

DOI: 10.5846/stxb201606011053

金艳强, 李敬, 张一平, 刘运通, 费学海, 李培广. 元江干热河谷稀树灌草丛植被碳储量及净初级生产力. 生态学报, 2017, 37(17): 5584-5590.

Jin Y Q, Li J, Zhang Y P, Liu Y T, Fei X H, Li P G. Carbon storage and net primary productivity of a savanna ecosystem in a dry-hot valley in Yuanjiang, Yunnan. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(17): 5584-5590.

元江干热河谷稀树灌草丛植被碳储量及净初级生产力

金艳强^{1,3}, 李 敬^{1,3}, 张一平^{1,*}, 刘运通¹, 费学海^{1,3}, 李培广²

1 中国科学院西双版纳热带植物园, 热带森林生态学重点实验室, 昆明 650223

2 中国科学院西双版纳热带植物园, 元江干热河谷生态站, 元江 653300

3 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 稀树灌草丛作为干热河谷区特殊的植被类型, 其碳储量等一直缺乏必要的研究。以元江干热河谷稀树灌草丛植被为对象, 利用典型样地法研究该区稀树灌草丛植被的碳储量与净初级生产力。结果表明: 元江稀树灌草丛植被的碳储量为 32.13 t C/hm², 其中乔木、灌木和草本各层次的碳储量为 26.70、4.04、1.40 t C/hm², 分别占到总碳储量的 83.02%、12.57%、4.4%。乔木层中地上部分碳储量占到 66.70%。另外, 元江稀树灌草丛的净初级生产力为 3.88 t C hm⁻² a⁻¹, 其中林分的净初级生产力为 1.90 t C hm⁻² a⁻¹, 凋落物量为 1.98 t C hm⁻² a⁻¹; 林下植被层对林分净初级生产力的贡献达到了 46.92%。说明元江稀树灌草丛具有较高的碳储量和碳汇能力。结果为稀树灌草丛碳循环及碳汇功能研究提供了基础, 同时也为干热河谷区植被的保育与可持续经营提供了科学依据。

关键词: 碳储量; 生产力; 稀树灌草丛; 干热河谷

Carbon storage and net primary productivity of a savanna ecosystem in a dry-hot valley in Yuanjiang, Yunnan

JIN Yanqiang^{1,3}, LI Jing^{1,3}, ZHANG Yiping^{1,*}, LIU Yuntong¹, FEI Xuehai^{1,3}, LI Peiguang²

1 Key Laboratory of Tropical Forest Ecology, Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650223, China

2 Yuanjiang Savanna Ecosystem Research Station, Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Yuanjiang 653300, China

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Savanna is a unique vegetation type that predominantly occurs in dry-hot valleys, yet its carbon storage capacity and net primary productivity (NPP) remain poorly understood. In the present study, we estimated carbon storage and NPP of savanna vegetation using permanent field plots in the dry-hot valley of Yuanjiang, Yunnan Province, southwestern China. We estimated tree carbon storage using allometric equations, and carbon storage in shrubs and herbs was estimated by the harvesting method. The NPP was calculated using two years of data from plot surveys. We found that the total carbon storage of the savanna in Yuanjiang was 32.13 t C/hm². Carbon storage in the tree, shrub, and herb layers was 26.70 t C/hm², 4.04 t C/hm², and 1.40 t C/hm², which contributed 83.02%, 12.57%, and 4.35% of the total carbon storage, respectively. Aboveground carbon storage accounts for 66.70% of tree layer carbon storage. Similarly, the NPP of the savanna was 3.88 t C hm⁻² a⁻¹. NPP from the forest biomass and litter was 1.90 t C hm⁻² a⁻¹ and 1.98 t C hm⁻² a⁻¹, respectively. The contribution to the NPP of forest biomass from the understory (shrubs and herbs) approached 46.92%. Thus, we conclude that, owing to its high carbon storage and NPP values, savanna vegetation is an important component of

基金项目: 国家自然科学基金与云南省联合项目(U1202234); 国家基金重大项目(31290221); 国家基金青年项目(41405143); 云南省基金面上项目(2015FB186)

收稿日期: 2016-06-01; 网络出版日期: 2017-04-24

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yipingzh@xtbg.ac.cn

the carbon cycle; this finding provides a rationale for the conservation of vegetation and the sustainable management of savanna ecosystems in dry-hot valleys.

