

滇中地区陆生主要灌丛生态系统碳汇分配格局特征

郭子豪¹, 陈伟², 陈钱炜³, 巩合德^{1*}

(1. 西南林业大学 地理与生态旅游学院, 云南 昆明 650244; 2. 西南林业大学 园林园艺学院, 云南 昆明 650244;
3. 西南林业大学 绿色发展研究院, 云南 昆明 650244)

摘要:伴随全球气候变化关注度提升,植物碳汇研究愈发得以重视,其中陆生灌丛植物在陆地生态系统碳汇研究中占据重要位置。采用样地调查法,对滇中地区不同样地的69个样方中12个主要灌丛生态系统生物量与有机碳密度的相关关系、分配格局、形成原因进行了研究。结果表明,灌丛的地上生物量(AGB)、地下生物量(UGB)和根冠比(R/S)分别介于1.13~2.03、0.62~1.49 t/hm²和0.38~0.84。群落和物种的地上、地下生物量的拟合斜率为异速分配生长关系,植被的根冠比数值较其他植被类型更小。灌丛碳密度、凋落物总碳密度、土壤有机碳密度和生态系统碳密度的均值分别为(60.43±22.12)、(25.60±7.32)、(24.71±20.06) t/hm²和(110.74±35.34) t/hm²。灌木层碳在根茎叶间分布含量差别不大,主要在茎部(35.57%),草本层碳主要分配在地下部分中(15.06%~60.45%)。年均温度(MAT)和年均降水(MAP)对生物量及根冠比的相关性没有影响。

关键词:滇中地区;灌丛植物;生物量;碳密度;环境因子;分配格局

中图分类号: S714

文献标志码: A

文章编号: 1001-7461(2022)06-0001-09

Characteristics of Carbon Sink Distribution Pattern of Terrestrial Main Shrub Ecosystem in Central Yunnan

GUO Zi-hao¹, CHEN Wei², CHEN Qian-wei³, GONG He-de^{1*}

(1. School of Geography and Ecotourism, Southwest Forestry University, Kunming 650244, Yunnan, China;
2. College of Landscape Architecture and Horticulture Science, Southwest Forestry University, Kunming 650244, Yunnan, China;
3. Green Development Research Institute, Southwest Forestry University, Kunming 650244, Yunnan, China)

Abstract: With the increasing concern to the global climate change, more and more attention has been paid to the researches on plant carbon sink, in which terrestrial shrub plants occupy an important position in the study of terrestrial ecosystem carbon sink. In this research, the correlation between biomass and organic carbon density, distribution pattern and formation causes of 12 main shrub ecosystems in 69 sampling points in different places in Central Yunnan were studied by sample plot investigation method. The results showed that the aboveground biomass (AGB), underground biomass (UGB) and root shoot ratio (R/S) of shrub were between 1.13–2.03 t/hm², 0.62–1.49 t/hm² and 0.38–0.84, respectively. The fitting slope of AGB and UGB between community and species was allometric growth, and the R/S of vegetation was smaller than that of other vegetation types. The mean values of shrub carbon density, total litter carbon density, soil organic carbon density and ecosystem carbon density were 60.43±22.12, 25.60±7.32, 24.7±20.06, and 110.74±35.34 t/hm², respectively. There was little differences in the distribution and content

收稿日期: 2021-09-19 修回日期: 2021-11-03

基金项目: 国家自然科学基金“气候变暖对哀牢山常绿阔叶林根际土壤碳过程的影响研究(31560189)”;国家科技基础性工作专项子项目“我国主要灌丛植物群落调查(2015FY110300)子课题”;“云南省灌丛植物群落调查(2015FY1103001-4)”。

第一作者: 郭子豪。研究方向: 自然地理学。E-mail: 2496851740@qq.com

* 通信作者: 巩合德, 博士后, 副教授, 硕士生导师。研究方向: 森林生态学和植物地理学。E-mail: gonghede3@163.com

of carbon in shrub layer between roots, stems and leaves, and it was mainly in stems (35.57%). The herbaceous carbon was mainly distributed in the underground part (15.06%—60.45%). Mean annual temperature and mean annual precipitation had no effect on the correlation between biomass and R/S.

Key words: Central Yunnan; shrub plant; biomass; carbon density; environmental factor; distribution pattern

灌丛是陆地植被生态系统的重要组成部分^[1-2], 总体面积近 $2 \times 10^8 \text{ hm}^2$ 。灌丛面积占云南全省面积的 24%, 碳储量占灌丛全部碳储量的 32.6%, 因此在全球气候变化背景下研究该区域灌丛碳汇储量与分配格局有利于对其生态系统进行综合分析并预测气候变化对灌丛生态系统的影响。

近年来, 国内外专家学者对陆生灌丛生态系统进行了大量的研究。聂秀青等^[3]得出地上与地下生物量之间呈幂函数关系, 根冠比与年均温度、年均降水量之间没有显著相关关系的结论。杨路存等^[4]认为金露梅灌丛灌木层、草本层碳主要分配在根部且土壤碳密度占比最大的规律。李典鹏等^[5]、杨敏等^[6]分别对盐湖区生态系统碳密度及祁连山中段土壤有机碳剖面进行调查后, 共同得出土壤有机碳含量空间变异性较低, 表层土占生物层总有机碳密度的 97.84%, 土壤有机碳密度分布随土层增加而降低的结论。但多数的研究集中在单一植物、灌木层植被的群落结构、生物量及表层土壤等方面^[7-8], 缺乏对主要物种及草本层、凋落物层的综合研究。本研究以滇中地区陆生主要灌丛生态系统为切入点, 从群落和物种 2 个层次分析探究其碳汇分配特征、形成原因及与气候因子的相关关系, 以期提供相关的理论依据和数据支撑^[9]。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

调查于 2020 年 6—9 月进行, 在综合考虑样地可操作性与代表性原则(灌丛类型、人为干扰、地域特点等)的基础上, 根据 1:1 000 000《中国植被图集》^[10]记载的灌木群落类型、面积和分布, 在云南省中部的 11 个县(市)中共布设了 23 个主要灌丛采样点(图 1a, $23^\circ 57' 45'' - 26^\circ 31' 36'' \text{ N}$, $101^\circ 1' 40'' - 104^\circ 16' 5'' \text{ E}$, 样地代码 Q1—Q23), 其中包含了主要灌丛植被类型共 12 个, 分别为矮杨梅(*Myrica nana*)、光叶高山栎(*Quercus pseudosemecarpifolia*)、铁仔(*Myrsine africana*)、余甘子(*Phyllanthus emblica*)、腺房杜鹃(*Rhododendron adenogynum*)、檵木(*Loropetalum chinense*)、白栎(*Quercus fabri*)、草原杜鹃(*Rhododendron telmateium*)、腋花杜鹃(*Rhododendron racemosum*)、马缨杜鹃(*Rhododendron delavayi*)、火棘(*Pyracantha fortuneana*)和竹叶椒(*Zan-*

thoxylum planispinum)。滇中地区土壤以砖红壤为主, 植被处于热带雨林和热带季雨林分布地区, 具有气候潮湿、淋溶作用强和酸性大的特点^[11]。

