某种耦合关系, 加强林下植被的近自然化改造和经营, 使得上层林木与林下植被及凋落物协同发展; 另一方面, 对于碳氮贮能力较弱的华山松、滇油杉和高山栎, 也要采取适当森林经营措施, 合理进行人工促进更新。充分发挥凋落物的潜在碳源优势, 加强碳、氮等营养元素的储存和减少营养元素的流失, 为科学合理评价森林生态系统碳、氮贮能力和林业管理提供理论基础。

## 4 结论

(1) HSS, YNS, DYS, GSL 和 CL 林下灌木层、草本层和生物量大小为  $1.47 \sim 11.19 \text{ t/hm}^2$ ,  $0.01 \sim 0.63 \text{ t/hm}^2$ ,  $7.85 \sim 46.73 \text{ t/hm}^2$ 。林下灌草生物量大小顺序为: CL>YNS>DYS>HSS>GSL, 凋落物层为: CL>YNS>HSS>DYS>GSL。凋落物生物量是林下植被层的主体部分, 占  $69.51\% \sim 80.64\%$ ; 其次为林下灌木, 占  $14.48\% \sim 30.21\%$ ; 草本层仅占  $0.02\% \sim 5.4\%$ 。

(2) HSS, YNS, DYS, GSL 和 CL 灌木层碳氮储量分别为  $0.77 \sim 5.94 \text{ tC/hm}^2$ ,  $10.97 \sim 92.84 \text{ kgN/hm}^2$ , 草本层为  $0.01 \sim 0.29 \text{ tC/hm}^2$ ,  $0.07 \sim 5.35 \text{ kgN/hm}^2$ , 凋落物为  $2.15 \sim 13.03 \text{ tC/hm}^2$ ,  $42.07 \sim 320.58 \text{ kgN/hm}^2$ 。CL 和 YNS 林下植被层碳氮储量明显高于 HSS, DYS 和 GSL。灌木层各器官碳储量整体上表现为: 茎>叶>根, 氮储量表现为叶>茎>根; 草本层地上部分>地下部分; 凋落物层碳氮储量为: 半分解层>未分解层>分解层。

## 参考文献:

- [1] 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.
- [2] Ceulemans R, Janssens I A, Jach M E. Effects of CO<sub>2</sub> enrichment on trees and forests: Lessons to be learned in view of future ecosystem studies[J]. Annals of Botany, 1999, 84(5): 577-590.
- [3] 苗艳明, 吕金枝, 毕润成. 不同功能性植物叶氮含量与光合特性的关系研究[J]. 植物研究, 2012, 32(4): 425-529.
- [4] 王瑞华, 葛晓敏, 唐罗忠. 林下植被多样性、生物量及养分作用进展研究[J]. 世界林业研究, 2014, 27(1): 43-48.
- [5] 何艺玲, 傅懋毅. 人工林下植被的研究现状[J]. 林业科学研究, 2002, 15(6): 727-733.
- [6] 杨昆, 管东生. 林下植被的生物量分布特征及其作用[J]. 生态学杂志, 2006, 25(10): 1252-1256.
- [7] Domke G M, Perry C H, Walters B F, et al. Estimating litter carbon stocks on forest land in the United States[J]. Science of the Total Environment, 2016, 557/558: 469-478.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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]. 中南林业科技大学学报, 2011, 31(5): 44-51.
- [13] 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.
- [14] 马明, 王得祥, 刘玉民. 秦岭天然华山松林碳素空间分布规律及其动态变化[J]. 林业资源管理, 2008(5): 75-78.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 田大伦, 胡曰利, 闫文德, 等. 连栽杉木林林下植被生物量动态格局[J]. 生态学报, 2011, 31(10): 2737-2747.
- [18] 闫文德, 田大伦, 焦秀梅. 会同第二代杉木人工林林下植被生物量分布及动态[J]. 林业科学研究, 2003, 16(3): 323-327.
- [19] Zhou L, Shalom A D D, Wu P, et al. Litterfall production and nutrient return in different-aged Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantations in South China[J]. Journal of Forestry Research, 2015, 26(1): 79-89.
- [20] 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.
- [21] 徐伟强, 周璋, 赵厚本, 等. 南亚热带3种常绿阔叶次生林的生物量结构和固碳现状[J]. 生态环境学报, 2015, 24(12): 1938-1943.
- [22] 杨丽丽, 王彦辉, 文仕知, 等. 六盘山4种森林生态系统的碳氮储量、组成及分布特征[J]. 生态学报, 2015, 35(15): 5215-5227.
- [23] 罗达, 史作民, 王卫霞, 等. 南亚热带格木、马尾松幼龄人工纯林及其混交林生态系统碳氮储量[J]. 生态学报, 2015, 35(18): 6051-6059.
- [24] 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.
- [25] 杨阳, 王根绪, 冉飞, 等. 西藏高原主要森林类型凋落物碳储量及空间分布格局[J]. 生态学杂志, 2016, 35(3): 559-566.
- [26] 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.
- [27] 魏江生, 乌日古玛拉, 周梅, 等. 基于灌木林碳储量估算的植被含碳率取值[J]. 草业科学, 2016, 33(11): 2202-2208.
- [28] 蔡年辉, 许玉兰, 李根前, 等. 天然云南松生物量动态研究[J]. 南方农业学报, 2011, 42(10): 1255-1258.
- [29] 王卫霞, 史作民, 罗达, 等. 我国南亚热带几种人工林生态系统碳氮储量[J]. 生态学报, 2013, 33(3): 0925-0933.
- [30] 吴春生, 刘苑秋, 魏晓华, 等. 亚热带典型森林凋落物及细根的生物量和碳储量研究[J]. 西南林业大学学报: 自然科学版, 2016, 36(5): 45-51.
- [31] 陈莉, 韩畅, 宋苏, 等. 广西不同林龄阔叶林碳储量及其分配格局[J]. 生态学杂志, 2017, 36(3): 592-600.
- [32] 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.
- [33] 宋变兰, 关晋宏, 杜盛, 等. 黄土丘陵区刺槐、辽东栎林碳氮密度及其分配特征[J]. 水土保持研究, 2016, 23(4): 55-65.