Key Words: carbon storage; NPP; savanna; dry-hot valley

森林固碳能力或碳储量是衡量森林生态功能的关键指标,也是研究碳循环的基础。尤其是在全球变暖大背景下,森林在调节全球碳平衡的主导地位显得尤为突出。然而,近年来针对森林碳储量的研究主要集中于乔木林和灌木林,对不同林型、不同起源林分的碳储量及生产力进行了大量研究^[1-3]。但是,稀树灌草丛(萨王纳,Savanna)作为一类特殊分布的森林类群,其碳储量及生产力受到的关注较少。另外,稀树灌草丛植被受气候变化的影响较为敏感。根据 Zhao 等^[4]的模型研究认为受到气候变化的影响,我国稀树灌草丛植被的面积有增大的趋势,而且其分布的界限也正逐渐北移。因此,研究稀树灌草丛碳储量及分配特征显得更为迫切。

分布于我国的稀树灌草丛植被中,尤以元江干热河谷的最具代表性^[5]。但是,现有的研究主要针对元江稀树灌木草丛的群落特征^[6-11]、植物生理^[12-14]等方面展开,而针对元江干热河谷稀树灌草丛的碳储量及生产力的研究较少。

元江干热河谷分布的稀树灌草丛作为世界萨王纳植被的重要组成部分,其植被的碳储量及其分配特点是怎样的,该植被类型的生产力和碳汇能力又是如何,这些问题都急需回答。因此,本研究选择元江干热河谷稀树灌草丛群落为对象,旨在研究稀树灌木草丛群落碳储量及生产力特征,为该区碳储量估算及碳汇功能评估提供基础,同时可为该区植被的保护提供理论。

1 研究区概况

研究地点位于中国科学院西双版纳热带植物园元江干热河谷生态站(102°10'40"E, 23°27'56"N),海拔 553 m,该区植被以稀树灌木草丛为代表,总体上植被覆盖较好,乔木层一般较为低矮,主要优势种为厚皮树(*Lannea coromandelica*)、细基丸(*Polyalthia cerasoides*);灌木多以宿萼木(*Strophoblachia fimbriolax*)、虾子花(*Woodfordia fruticosa*)、清香木(*Pistacia weinmanniifolia*)、霸王鞭(*Euphorbia royleana*)等为优势,灌木成丛现象比较明显,平均高度 80 cm 左右,盖度 40%;草本以扭黄茅(*Heteropogon contortus*)为优势,高度在 10—60 cm 之间,盖度达 50%以上。该区多年平均降雨量 700—800 mm 左右,年平均温度 24.9℃,年日照时数 2292 h,年蒸发量 2750 mm,总体气候特点为降水量少,平均温度高,日照充足,干湿季明显,终年无霜^[15]。生境中裸岩率高(达 61.2%),土层较薄,土壤以燥红土为主。

2 研究方法

2.1 样方调查

2014 年 10 月通过踏勘,并考虑林分的特点及代表性,在研究区内林分特征及立地条件相对一致的地段选取了 6 块典型样地,样地面积不低于 600 m²(20 m×30 m),样地情况见表 1。将样地划分为 100 m²(10 m×10 m)的乔木样方,分别对乔木(树高>3 m)进行每木检尺,测定每株的树高、胸径、冠幅。在样地中随机的设置 3 个灌木样方,大小为 2 m×2 m,布设于对角线上,测定灌木样方的物种组成、灌木的平均基径、平均高度等。另外,在 3 个灌木样方的左上角,分别设置了 1 个草本样方(1 m×1 m),测定草本样方的总盖度、物种组成、平均高度等指标。最后,采用收获法分别对灌木、草本样方中所有植物按器官(灌木分叶、枝干、根系三部分,草本分地上、地下两部分)全部收获,先将灌草地上部分齐地剪断收获;再用全挖法将灌草的根系全部挖出,由于该区土层较薄,挖掘深度直至岩层为止,然后将灌木和草本各部分器官分别进行称鲜重,同时每个部分取 150 g 左右的样品带回实验室,在烘箱中用 105℃杀青 30min 后,恒温 70℃下烘干至衡重后测定各部分器官的含水率,根据灌草各部分器官的含水率,将林下植被(灌木、草本)各部分的鲜重换算为干重生物量。最