1.2 试验设计

参照以往试验设计采用类似的方法采集称重^[5,12]。设置样点时(图 1), 考虑后期采集样品的便捷性与准确性, 每块样点按照分布特征沿对角线设置 3 个间距 $5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ 的小样方, 并记录灌丛群落中灌木层和草本层信息; 在每个小样方中沿对角线方向随机挖 1 m 深的土钻 3 钻, 按深度分为 0~10、10~20、20~30、30~50、50~70 cm 和 70~100 cm 共 6 个土层。在每个小样方内随机选取 1 个 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 的代表样方, 收集记录灌丛群落物种土壤层信息。沿样点的另一对角线邻近 $5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ 小样方的位置随机设置 3 个 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 代表样方用于收集凋落物。将洗净并处理后的样品在 70° C 恒温箱中烘烤 48 h 至恒重后对植物和凋落物称重^[13]。年均温度和年均降水量数据取自世界气候数据网站(<http://www.worldclim.org/>)^[14]。

1.3 数据收集和计算

群落水平生物量 = 盖度 \times 样品干重; 样品碳密度 = 样品生物量 \times 调查层盖度 \times 各器官相应碳含量。土壤剖面有机碳密度 $S_{\text{OCD}} = \sum (1 - \theta_i) \times \rho_i \times C_i \times T_i / 100$ (S_{OCD} 为土壤剖面有机碳密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$), θ_i 为第 i 层砾石含量(体积分数), ρ_i 为第 i 层土壤容重 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$), C_i 为第 i 层土壤有机碳含量 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), T_i 为第 i 层土层厚度 (cm)), 最后将单位统一转换为 t / hm^2 ^[15-16]。群落地上、地下生物量的均值和根冠比, 群落和物种的地上生物量 ($\log \text{MA}$) 与地下生物量 ($\log \text{MB}$) 之间的关系等通过 Microsoft Excel 2105 软件计算, 依据斜率、截距、回归直线的斜率与 1 的差异, 判断显著性、线性关系以及生长关系^[17-18]。根据样地经纬度坐标结合全球气象网站中对温度与降水等气象资料的记载^[3], 对其进行薄板平滑样条函数插值后提取并计算出各采样点的年均温度和年均降水量。统计检验和绘图使用 IBM-SPSS Statistics 23 和 Origin 2019b 软件进行。

2 结果与分析

2.1 生物量分配方式

滇中地区陆生主要灌丛在对环境进行适应生长

过程中普遍将生物量分配于地下部分和根茎部分中,其中灌木层将生物量碳多储存在根和茎部,叶中最少;草本层的生物量多集中于地下部分;而凋落物层明显低于灌木层和草本层(表 1)。

群落水平上的根冠比数值低于物种水平但生物量数值(表 2),说明滇中地区陆生主要灌丛的生物

量多集中于地下部分,这可能与滇中地区光照强度较强雨水量较少的情况有关。排除自身物种特点因素,灌丛植物多数选择将用于生长发育的营养物质集中于地下部分以及根茎之中,防止因阳光暴晒或雨水不足造成的营养元素流失^[9,20-23]。

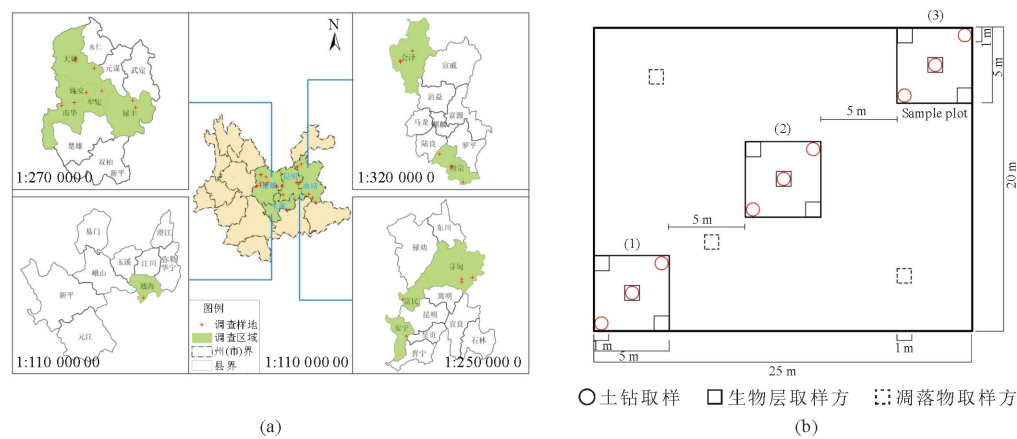


图 1 研究地点位置(a)与样地布设(b)

Fig.1 The location of the research site (a) and the layout of the sample plot (b)

表 1 滇中地区陆生主要灌丛群落生物量特征

样地代码	灌木层			草本层		凋落物层	生物层
	根	茎	叶	地下部分	地上部分		
Q1	0.70±10.38	0.65±7.97	0.50±6.91	0.60±5.60	0.53±4.66	0.01±0.55	2.99±6.01
Q2	0.62±11.81	0.64±5.22	0.49±3.01	/	/	0.01±0.27	1.76±3.39
Q3	0.68±11.90	0.65±3.70	0.65±16.57	0.68±1.24	0.64±10.40	0.01±0.10	3.30±7.32
Q4	0.61±6.78	0.61±8.03	0.52±5.99	0.62±0.00	0.57±0.00	0.01±0.15	2.94±3.49
Q5	0.63±8.35	0.63±8.35	0.56±3.93	0.14±0.00	0.81±0.00	0.02±1.03	2.80±3.61
Q6	0.66±7.52	0.62±3.95	0.51±2.29	0.14±0.00	0.12±0.00	0.01±0.18	2.06±2.32
Q7	0.75±4.51	0.69±5.72	0.45±3.18	0.62±11.30	0.49±8.67	0.01±0.08	3.00±5.58
Q8	0.62±2.94	0.58±9.38	0.52±4.54	0.55±13.77	0.44±10.54	0.02±0.67	2.72±6.97
Q9	0.56±4.21	0.56±2.84	0.54±2.81	0.56±0.00	0.58±0.00	0.01±0.35	2.81±1.70
Q10	0.57±5.12	0.57±28.29	0.54±2.69	0.51±3.95	0.55±16.50	0.01±0.10	2.74±9.44
Q11	0.76±6.20	0.78±3.24	0.69±3.98	0.51±1.97	0.39±11.71	0.01±0.04	3.14±4.52
Q12	0.62±2.79	0.64±4.72	0.56±8.73	0.59±6.45	0.52±1.65	0.01±0.10	2.94±4.07
Q13	0.78±7.31	0.77±4.56	0.54±2.91	0.61±9.81	0.42±5.95	0.01±0.12	3.13±5.11
Q14	0.71±3.23	0.76±17.28	0.52±3.47	0.59±5.68	0.40±9.40	0.01±0.05	2.970±6.52
Q15	0.60±4.06	0.68±8.26	0.52±8.12	0.42±1.10	0.21±3.21	0.02±0.21	2.44±4.16
Q16	0.61±5.87	0.69±6.39	0.47±1.97	0.38±15.32	0.39±3.58	0.02±0.26	2.55±5.57
Q17	0.70±5.45	0.80±6.13	0.66±0.97	0.54±9.10	0.49±6.83	0.02±0.33	3.22±4.80
Q18	0.62±0.77	0.65±1.31	0.57±5.54	0.42±11.38	0.33±7.65	0.03±0.23	2.63±4.48
Q19	0.55±5.49	0.65±2.26	0.34±2.69	0.62±7.32	0.43±3.54	0.04±0.13	2.62±3.57
Q20	0.71±6.21	0.75±5.50	0.78±4.65	0.50±6.07	0.51±6.45	0.03±0.12	3.28±4.83
Q21	0.65±8.66	0.75±6.07	0.56±6.64	0.37±6.21	0.30±6.94	0.03±0.06	2.67±5.76
Q22	0.75±6.63	0.83±2.26	0.54±8.17	0.63±6.40	0.43±12.33	0.03±0.05	3.20±5.97
Q23	0.79±2.73	0.66±3.59	0.60±13.82	0.70±1.79	0.62±6.75	0.03±0.07	3.40±4.79