终,将各部分器官的干重生物量统一乘以转换系数 0.5 得到各部分的碳储量($\text{t C}/\text{hm}^2$)。

表 1 样地基本概况

Table 1 The situation of plot

样地 Site	坡位 Slope position	样地面积/ m^2 Stand area	郁闭度 Coverage	林分密度/(株/ hm^2) Density	平均树高/m Average height of trees
P1	中	1000	0.5	1560	4.4
P2	中	1000	0.5	1460	4.0
P3	中	600	0.45	1800	3.9
P4	中	600	0.4	1766	3.8
P5	中	600	0.45	1833	3.9
P6	中	600	0.5	2100	3.9

2.2 数据统计分析

乔木层生物量估算使用每木检尺的树高、胸径数据,通过异速生长方程计算得到。考虑研究区域的气候、植被、树种组成及模型使用范围,乔木层生物量估算选用的异速生长方程^[16]:

$$W_l = 0.014 \times (D^2 H)^{0.693} \quad (1)$$

$$W_b = 0.015 \times (D^2 H)^{0.844} \quad (2)$$

$$W_s = 0.091 \times (D^2 H)^{0.816} \quad (3)$$

$$W_r = 0.038 \times (D^2 H)^{0.896} \quad (4)$$

式中, W_l 指叶生物量(kg), W_b 指枝生物量(kg), W_s 指茎干生物量(kg), W_r 指根生物量(kg), D 为乔木 1.3 m 处胸径(cm), H 为树高(m)。将计算得到乔木、各部分生物量统一乘以转换系数 0.5 得到各部分的碳储量($\text{t C}/\text{hm}^2$)。

净初级生产力指的是生物体在单位面积、单位时间内有机物的净生产量。本研究中净初级生产力(Net primary productivity, NPP)使用林分中各组分碳储量的年变化量($\text{t C hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$)来表示,其计算公式为:

$$NPP = \Delta W_l + \Delta W_s + \Delta W_b + T_L \quad (5)$$

式中, ΔW_l 、 ΔW_s 、 ΔW_b 分别指代乔木、灌木、草本碳储量年净增量, T_L 为凋落物年掉落量。乔木的增量依据 2a 的群落调查数据通过模型计算得到,灌木、草本的增量依据 2a 通过全挖法的数据计算得到;凋落物量(T_L)通过凋落物筐收集得到,乘以转换系数 0.5 得到凋落物的碳储量。

3 结果与分析

3.1 稀树灌草丛乔木层碳储量

稀树灌草丛群落乔木层的总碳储量为(26.68 ± 0.88) $\text{t C}/\text{hm}^2$ (图 1)。乔木层 11 种木本植物的碳储量在(0.05 ± 0.03)—(16.47 ± 2.01) $\text{t C}/\text{hm}^2$ 之间,物种间碳储量最大值比最小值高出 339 倍。碳储量最大的物种是厚皮树,为 $16.47 \text{ t C}/\text{hm}^2$,占到乔木层总碳储量的 61.71%,其次为霸王鞭,它的碳储量为 $5.58 \text{ t C}/\text{hm}^2$,占到 20.90%;乔木层中碳储量最低的物种为疏序黄荆(*Vitex negundo* form. *laxipaniculata*),为 $0.04 \text{ t C}/\text{hm}^2$,仅占乔木层总碳储量的 0.18%。这表明乔稀树灌草丛乔木层中优势物种比较突出,碳储量在各物种间分布不均匀。

另外,乔木层碳储量中地上部分(叶、枝、茎)的总碳储量为(17.80 ± 0.64) $\text{t C}/\text{hm}^2$,占总碳储量的 66.70%,地下部分碳储量为(8.89 ± 0.26) $\text{t C}/\text{hm}^2$,占到 33.30%。而且,从地上部分碳储量上看,枝和茎的碳储量($17.06 \text{ t C}/\text{hm}^2$)就占到了 95.79%,但叶的生物量仅为 $0.54 \text{ t C}/\text{hm}^2$,只占到 3.05%,减少了叶片中的碳储量分配。

3.2 稀树灌草丛林下植被碳储量

元江稀树灌草丛林下植被层总碳储量为(5.44 ± 0.99) $\text{t C}/\text{hm}^2$,其中灌木层的总碳储量为(4.04 ± 0.84) $\text{t C}/\text{hm}^2$,占林下植被层总碳储量的 74.32%,草本层碳储量为(1.40 ± 0.28) $\text{t C}/\text{hm}^2$,占到 25.70%(图 2)。

具体看来,灌木层地上部分的叶、枝干碳储量 0.29、2.43 t C/hm², 分别占到灌木层碳储量的 7.21%、60.12%。而灌木层的地下碳储量为 (1.32±0.32) t C/hm², 占灌木层碳储量的 32.67%。草本层地上部分碳储量为 (1.12±0.24) t C/hm², 占草本层碳储量的 79.89%; 地下部分碳储量为 (0.28±0.05) t C/hm², 仅占草本层碳储量的 20.04%。可知稀树灌草丛林下植被碳储量主要分配在地上部分。

3.3 稀树灌草丛林分净初级生产力

元江稀树灌草丛净初级生产力为 3.88 t C hm⁻² a⁻¹, 其中林分的净初级生产力为 1.90 t C hm⁻² a⁻¹, 凋落物量为 1.98 t C hm⁻² a⁻¹ (表 2)。从林分的净初级生产力看, 地上部分为 1.33 t C hm⁻² a⁻¹, 占到了林分总净初级生产力的 70.04%; 而林分地下部分的净初级生产力是 0.57 t C hm⁻² a⁻¹, 占到林分的 29.96%。表明林分中地上净初级部分生产力更为明显, 当然, 29.96% 比率也显示了地下部分的净初级生产力所占比重较大, 凸显了稀树灌草丛的特征。

从林分的不同层次上看, 林分中乔木层净初级生产力为 1.01 t C hm⁻² a⁻¹、灌木层 0.56 t C hm⁻² a⁻¹、草本层 0.33 t C hm⁻² a⁻¹, 分别占到林分总净初级生产力的 53.08%、29.49%、17.43%。而林分中林下植被层(灌木层和草本层)的净初级生产力达到了 46.92%, 接近于乔木层的净初级生产力, 说明在稀树灌草丛中林下植被层的净初级生产力对生态系统净初级生产力的贡献不可忽视。

4 讨论

4.1 稀树灌草丛碳储量

森林生态系统作为一个动态的碳库, 准确估计森林的碳储量是正确评价森林碳汇功能的基础^[17]。元江稀树灌草丛林分碳储量为 32.13 t C/hm², 在乔、灌、草 3 个层次中, 稀树灌草丛往地下部分分配了较多的碳储量(均占到总碳储量的 30% 以上), 反映了稀树灌草丛地下根系统较为发达。水分是限制稀树灌草丛生态系统生长的关键因子^[15], 发达的根系有利于该植被中植物能从更深更广的区域获取水分, 这是对干旱胁迫的一种适应^[18-19]。相反, 乔木层和灌木层中叶碳储量的分配较少, 其在总碳储量中的比例不足 10%, 由于元江干热河谷水热矛盾突出, 较少的叶碳储量分配说明植物叶片的叶面积及叶数量的减少, 叶片也变薄^[12], 这有利于减少水分的散失, 是适应干旱的一种策略^[20]。

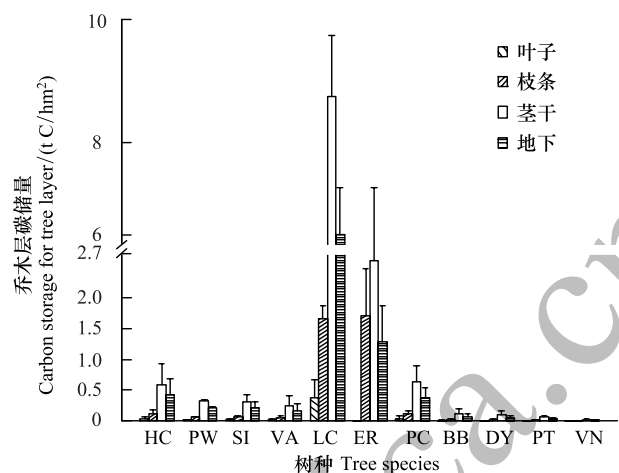


图1 元江干热河谷稀树灌草丛乔木层碳储量(均值+标准误)

Fig.1 Carbon storage of tree layer for Savanna in Yuanjiang dry-hot valley (Values represent means ± SE)