注:/代表未采集到样本。

表 2 滇中地区陆生主要灌丛地上生物量、地下生物量和根冠比

Table 2 Aboveground biomass, Underground biomass and R/S of main shrubs in Central Yunnan

t/hm²

层次	生物量与根冠比	样本量	最小值	最大值	平均值	中值
群落	地上生物量(AGB)	69	1.13	2.03	1.67	1.67
	地下生物量(UGB)	69	0.62	1.49	1.15	1.21
	根冠比(R/S)	69	0.38	0.84	0.69	0.70
物种	地上生物量(AGB)	78	0.98	1.67	1.28	1.24
	地下生物量(UGB)	78	0.57	0.82	1.86	0.70
	根冠比(R/S)	78	1.37	2.34	0.69	1.88

群落水平($R^2=0.367$,图 2a)的生物量分配拟合效果高于物种水平($R^2=0.194$,图 2b)(表 3),拟合回归直线的斜率为 0.422(95%置信区间为 0.170~0.674),与 1 具有极显著性差异($P<0.01$),表明滇中地区主要灌丛群落地上与地下生物

量的分配符合异速分配理论。物种水平拟合回归曲线的斜率为 0.586(95%置信区间为 0.083~1.088),与 1 具有极显著性差异($P<0.01$),表明滇中地区陆生主要灌丛群落和物种的地上和地下生物量的分配都符合异速生长理论。

表 3 滇中地区陆生主要灌丛群落与物种地上和地下生物量的分配层次

Table 3 Distribution levels of aboveground and Below-ground biomass of main shrub communities and species in Central Yunnan

层次	种名	样本量	R^2	斜率	95%置信区间	截距
群落		23	0.367	0.422	0.170~0.674	0.195
物种		64	0.194	0.586	0.083~1.088	0.199
	矮杨梅(<i>Myrica nana</i>)	23	0.162	0.456	-0.014~0.927	0.170
	亮叶高山栎(<i>Quercus pseudosemecarpifolia</i>)	3	0.150	0.091	-2.667~2.849	0.225
	铁仔(<i>Myrsine africana</i>)	5	0.354	-0.327	-1.139~0.484	-0.007
	余甘子(<i>Phyllanthus emblica</i>)	3	0.036	-0.095	-6.383~6.193	0.155
	腺房杜鹃(<i>Rhododendron adenogynum</i>)	3	0.027	-0.115	-8.862~8.631	0.048
	欆木(<i>Loropetalum chinense</i>)	3	0.942	0.875	-1.876~3.626	0.154
	白栎(<i>Quercus fabri</i>)	3	0.051	0.500	-27.010~28.010	0.195
	草原杜鹃(<i>Rhododendron telmateium</i>)	3	0.001	0.019	-6.329~6.368	0.166
	腋花杜鹃(<i>Rhododendron racemosum</i>)	6	0.049	-0.185	-1.313~0.943	0.036
	马缨杜鹃(<i>Rhododendron delavayi</i>)	3	0.750	-3.000	-25.008~19.008	-0.330
	火棘(<i>Pyracantha fortuneana</i>)	3	0.429	0.410	0.867~0.545	0.149
	竹叶椒(<i>Zanthoxylum planispinum</i>)	6	0.794	0.703	0.207~1.199	0.190

欆木($R^2=0.875$,图 2h)、马缨杜鹃($R^2=0.750$,图 2l)、火棘($R^2=0.429$,图 2m)和竹叶椒($R^2=0.794$,图 2n)的拟合效果好于矮杨梅($R^2=0.162$,图 2c)、亮叶高山栎($R^2=0.150$,图 2d)、铁仔($R^2=0.354$,图 2e)、余甘子($R^2=0.036$,图 2f)、腺房杜鹃($R^2=0.027$,图 2g)、白栎($R^2=0.051$,图 2i)、草原杜鹃($R^2=0.001$,图 2j)和腋花杜鹃($R^2=0.049$,图 2k)。其中欆木拟合回归直线的斜率为 0.875(95%置信区间为-1.876~3.626),拟合斜率与 1 没有显著差异($P>0.05$),表明其地上与地下生物量的分配符合等速分配理论。铁仔(95%置信区间为-1.139~0.484, $P<0.01$)、余甘子(95%置信区间为-6.383~6.193, $P<0.01$)、腺房杜鹃(95%置信区间为-8.862~8.631, $P<0.01$)、腋花杜鹃(-1.313~0.943, $P<0.01$)和马缨杜鹃(95%置信区间为-25.008~19.008, $P<0.01$)的斜率为负值,分配方式为异速分配。

年均温度、年均降水量、根冠比与地上部分生物量、地下部分生物量之间的差异均不显著($P>0.05$)(图 3),表明气温与降水与滇中地区主要灌丛生物量二者直接并没有显著关系,即影响生物量分配格局的不是气温与降水。