HC:心叶木 *Haldina cordifolia*; PW:清香木 *Pistacia weinmannifolia*; SI:异序乌桕 *Sapium insigne*; VA:深裂山葡萄 *Vitis amurensis* var. *dissecta*; LC:厚皮树 *Lannea coromandelica*; ER:霸王鞭 *Euphorbia royleana*; PC:老人皮 *Polyalthia cerasoides*; BB:鞍叶羊蹄甲 *Bauhinia brachycarpa*; DY:云南柿 *Diospyros yunnanensis*; PT:余甘子 *Phyllanthus taxodiifolius*; VN:疏序黄荆 *Vitex negundo* form. *laxipaniculata*

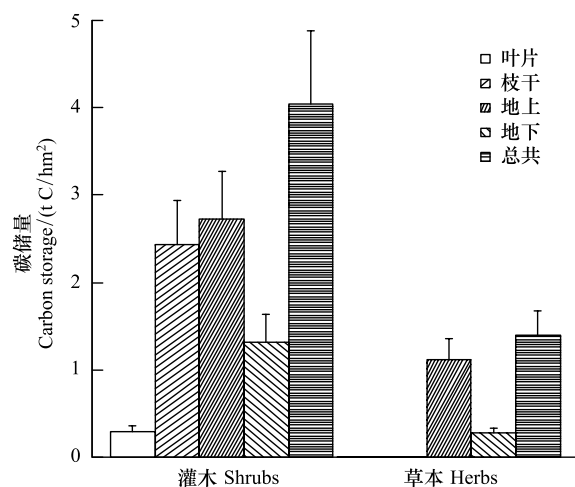


图2 元江干热河谷稀树灌草丛林下植被碳储量(均值+标准误)

Fig.2 Carbon storage of understory layer for Savanna in Yuanjiang dry-hot valley (mean±SE)

表2 元江干热河谷稀树灌草丛群落净初级生产力

Table 2 Net primary productivity of Savanna in Yuanjiang dry-hot valley

层次 Layer	地上部分 Aboveground/(t C hm ⁻² a ⁻¹)	地下部分 Belowground/(t C hm ⁻² a ⁻¹)	合计 Total/(t C hm ⁻² a ⁻¹)
林分 Forest			
乔木 Tree	0.62	0.39	1.01 (53.08)
灌木 Shrub	0.51	0.05	0.56 (29.49)
草本 Herb	0.20	0.13	0.33 (17.43)
小计 Total	1.33 (70.04)	0.57 (29.96)	1.90
凋落物 Litter	—	—	1.98
总共 Total	—	—	3.88

括号内数字指代逻辑单元占林分总生产力的百分比

表3 不同森林类型间碳储量的差异

Table 3 Carbon storage of the different forest type

	地点 Location	降雨量/mm Precipitation	林型 Forest type	碳储量/(t C/hm ²) Carbon storage	文献 References
喀斯特区 Karst	贵州普定	1390	常绿落叶阔叶混交林	44.35 ^a	[21]
	贵州茂兰	1321	乔灌 Trees and shrubs	27.61	[16]
干热河谷区 Dry-hot valley	四川凉山	970	赤桉+合欢混交林	13.59 ^a	[22]
	云南元谋	614	Savanna 桉树	24.73 ^a	[23]
	云南元阳	800—1000	青桐人工林	11.91	[24]
稀树灌草丛 Savanna	巴西东南部 Southeastern Brazil	1550	Cerrado savanna	24.20	[25]
	美国南部 southern U. S.	665	temperate savanna	19.0—43.0	[26]
	非洲南部 Southern Africa	850	tropical savanna	33.3	[27]
	澳洲北部 Northern Australia	1190—1695	tropical savanna(桉树)	31.75 ^b	[28]
	全球平均 Global average	—	savanna	28.40	[29]
	云南元江 Yuanjiang, Yunnan	700—800	稀树灌草丛 savanna	32.13	本研究

碳储量一列中上标 a 表示该值由生物量乘以转换系数 0.5 得到; b 表示该值为地上部分碳储量

从同一地区来看,位于哀牢山河谷的元江干热河谷稀树灌草丛的碳储量(32.13 t C/hm²)要远低于哀牢山山顶地区中山湿性常绿阔叶林的碳储量(257.90 t C/hm²)^[30],这主要是因为哀牢山山顶具有较好的水分条件(降雨量 1879.5 mm)和土壤状况,森林生长茂密,树高可达 20 m 以上;而元江干热河谷稀树灌草丛分布于较为恶劣的石生环境中(裸岩率达到 61.6%),严重的限制了植被的生长,植被一般较为低矮(乔木层平均树高 4.0 m 左右,表 1),制约了元江干热河谷稀树灌草丛植被的碳积累。

元江干热河谷稀树灌草丛植被的生长环境与喀斯特区灌木林生长环境极为相似,都生长于石生环境中。比较两种生境中植被的碳储量发现,元江稀树灌草丛的碳储量为 32.13 t C/hm²,稍高于贵州茂兰喀斯特区灌木林的碳储量(27.61 t C/hm²)^[16],但低于贵州普定喀斯特次生乔木林的碳储量(44.35 t C/hm²)^[21]。这说明,元江干热河谷稀树灌草丛生态系统碳储量与喀斯特区次生乔木林的碳储量相当。虽然,在贵州喀斯特区平均年降雨量较为充足(1200 mm),然而生境恶劣及土层浅薄也是限制喀斯特植被的生长的重要因素^[16]。

与国内其他干热河谷区植被相比,元江干热河谷稀树灌草丛的碳储量要高(表 3)。主要原因是在金沙江干热河谷水土流失严重,土层中养分流失严重,限制了植被的发育,再加上该区多为人工林分,人为干扰严重,原生植被破坏严重,影响植被的碳积累^[11, 23-24]。相反,元江干热河谷稀树灌草丛群落发育相对完善,可以明显分出乔、灌、草三层^[6, 11],有利于植被的保护及碳积累。

而与其它区域稀树灌草丛相比,元江干热河谷稀树灌草丛碳储量(32.12 t C/hm²)要稍高于全球稀树灌草丛主要分布区的平均碳储量(28.40 t C/hm²)(表 3)和巴西东南部稀树灌草丛(Cerrado savanna)的 24.20 t C/hm²,而与美国南部(19.0—43.0 t C/hm²)、非洲南部(33.3 t C/hm²)、澳洲北部(31.75 t C/hm²)稀树灌草丛

的碳储量比较接近。这表明该区稀树灌草丛植被的碳储量与世界其它稀树灌草丛分布区域的碳储量是相当的,其碳储量不容忽视,应得到重视与保护。

4.2 净初级生产力

元江干热河谷稀树灌草丛总的净初级生产力为 $3.88 \text{ t C hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$,其中林分的净初级生产力为 $1.90 \text{ t C hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$,林分中林下植被的净初级生产力在林分净初级生产力的贡献达到了 47%,接近乔木层净初级生产力所占比例(53%)(表 2)。由于上层乔木通过控制林内小气候与资源利用率影响着林下植被的组成与生长^[31-32],元江稀树灌草丛乔木层较为开阔的林冠(Open-canopy,郁闭度 0.5 左右),为林下植被层获取光资源和空间生态位的占领提供了便利,同时林下植物的多分枝(或分蘖)现象也会提高植物的生产力^[33],提高了植物的固碳能力。

本研究中稀树灌草丛总的净初级生产力要低于喀斯特森林的净初级生产力($4.34 \text{ t C hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$)^[34]。相比之下,元江稀树灌草丛的净初级生产力是较低的,然而,元江干热河谷植被降水偏少,土层浅薄等严酷环境会影响植物的发育,间接影响到植被的固碳潜力^[35]。与其它区域稀树灌草丛相比,研究区稀树灌草丛的净初级生产力仅达到全球平均值($7.2 \text{ t C hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$)^[29]的一半左右。这主要是因为 Grace 等^[29]在综合全球稀树灌草丛净初级生产力的数据中,印度稀树灌草丛的净初级生产力普遍偏高(最高值达到 $22.8 \text{ t C hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$),拉高了全球的平均值,而印度这些稀树灌草丛多为热带雨林退化形成,其主要树种贡献了较高生产力。而与其它类型稀树灌草丛净初级生产力相比,元江稀树灌草丛的净初级生产力处于要远低于澳洲北部桉树为主要优势种的稀树灌草丛($11.0 \text{ t C hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$)^[36],由于桉树作为一种速生树种,具有较高的生产力,再加上澳洲北部较好的水分条件(平均年降雨量 1200—1400 mm)促进了澳洲稀树灌草丛较高的生产力;其值要高于非洲西部($2.2 \text{ t C hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$)^[37]和美国南部($2.22 \text{ t C hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$)^[26]稀树灌草丛的净初级生产力,更接近于南美洲稀树灌草丛的净初级生产力($3.9 \text{ t C hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$)^[38]。通过比较可以看出,元江稀树灌草丛具有一定的净初级生产力,其固碳潜力是不可忽视的。