2.2 碳密度分配格局

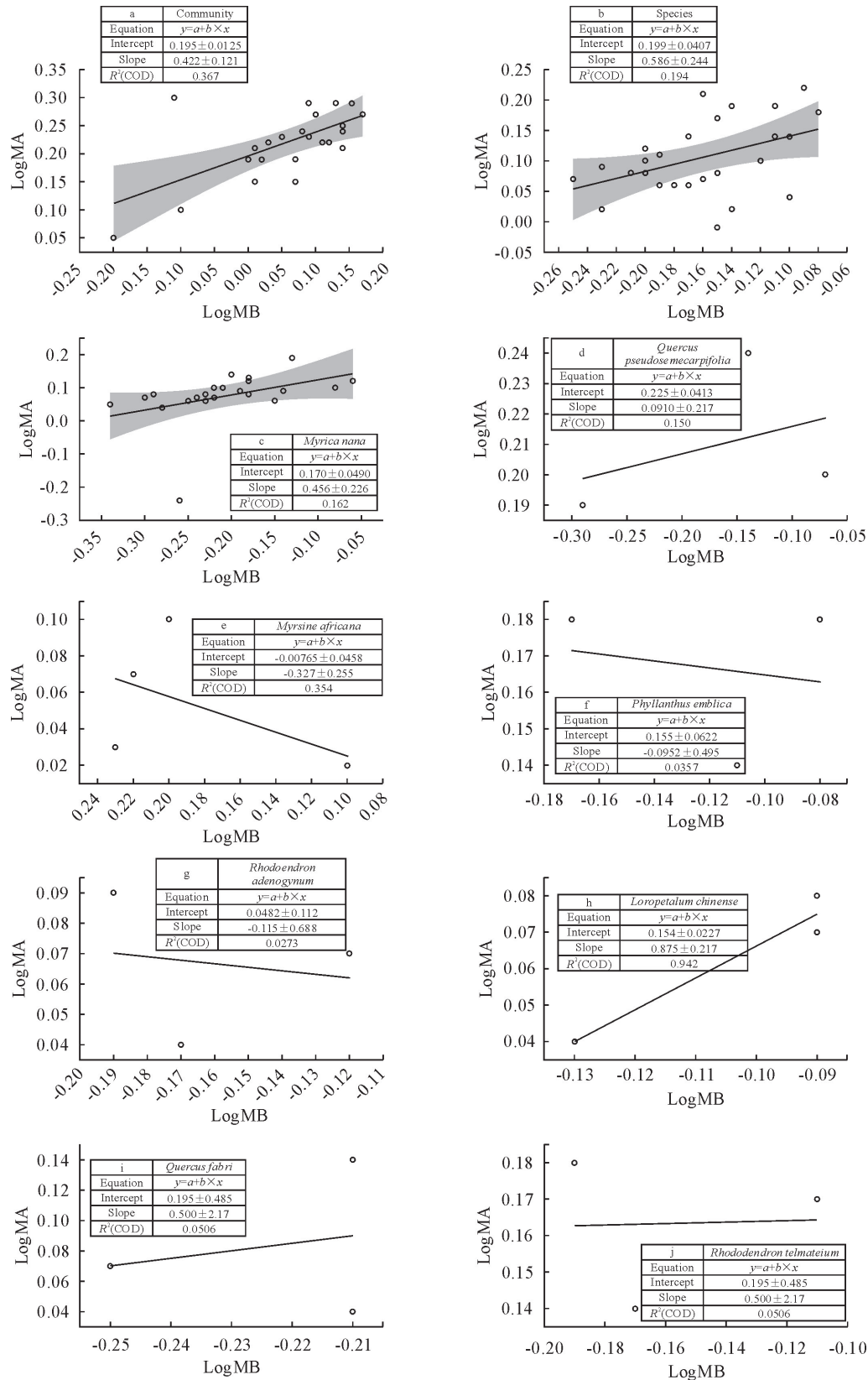
灌木层碳储量最丰富,碳密度空间分布序列表现为植被层大于凋落物层大于土壤层、灌木层大于草本层、灌木层中的茎大于根大于叶。由表 4 可知,灌木层各器官平均含碳率表现为叶(88.56%)>根(69.45%)>茎(68.45%);草本层、凋落物层含碳率分别为 84.91%和 52.51%,草本层含碳率最高,且地上部分(99.32%)高于地下部分(70.50%);凋落物的平均含碳率相对最小;不同样地间灌木层含碳率存在差异极显著的特征($P<0.01$)。

土壤层含碳率介于 0.10%~32.78%(表 5)。表层土壤含碳率高于深层土壤,且含碳率随土壤深

度增加而减小,垂直分布特征较为明显。

不同样地间灌木层碳密度 Q1 最小,Q17 最大(表 6),差异极显著($P<0.01$);平均碳密度为 $(48.11\pm15.79)\text{t}/\text{hm}^2$,在其生态系统中占有率最高,最低为 Q1(25.10%),最高为 Q2(65.47%),灌木层碳占其生态系统总碳密度的 43.44%,且根茎

叶中的分布含量差别不大,主要在茎部(35.57%)。草本层碳主要分布在地下部分(15.06%~60.45%),Q6 最小 Q14 最大,差异极显著($P<0.01$),平均碳密度为 $(12.32\pm9.43)\text{t}/\text{hm}^2$;地上和地下部分的平均值分别为 $(5.96\pm4.41)\text{t}/\text{hm}^2$ 和 $(6.37\pm5.27)\text{t}/\text{hm}^2$,占生态系统碳密度的比例最低为 Q6(0.32%)



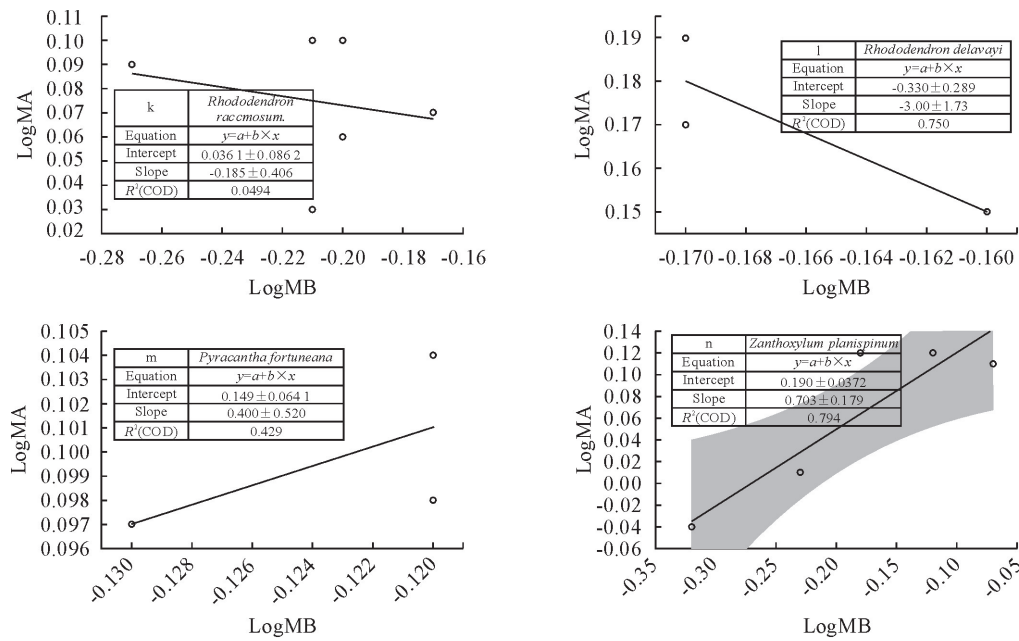
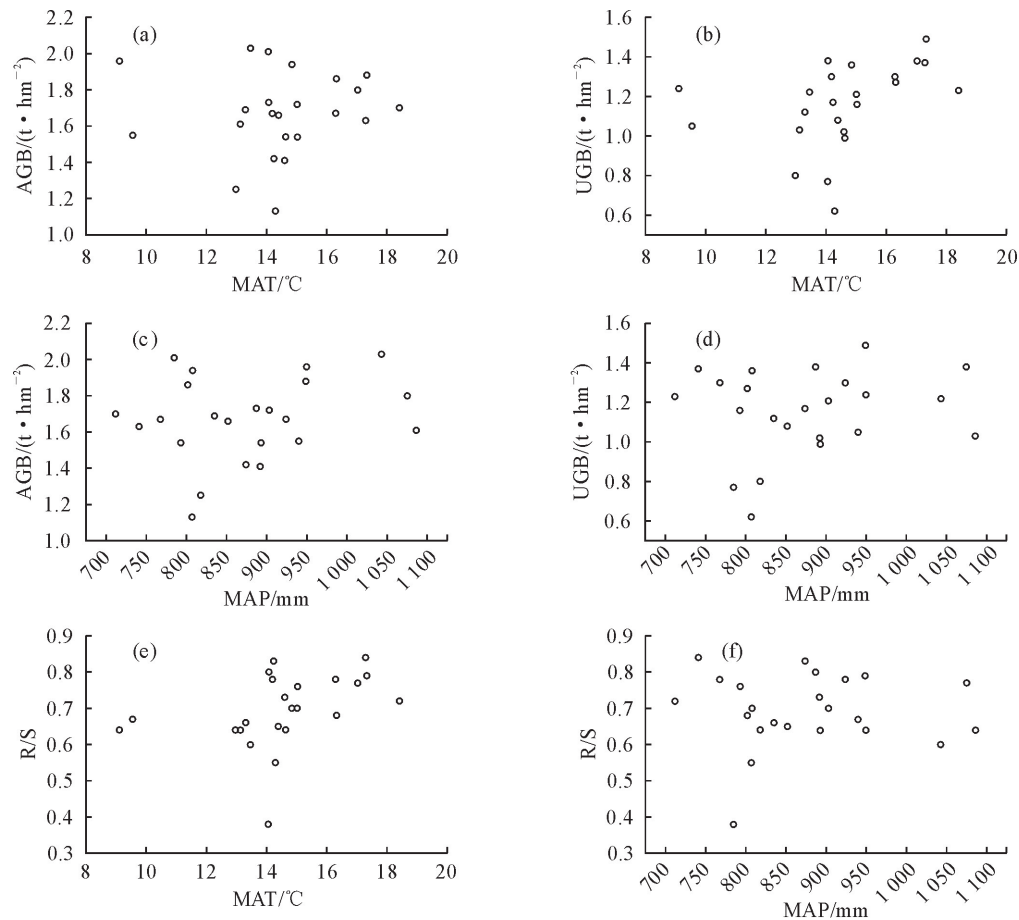