5 结论

(1)元江稀树灌草丛植被的碳储量为 32.13 t C/hm^2 。乔木层碳储量为 26.70 t C/hm^2 ,主要树种间碳储量的分配不均匀。

(2)林下植被层碳储量为 5.44 t C/hm^2 ,其中灌木占 74.3%,草本层碳储量占 25.7%。

(3)元江稀树灌草丛植被总的净初级生产力为 $3.88 \text{ t C hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。林分中林下植被层的净初级生产力达到 46.92%。林分的地上部分净初级生产力所占比重较大(70.04%),但地下部分净初级生产力(29.96%)也较为明显。

(4)元江干热河谷区稀树灌草丛植被的碳储量和固碳潜力不可忽视,理应受到重视与保护。

致谢:中国科学院西双版纳热带植物园元江干热河谷生态站和中心实验室大力协助,刀万有、封乾元、刀新明帮助凋落物收集,特此致谢。

参考文献(References):

- [1] 胡会峰, 王志恒, 刘国华, 傅伯杰. 中国主要灌丛植被碳储量. 植物生态学报, 2006, 30(4): 539-544.
- [2] Zhang Y D, Gu F X, Liu S R, Liu Y C, Li C. Variations of carbon stock with forest types in subalpine region of southwestern China. Forest Ecology and Management, 2013, 300: 88-95.
- [3] Fang J Y, Chen A P, Peng C H, Zhao S Q, Ci L J. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998. Science, 2001, 292(5525): 2320-2322.
- [4] Zhao D S, Wu S H. Responses of vegetation distribution to climate change in China. Theoretical and Applied Climatology, 2014, 117(1/2): 15-28.
- [5] 《云南植被》编写组. 云南植被. 北京: 科学出版社, 1987.

- [6] 金振洲. 云南元江干热河谷半萨瓦纳植被的植物群落学研究. 广西植物, 1999, 19(4): 289-302.
- [7] 刘方炎, 朱华. 元江干热河谷植被数量分类及其多样性分析. 广西植物, 2005, 25(1): 22-25.
- [8] 刘方炎, 朱华, 施济普, 陈晓鸣. 元江干热河谷植物群落特征及土壤肥力研究. 应用与环境生物学报, 2007, 13(6): 782-787.
- [9] 沈蕊, 张建利, 何彪, 李峰, 张志明, 周睿, 欧晓昆. 元江流域干热河谷草地植物群落结构特征与相似性分析. 生态环境学报, 2010, 19(12): 2821-2825.
- [10] 朱华. 元江干热河谷肉质多刺灌丛的研究. 云南植物研究, 1990, 12(3): 301-310.
- [11] 金振洲, 欧晓昆. 干热河谷植被: 元江、怒江、金沙江、澜沧江. 昆明: 云南大学出版社, 云南科技出版社, 2000.
- [12] 宋富强, 曹坤芳. 元江干热河谷植物叶片解剖和养分含量特征. 应用生态学报, 2005, 16(1): 33-38.
- [13] 张树斌, 张教林, 曹坤芳. 干旱对干热河谷优势木本植物种子光能分配的影响. 云南大学学报: 自然科学版, 2014, 36(5): 774-780.
- [14] Zhang J L, Zhu J J, Cao K F. Seasonal variation in photosynthesis in six woody species with different leaf phenology in a valley savanna in southwestern China. *Trees*, 2007, 21(6): 631-643.
- [15] 张一平, 段泽新, 窦军霞. 岷江上游干暖河谷与元江干热河谷的气候特征比较研究. 长江流域资源与环境, 2005, 14(1): 76-82.
- [16] 黄宗胜, 喻理飞, 符裕红, 杨瑞. 茂兰退化喀斯特森林植被自然恢复中生态系统碳吸存特征. 植物生态学报, 2015, 39(6): 554-564.
- [17] 杨洪晓, 吴波, 张金屯, 林德荣, 常顺利. 森林生态系统的固碳功能和碳储量研究进展. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2005, 41(2): 172-177.
- [18] Santiago L S, Bonal D, De Guzman M E, Ávila-Lovera E. Drought survival strategies of tropical trees // Goldstein G, Santiago L S, eds. *Tropical tree physiology: adaptations and responses in a changing environment*. Cham: Springer International Publishing, 2016: 243-258.
- [19] Brunner I, Herzog C, Dawes M A, Arend M, Sperisen C. How tree roots respond to drought. *Frontiers in Plant Science*, 2015, 6: 547.
- [20] Farooq M, Wahid A, Kobayashi N, Fujita D, Basra S M A. Plant drought stress: effects, mechanisms and management. *Agronomy for Sustainable Development*, 2009, 29(1): 185-212.
- [21] 刘长成, 魏雅芬, 刘玉国, 郭柯. 贵州普定喀斯特次生林乔灌木地上生物量. 植物生态学报, 2009, 33(4): 698-705.
- [22] 林伟宏, 陈克明, 刘照光. 川西南干热河谷赤桉人工林生物量和营养元素含量. 山地研究, 1994, 12(4): 251-255.
- [23] 杨忠, 张建平, 王道杰, 张信宝. 元谋干热河谷桉树人工林生物量初步研究. 山地学报, 2001, 19(6): 503-510.
- [24] 郭永清. 云南干热河谷青桐人工林生态系统碳库特征[D]. 南京: 南京林业大学, 2010.
- [25] Lilienfein J, Wilcke W. Element storage in native, agri-, and silvicultural ecosystems of the Brazilian savanna. *Plant and Soil*, 2003, 254(2): 425-442.
- [26] Hughes R F, Archer S R, Asner G P, Wessman C A, McMuntry C, Nelson J, Ansley R J. Changes in aboveground primary production and carbon and nitrogen pools accompanying woody plant encroachment in a temperate savanna. *Global Change Biology*, 2006, 12(9): 1733-1747.
- [27] Ryan C M, Williams M, Grace J. Above- and belowground carbon stocks in a miombo woodland landscape of Mozambique. *Biotropica*, 2011, 43(4): 423-432.
- [28] Scheiter S, Higgins S I, Beringer J, Hutley L B. Climate change and long-term fire management impacts on Australian savannas. *New Phytologist*, 2015, 205(3): 1211-1226.
- [29] Grace J, José J S, Meir P, Miranda H S, Montes R A. Productivity and carbon fluxes of tropical savannas. *Journal of Biogeography*, 2006, 33(3): 387-400.
- [30] 张鹏超, 张一平, 杨国平, 郑征, 刘玉洪, 谭正洪. 哀牢山亚热带常绿阔叶林乔木碳储量及固碳增量. 生态学杂志, 2010, 29(6): 1047-1053.
- [31] Augusto L, Dupouey J L, Ranger J. Effects of tree species on understory vegetation and environmental conditions in temperate forests. *Annals of Forest Science*, 2003, 60(8): 823-831.
- [32] Zapack L, Engwald S, Sonke B, Achoundong G, Madong B A. The impact of land conversion on plant biodiversity in the forest zone of Cameroon. *Biodiversity & Conservation*, 2002, 11(11): 2047-2061.
- [33] Sah J P, Ross M S, Koptur S, Snyder J R. Estimating aboveground biomass of broadleaved woody plants in the understory of Florida Keys pine forests. *Forest Ecology and Management*, 2004, 203(1/3): 319-329.
- [34] 于维莲, 董丹, 倪健. 中国西南山地喀斯特与非喀斯特森林的生物量与生产力比较. 亚热带资源与环境学报, 2010, 15(2): 25-30.
- [35] 田汉勤, 徐小锋, 宋霞. 干旱对陆地生态系统生产力的影响. 植物生态学报, 2007, 31(2): 231-241.
- [36] Chen X Y, Hutley L B, Eamus D. Carbon balance of a tropical savanna of northern Australia. *Oecologia*, 2003, 137(3): 405-416.
- [37] Hanan N P, Kabat P, Dolman A J, Elbers J A. Photosynthesis and carbon balance of a Sahelian fallow savanna. *Global Change Biology*, 1998, 4(5): 523-538.
- [38] San José J J, Montes R A. Management effects on carbon stocks and fluxes across the Orinoco savannas. *Forest Ecology and Management*, 2001, 150(3): 293-311.