图2 滇中地区陆生主要灌丛地上生物量(LogMA)与地下生物量(LogMB)分配关系

Fig. 2 Distribution relationship between aboveground biomass (LogMA) and underground biomass (LogMB) of main terrestrial shrubs in Central Yunnan



注: MAT: 年均温度; MAP: 年均降水量。

图3 滇中地区陆生主要灌丛地上生物量(AGB)、地下生物量(UGB)、根冠比(R/S)与气候因素之间的关系

Fig. 3 Relationship between aboveground biomass (AGB), underground biomass (UGB), root shoot ratio (R/S) and climate factors of main shrubs in Central Yunnan

表 4 滇中地区陆生主要灌丛植物生物层含碳率

Table 4 Carbon contents of main shrub plants in Central Yunnan %

样地 代码	灌木层			草本层		凋落 物层
	根	茎	叶	地下部分	地上部分	
Q1	62.48	68.52	91.30	50.18	73.03	33.60
Q2	75.99	74.03	99.45	/	/	38.40
Q3	66.37	69.58	72.45	50.43	66.41	38.63
Q4	74.40	73.00	92.20	63.14	71.00	35.17
Q5	73.77	73.77	87.69	320.89	52.32	51.62
Q6	70.71	75.91	96.25	249.82	314.96	64.55
Q7	61.20	66.40	110.90	54.46	83.92	35.10
Q8	76.12	81.61	95.20	68.68	97.47	66.70
Q9	82.09	82.16	89.40	46.49	78.37	43.63
Q10	82.80	82.27	91.98	81.79	79.57	44.85
Q11	59.76	57.60	68.47	79.80	110.36	37.26
Q12	73.65	72.03	85.47	64.92	82.76	41.88
Q13	60.13	60.55	91.47	59.01	101.32	63.61
Q14	64.83	60.44	92.34	54.25	99.82	46.41
Q15	73.07	66.13	86.67	72.88	183.97	90.46
Q16	75.59	66.17	99.51	98.88	94.44	46.37
Q17	65.99	59.48	73.60	77.30	85.33	49.14
Q18	73.86	72.11	83.48	88.90	119.60	76.69
Q19	73.81	65.91	122.53	52.80	77.37	44.33
Q20	65.56	63.38	63.55	70.90	83.32	49.69
Q21	67.50	59.77	81.60	95.97	131.26	63.06
Q22	59.29	53.43	81.35	60.69	97.45	26.20
Q23	58.27	70.07	79.98	54.69	66.76	49.92

注:/表示未采集到样本。下表同。

最高为 Q4(31.22%)。凋落物层碳密度 Q8 最小 Q11 最大,差异极显著($P<0.01$),平均为 $(25.60\pm 7.32)\text{t}/\text{hm}^2$ 。土壤有机碳密度 Q11 最低,Q18 最高,平均为 $(24.71\pm 20.06)\text{t}/\text{hm}^2$,差异极显著($P<0.01$)。年均温度和降水量与土壤有机碳密度都存在显著性相关关系($P<0.01$)(图 4)。年均温度与土壤有机碳密度呈负显著相关,与李典鹏等^[5]提出的结论一致;年均降水与以往的研究结果不同呈正显著相关。影响土壤有机碳的因素众多,自然因素被认为对土壤影响最大^[24-25],降水增多使土壤有机碳积累,温度增加使土壤碳汇能力降低,导致灌丛将生物量集中于根茎和草本层地上部分。

3 结论与讨论

3.1 生物量分布格局及分配方式

地上和地下生物量在建立对数转化后拟合斜率分别为 0.422 和 0.586,与 1 差异显著,均为异速分配模式,说明植被在群落和物种水平上的生长关系是相同的,这与聂秀清等^[17]、马安娜等^[26]得出的结果存在差异,其原因可能与滇中地区温度干湿度等条件差异不明显,因而植物在生长过程中不需要将

表 5 滇中地区陆生主要灌丛土壤含碳率

Table 5 Carbon contents of main shrub soil in Central Yunnan %

样地 代码	土层深度/cm					
	0~10	10~20	20~30	30~50	50~70	70~100
Q1	1.07	0.61	0.44	0.62	/	/
Q2	0.67	0.42	0.26	0.17	/	/
Q3	0.13	0.41	0.36	0.27	/	/
Q4	0.67	0.35	0.35	0.22	/	/
Q5	1.45	0.56	0.32	0.16	0.19	0.14
Q6	6.44	1.81	0.74	0.60	0.47	0.45
Q7	0.77	0.56	0.44	0.32	0.26	0.28
Q8	3.29	1.55	0.65	0.28	/	/
Q9	1.14	0.50	0.36	0.20	/	/
Q10	0.92	0.43	0.21	0.10	0.12	/
Q11	0.36	0.23	0.23	0.27	/	/
Q12	3.87	1.80	1.59	1.64	1.72	1.41
Q13	1.16	0.84	0.64	0.32	/	/
Q14	2.47	0.95	0.71	0.40	/	/
Q15	2.54	1.16	1.13	1.10	0.86	0.98
Q16	1.12	0.99	0.54	0.46	0.31	0.30
Q17	32.78	27.89	32.28	/	/	/
Q18	22.00	13.64	15.09	9.03	/	/
Q19	1.05	0.67	0.44	0.21	/	/
Q20	3.25	1.12	0.74	0.48	0.40	/
Q21	4.48	1.87	1.19	0.85	0.85	0.63
Q22	3.69	3.53	3.92	/	/	/
Q23	0.59	0.83	0.29	0.21	/	/

过多的营养集中在特定位置优先发育。仅对物种水平分配方式考虑而忽略群落水平,会因物种情况存在差异不确定性影响群落水平研究结果进而影响准确度,之前研究中应用的将物种水平生物量分配特征试验结论直接外推至群落水平的方法并不完全准确,因此应在物种和群落 2 个水平上探究生物量的分配方式。滇中地区主要灌丛物种的地上和地下生物量在建立对数转化后,拟合斜率与 1 差异均为显著且均为异速分配,说明生物量的相关性关系与拟合情况关联性不大^[18]。群落根冠比值小于高寒地区灌丛、中国草地和森林灌丛但高于中国东北部森林灌丛^[23,26-27],但对植被分配关系的影响大于其拟合斜率的显著性差异的影响。群落和个体水平同为异速分配,其原因可能与区域内相似纬度及气候因子作用于不同的植物,导致在分配格局上存在相同效果的可能性增加有关。之前相关研究显示,温度因子与植被地上和地下生物量并没有显著关系,而地上与地下生物量会随着年均降水量的增加而增加^[28-29],这与本研所得地上、地下生物量与降水量没有显著关系的结果相悖,可能是由于滇中地区灌丛区域独特的气候特征导致的,该区域年均降水

表 6 滇中地区陆生主要灌丛生态系统各组分碳密度及其分配格局(平均值±标准差)

Table 6 Carbon density and distribution pattern of each component of the main shrub ecosystem in Central Yunnan(mean±standard deviation)

样地 代码	灌木层			草本层		凋落物层	土壤层	生物层	生态系统
	根	茎	叶	地下部分	地上部分				
Q1	7.32±2.59	6.60±1.83	5.37±1.76	4.07±1.83	4.89±2.85	34.05±12.70	14.56±0.09	62.30±10.30	76.86±9.31
Q2	19.05±5.67	19.38±7.28	15.38±5.36	/	/	19.61±7.55	8.77±0.07	73.42±22.24	82.19±20.42
Q3	10.29±5.17	12.43±6.82	11.53±7.09	1.56±0.42	1.31±0.26	28.58±3.95	7.84±0.09	65.70±13.65	73.54±13.30
Q4	10.27±5.01	10.28±5.30	9.52±4.94	14.75±0.00	13.84±0.00	21.15±1.99	11.78±0.11	79.81±3.90	91.59±7.25
Q5	15.12±3.08	15.96±4.34	14.75±4.37	1.83±0.00	10.32±0.00	32.08±6.40	9.03±0.11	90.06±13.83	99.09±15.03
Q6	13.47±7.46	12.63±7.00	10.44±5.77	0.16±0.00	0.12±0.00	21.28±6.05	29.66±0.18	58.10±14.86	87.76±13.62
Q7	10.28±5.57	9.63±5.48	6.69±3.33	1.54±0.78	1.44±0.67	35.05±2.09	22.97±0.12	64.63±13.57	87.60±11.77
Q8	11.66±3.57	11.02±4.66	10.42±3.55	2.39±0.28	2.33±0.61	14.65±0.97	15.88±0.17	52.47±11.76	68.35±10.21
Q9	14.78±8.49	14.01±7.24	14.21±7.12	2.15±0.00	4.01±0.00	29.93±2.24	8.14±0.03	79.09±15.25	87.23±15.38
Q10	17.51±4.62	16.45±11.37	17.85±5.58	1.54±0.40	2.01±1.15	21.74±1.95	11.85±0.13	77.10±19.90	88.95±18.25
Q11	10.23±0.65	10.63±0.57	9.64±0.13	3.76±0.63	3.10±1.26	41.86±0.97	7.40±0.06	79.22±14.58	86.62±15.07
Q12	19.26±9.30	20.03±9.64	19.84±10.18	6.25±2.90	5.91±2.30	40.48±3.54	38.83±0.20	111.77±19.31	150.60±16.74
Q13	10.16±3.80	10.00±3.39	7.38±2.75	4.54±3.35	3.53±2.29	26.09±0.39	17.88±0.20	61.70±8.86	79.58±7.76
Q14	22.24±5.27	22.61±6.95	16.83±3.86	4.87±1.96	4.46±3.05	31.43±8.05	16.31±0.20	102.44±21.46	118.75±20.12
Q15	14.11±8.43	15.74±8.70	13.89±9.67	3.70±0.61	2.36±0.77	15.98±0.77	31.18±0.16	65.78±15.95	96.96±14.38
Q16	17.71±1.50	20.17±3.14	13.74±2.00	7.46±3.39	6.31±0.94	23.87±2.34	13.72±0.05	89.26±16.00	102.98±15.50
Q17	24.06±2.28	27.84±2.34	23.84±0.09	8.82±1.88	8.08±1.35	24.44±1.15	73.46±0.11	117.08±26.14	190.54±27.11
Q18	20.56±0.45	21.66±0.44	19.59±1.60	9.80±3.56	7.86±2.24	17.25±2.00	78.31±0.14	96.72±20.91	175.03±26.94
Q19	19.28±2.48	23.89±1.06	11.75±0.85	10.95±1.98	8.53±2.18	20.33±1.81	13.93±0.12	94.73±16.51	108.66±16.21
Q20	22.70±0.40	24.06±1.25	26.14±1.65	11.15±3.96	10.62±1.77	23.45±3.74	26.00±0.31	118.12±23.72	144.12±21.34
Q21	19.74±3.52	22.70±1.58	17.53±2.04	9.80±3.34	8.48±3.06	18.56±2.20	35.54±0.25	96.81±19.59	132.35±17.02
Q22	23.75±2.35	26.21±0.34	16.62±2.46	15.47±2.05	10.12±3.90	26.24±2.83	60.61±0.11	118.41±19.17	179.02±18.96
Q23	25.14±1.26	21.12±0.46	19.82±4.33	19.88±7.22	17.40±7.16	20.59±1.09	14.65±0.15	123.95±18.79	138.60±19.95

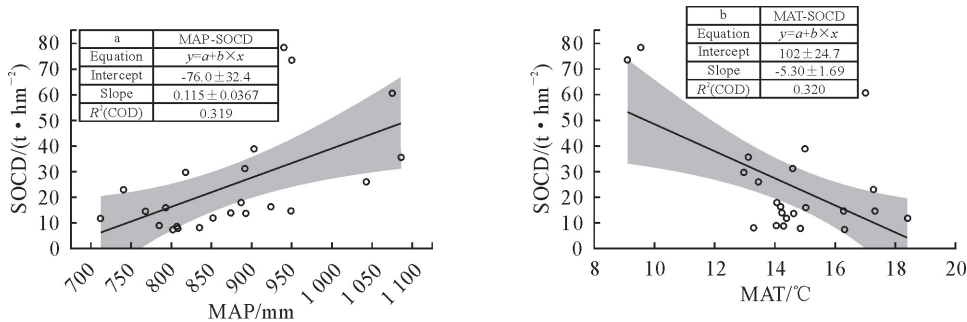


图 4 滇中地区陆生主要灌丛土壤有机碳密度(SOCD)与年均温度(MAT)、年均降水(MAP)的相关性
Fig. 4 Correlation between soil organic carbon density of main shrubswith average annual temperature(MAT) and average annual precipitation (MAP) in Central Yunnan

量为 875.52 mm,年均温度为 14.5 ℃,适宜的生长环境可能导致了植被地上与地下部分在生长过程中没有依赖降水因子作用,使得地上地下生物量的相关性不显著。高原高海拔灌丛在形成过程中会通过将生物量分配到地下部分以获得最大的生长速率以实现对气候的适应,滇中地区植被的根冠比更小,与滇中地区日照充足降雨较少,灌丛根系较地上部分更为发达有关,即植被为完成碳汇实现最大生长速率会向地下部分分配更多营养物质。

3.2 碳含率及碳密度分配格局

植物各器官含碳率存在差异,表现为灌木层叶(39.03%)>根(30.72%)>茎(30.25%),草本层(84.91%),凋落物层最小(52.51%)。土壤剖面采样有机碳含量不高,多集中在灌木层和草本层。研究发现个别样地(Q5、Q6、Q11、Q13、Q15、Q18、Q21)草本层的含碳率集中于地上部分过高,这可能与草本层易受干扰有关。滇中地区特殊的气候条件使灌丛植被在进行碳汇活动时选择将其固定到植物

体内,计算时如忽略深层土壤碳库对生物层做出的贡献,缺乏对深层土壤碳库储量和灌丛植物整体影响的考虑,则会在计算时整体碳密度时偏低。

碳密度能够反映出植物的生长状态^[30],本研究中灌丛生物层碳密度大于生物层及土壤层但小于全国尺度估值^[1],差异的形成有2点:一是滇中地区灌丛各层生物量较小,且多选择将营养物质储存在灌木层叶和草本层地上部分,因此计算结果与其他类型灌丛数据存在差异;二是采样点分布多位于中上部及山顶位置,一些植物受高海拔条件影响地上生物积累较低。灌木层碳密度远大于草本层及凋落物层,灌木层中茎高于叶,与根数值近似,表明灌丛茎和根部固碳能力较强。叶部碳含量固定能力较低,作为固碳最多的器官消耗得也最大,说明在滇中地区灌丛多将营养物质集中于其根部以应干旱和强日照等环境变化。

参考文献:

- [1] 胡会峰,王志恒,刘国华,等. 中国主要灌丛植被碳储量[J]. 植物生态学报,2006(4):539-544.
HU H F, WANG Z H, LIU G H, *et al.* Vegetation carbon storage of major shrublands in China[J]. Journal of Plant Ecology, 2006(4):539-544. (in Chinese)
- [2] 张笑鹤,张远东,顾峰雪,等. 西南地区灌丛归一化植被指数动态及其与气候因子的相关性[J]. 生态学报,2011,30(11):2577-2583.
ZHANG X H, ZHANG Y D, GU F X, *et al.* Dynamics of shrubs normalized difference vegetation index and its correlations with climatic factors in Southwest China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2011,30(11):2577-2583. (in Chinese)
- [3] 聂秀青,熊丰,李长斌,等. 青藏高原高寒灌丛生态系统草本层生物量分配格局[J]. 生态学报,2018,38(18):6664-6669.
NIE X Q, XIONG F, LI C B, *et al.* Biomass allocation relationships in the grass layer in alpine shrubland ecosystems on the Tibetan Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018,38(18):6664-6669. (in Chinese)
- [4] 杨路存,李长斌,宁伟,等. 青海高寒金露梅灌丛碳密度及其分配格局[J]. 植物生态学报,2017,41(1):62-70.
YANG L C, LI C B, NING Y, *et al.* Carbon density and its spatial distribution in the *Potentilla fruticosa* dominated alpine shrub in Qinghai, China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2017,41(1):62-70. (in Chinese)
- [5] 李典鹏,孙涛,姚美思,等. 盐湖区生态系统碳密度及其分配格局[J]. 干旱区研究,2018,35(4):984-991.
LI D P, SUN T, YAO M S, *et al.* Carbon density and its distribution pattern of ecosystem in saline region[J]. Arid Zone Research, 2018,35(4):984-991. (in Chinese)
- [6] 杨敏,杨飞,杨仁敏,等. 祁连山中段土壤有机碳剖面垂直分布特征及其影响因素[J]. 土壤,2017,49(2):386-392.
YANG M, YANG F, YANG R M, *et al.* Profile vertical distribution modes of SOC and influential factors in Qilian Mountains[J]. Soils, 2017,49(2):386-392. (in Chinese)
- [7] 王启基,周兴民,张堰青,等. 青藏高原金露梅灌丛的结构特征及其生物量[J]. 西北植物学报,1991,11(4):333-340.
WANG Q J, ZHOU X M, ZHANG Y Q, *et al.* Structure characteristics and biomass of *Potentilla fruticosa* shrub in Qinghai-Xizang Plateau[J]. Acta Bot. Boreal.-Occident. Sin., 1991,11(4):333-340. (in Chinese)
- [8] 杨路存,钟泽兵,刘何春,等. 高寒山生柳灌丛的群落特征研究[J]. 植物研究,2013,33(6):653-658.
YANG L C, ZHONG Z B, LIU H C, *et al.* Community characteristics of alpine shrub *Salix oritrepha* [J]. Bulletin of Botanical Research, 2013,33(6):653-658. (in Chinese)
- [9] NIKLAS K J. Modelling below- and aboveground biomass for non-woody and woody plants [J]. Annals of Botany, 2005,95:315-321.
- [10] 中国科学院中国植被图编辑委员会. 中国植被图集 1:1000000[M]. 北京:科学出版社,2001.
- [11] 楚梦玮,侯巍楹,净婷菲,等. 云南省深层土壤有机碳的估算及其影响因素分析[J]. 云南农业大学学报:自然科学,2021,36(3):516-523.
CHU M W, HOU W Y, JING T F, *et al.* Estimation of deep soil organic carbon in Yunnan Province and its influencing factors[J]. Journal of Yunnan Agricultural University: Natural Science, 2021,36(3):516-523. (in Chinese)
- [12] 薛飞,龙翠玲,廖全兰,等. 喀斯特森林凋落物对土壤养分及土壤酶的影响[J]. 森林与环境学报,2020,40(5):449-458.
XUE F, LONG C L, LIAO Q L, *et al.* An analysis of litter, soil, stoichiometry, and soil enzymes in Karst forest[J]. Journal of Forest and Environment, 2020,40(5):449-458. (in Chinese)
- [13] 苏凯文,陈路红,郑伟,等. 云南杨梅碳、氮、磷化学计量特征[J]. 植物生态学报,2017,41(1):136-146.
SU K W, CHEN L H, ZHENG W, *et al.* Carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry of *Myrica nana* in Yunnan, China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2017,41(1):136-146. (in Chinese)
- [14] 聂秀青. 青海省灌丛生态系统碳储量评估及影响因素分析[D]. 西宁:中国科学院西北高原生物研究所,2019.
- [15] VELDKAMP E. Organic carbon turnover in three tropical soils under pasture after deforestation[J]. Soil Science Society of American Journal, 1994,58:175-180.
- [16] 郝文芳,陈存根,梁宗锁,等. 植被生物量的研究进展[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2008,36(2):175-182.
HAO W F, CHEN C G, LIANG Z S, *et al.* Research advances in vegetation biomass[J]. Journal of Northwest A&F University: Nat. Sci. Ed., 2008,36(2):175-182. (in Chinese)
- [17] 聂秀青,杨路存,李长斌,等. 三江源地区高寒灌丛生物量空间分布格局[J]. 应用与环境生物学报,2016,22(4):538-545.
NIE X Q, YANG L C, LI C B, *et al.* Patterns of biomass partitioning across alpine shrubs in the Three-river Source Region[J]. China J. Appl Environ Biol., 2016,22(4):538-545. (in Chinese)

- Chinese)
- [22] 徐田,王洋,马婷,等. 油橄榄杂交种实特性初步研究[J]. 西部林业科学, 2020, 49(4): 130-135.
- XU T, WANG Y, MA T, *et al.* Preliminary study on the characteristics of hybrid seeds of *Olea europaea* L. [J]. Journal of West China Forestry Science, 2020, 49(4): 130-135. (in Chinese)
- [23] ARNOLD M L. Natural hybridization as an evolutionary process [J]. Annual Review of Ecology & Systematics, 1992, 23: 237-261.
- [24] 马婷,宁德鲁,张艳丽,等. 油橄榄种质资源特性记载规范: DB53/T 542-2013[S]. 昆明: 云南省质量技术监督局, 2013: 1-10.
- [25] 陈海云,耿树香,宁德鲁,等. 不同品种及成熟度油橄榄中脂肪酸的检测分析[J]. 广东农业科学, 2012, 39(24): 111-113, 117.
- CHEN H Y, GENG S X, NING D L, *et al.* Detection and analysis of major fatty acids in olive oil of different olive varieties and different mature degree [J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2012, 39(24): 111-113, 117. (in Chinese)
- [26] 陈莉,黄先寒,兰国玉,等. 中国橡胶林下植物物种组成与多样性分析[J]. 西北林学院学报, 2019, 34(2): 76-83.
- CHEN L, HUANG X H, LAN G Y, *et al.* Undergrowth plant species composition and diversity of rubber plantations in China [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2019, 34(2): 76-83. (in Chinese)
- [27] 杨义,羊倩,郜文慧,等. 72 个鸢尾品种表型性状多样性分析[J]. 安徽农业大学学报, 2020, 47(4): 599-605.
- YANG Y, YANG Q, GAO W H, *et al.* Morphological diversity analysis of 72 *Iris* cultivars [J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2020, 47(4): 599-605.
- [28] 朱亚艳,任世超,徐嘉娟,等. 顶坛花椒结实性状表型多样性分析[J]. 西北林学院学报, 2016, 31(6): 140-145.
- ZHU Y Y, REN S C, XU J J, *et al.* Phenotypic diversity of fruit bearing characters in *Zanthoxylum planispinum* var. *dingtanensis* [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2016, 31(6): 140-145. (in Chinese)
- [29] 张罡,崔建国,邸爽,等. 不同品种杂交榛果实表型性状的变异研究[J]. 西北林学院学报, 2010, 25(6): 75-78.
- ZHANG G, CUI J G, QIU S, *et al.* Variations of phenotypic characteristics of fruits of different hybrid hazelnut varieties [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2010, 25(6): 75-78. (in Chinese)
- [30] 闫辉强,后春静,马君义,等. 不同品种和成熟度的油橄榄果表型性状与脂肪酸组成及含量分析[J]. 中国油脂, 2019, 44(4): 105-111.
- YAN H Q, HOU C J, MA J Y, *et al.* Phenotypic character and fatty acid composition and content of olive fruit in different varieties and maturity [J]. China Oils and Fats, 2019, 44(4): 105-111. (in Chinese)
- [31] 陈毅琼,刘玉林,杨途熙,等. 杏 16 个主要农艺性状的多元统计分析[J]. 西北林学院学报, 2015, 30(5): 151-156.
- CHEN Y Q, LIU Y L, YANG T X, *et al.* Multivariate statistical analysis for sixteen main agronomic traits of apricots [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2015, 30(5): 151-156. (in Chinese)

(上接第 9 页)

- [18] 陶冶,张元明. 准噶尔荒漠 6 种类短命植物生物量分配与异速生长关系[J]. 草业学报, 2014, 23(2): 38-48.
- TAO Y, ZHANG Y M. Biomass allocation patterns and allometric relationships of six ephemeroïd species in Junggar Basin, China [J]. Acta Pratacul Turae Sinica, 2014, 23(2): 38-48. (in Chinese)
- [19] JACKSON R B, CANADELL J, EHLERINGER J R, *et al.* A global analysis of root distributions for terrestrial biomes [J]. Oecologia, 1996, 108: 389-411.
- [20] TITLYANOVA A A, ROMANOVA I P, KOSYKH N P, *et al.* Patterns and process in aboveground and below-ground components of grassland ecosystems [J]. Journal of Vegetation Science, 1999, 10: 307-320.
- [21] HUI D F, JACKSON R B. Geographical and interannual variability in biomass partitioning in grassland ecosystems: a synthesis of field data [J]. New Phytologist, 2005, 169(1): 85-93.
- [22] MOKANY K, RAISON R J, PROKUSHKIN A S. Critical analysis of root: shoot ratios in terrestrial biomes [J]. Global Change Biology, 2006, 11: 1-13.
- [23] PIAO S, FANG J, CIAIS P, *et al.* The carbon balance of terrestrial ecosystems in China [J]. China Basic Science, 2010, 458(7241): 1009-1013.
- [24] 黎英华,姚云峰,秦富仓,等. 不同类型土壤的有机碳密度特征[J]. 干旱区研究, 2016, 33(3): 455-460.
- LI Y H, YAO Y F, QIN F C, *et al.* Distribution of different types of soil organic carbon density [J]. Arid Zone Research, 2016, 33(3): 455-460. (in Chinese)
- [25] YANG Y H, FANG J Y, JI C G, *et al.* Above-and below-ground biomass allocation in Tibetan grasslands [J]. Journal of Vegetation Science, 2009, 20(1): 177-184.
- [26] 马安娜,于贵瑞,何念鹏,等. 中国草地植被地上和地下生物量的关系分析[J]. 第四纪研究, 2014, 34(4): 769-776.
- MA A N, YU G R, HE N P, *et al.* Above-and below-ground biomass relationships in China's grassland vegetation [J]. Quaternary Sciences, 2014, 34(4): 769-776. (in Chinese)
- [27] YANG Y, FANG J, MA W, *et al.* Large-scale pattern of biomass partitioning across China's grasslands [J]. Global Ecology & Biogeography, 2010, 19(2): 268-277.
- [28] GAO T, XU B, YANG X X, *et al.* The aboveground biomass of desert steppe and its spatiotemporal variation in Western Inner Mongolia [J]. Sciences in Cold & Arid Regions, 2013, (3): 85-92.
- [29] 秦海龙,贾重建,卢瑛,等. 广东罗浮山土壤有机碳储量与组分垂直分布特征[J]. 西南林业大学学报, 2018, 38(3): 108-115.
- QIN H L, JIA C J, LU Y, *et al.* The Vertical distribution characteristics of soil organic carbon stocks and fractions in Luofu Mountain of Guangdong [J]. Journal of Southwest Forestry University, 2018, 38(3): 108-115. (in Chinese)