

doi : 10. 16473/j. cnki. xblykx1972. 2020. 01. 023

滇中地区矮杨梅灌丛碳密度分配格局研究*

郭子豪, 李瑶珂, 巩合德

(西南林业大学 地理与生态旅游学院, 云南 昆明 650224)

摘要: 为揭示滇中地区矮杨梅灌丛的碳密度分配特征, 采用样地调查的方法, 通过对云南省滇中地区 13 个样地的不同矮杨梅灌丛的碳密度特征值进行调查, 并对灌丛与土壤的生物量、含碳率、碳密度及碳含量等值进行测定, 分析滇中地区矮杨梅灌丛碳汇及其分布情况的成因及规律。结果表明, 研究区中矮杨梅灌丛的生物总碳密度(灌木层及草本层)、凋落物总碳密度、土壤总有机碳密度和总碳密度的均值分别为 $80.28 \pm 29.82 \text{ t/hm}^2$ 、 $25.84 \pm 10.18 \text{ t/hm}^2$ 、 $0.02 \pm 0.01 \text{ t/hm}^2$ 和 $80.30 \pm 29.82 \text{ t/hm}^2$ 。矮杨梅灌丛的灌木层碳主要分配在根部(32.68%–39.66%), 灌木层碳密度占总生物量碳密度的 56.25% 左右。草本层地上部分与地下部分碳分布差异显著, 地下部分平均值 $60.43 \pm 10.97 \text{ t/hm}^2$ (50.28%–73.12%), 地上部分平均值为 $46.65 \pm 14.21 \text{ t/hm}^2$ (26.88%–49.72%), 在矮杨梅灌丛中, 灌木层茎部(35.07%) 占有最大比例的碳密度值, 且滇中地区矮杨梅的生物碳密度明显高于中国 6 种主要灌丛的平均值 (10.88 t/hm^2)。

关键词: 矮杨梅灌丛; 碳密度; 生物量; 含碳量

中图分类号: S 667.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672–8246 (2020) 01–0149–08

Carbon Density and Its Spatial Distribution Dominated Pattern of the *Myrica nana* Cheval Shrub in Central Yunnan

GUO Zi-hao, LI Yao-ke, GONG He-de

(School of Geography and Ecotourism, Southwest Forestry University, Kunming Yunnan 650224, P. R. China)

Abstract: In order to find out the carbon density distribution characteristics of *Myrica nana* Cheval shrubs in the central Yunnan Province, and provide scientific support for the study of the characteristics of regional shrub carbon density, by using the method of sample plot survey and the characteristics such as carbon density investigation in 13 different shrub sites in central Yunnan province of *Myrica nana* Cheval shrubs, relevant data on biomass, carbon proportion, carbon density and carbon content of shrubs and soils were measured. The results showed that the bio-char density (shrub layer and herb layer), litter carbon density, soil organic carbon density and total carbon density of *Myrica nana* Cheval shrubs were $80.28 \pm 29.82 \text{ t/hm}^2$, $25.84 \pm 10.18 \text{ t/hm}^2$, $0.02 \pm 0.01 \text{ t/hm}^2$ and $80.30 \pm 29.82 \text{ t/hm}^2$, respectively. The carbon density in the shrub layer was mainly distributed in the root part (32.68%–39.66%), and the carbon density of shrub layer accounted for almost 56.25%. The carbon distribution between the above-ground part and the underground part of the herb layer was significantly different. The average value of the underground part was $60.43 \pm 10.97 \text{ t/hm}^2$ (50.28%–73.12%), and the average value of the above-ground part was $46.65 \pm 14.21 \text{ t/hm}^2$ (26.88%–49.72%). In the *Myrica nana* Cheval shrub, the stem layer (35.07%) of the shrub layer occupies the largest proportion of carbon density (10.88 t/hm^2), significant higher than the average of

* 收稿日期: 2020-01-09

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“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)”。

第一作者简介: 郭子豪(1993-), 男, 硕士研究生, 主要从事自然地理学研究。E-mail: 2496851740@qq.com

通讯作者简介: 巩合德(1978-), 男, 博士后, 副教授, 主要从事森林生态学和植物地理学研究。E-mail: gonghede3@163.com

the six major shrub species in China.

Key words: *Myrica nana* Cheval shrub; carbon density; biomass; carbon content

灌丛是目前已知的陆地生态系统中的重要组成部分之一^[1], 中国的灌丛以近 $2 \times 10^8 \text{ hm}^2$ 总面积占到我国陆地总面积的 1/5, 且具有种类繁多、分布广泛、生产力高等特点^[2]。滇中地区总体面积占全省面积的 24%, 包含昆明市、曲靖市、楚雄州和玉溪市 4 个城市, 对滇中地区灌丛碳密度进行研究, 对认识云南省灌丛总体情况及碳储量现状具有代表性。

近年来, 国内外的专家学者对灌丛进行了大量的研究, 但多数仍停留在群落结构、生物量、土壤微生物等方面^[3-4], 且仅研究某种灌丛类型的生物量测定, 缺少其地下根系部分及凋落物等特征值的记录测定, 也未能做到对不同器官间的横向比较, 致使植物的碳密度等测定具有一定的不准确性。

矮杨梅 (*Myrica nana* Cheval shrub) 为中国特有的杨梅科 (Myricaceae) 杨梅属 (*Myrica* L.) 常绿灌木树种, 广泛分布于我国西南各省海拔 1 500–3 500m 的山坡上, 通过对其生态系统的碳密度与分配格局进行研究, 可以帮助后续的研究揭示一定的矮杨梅固碳功能和碳循环机理^[5]。矮杨梅灌丛是滇中主要灌丛的代表, 具有分布区域性强, 生长密度高等特点, 对其生态系统与分配格局的研究有助于探究其在滇中地区的固碳能力与分配机理。本文以云南省滇中地区矮杨梅灌丛生态系统为研究对象, 旨在通过样地调查及其生物量的测定, 更加精

确地估算其植被碳储量, 并对区域中主要植被类型的含碳率分别进行测定和分析, 以估算滇中矮杨梅灌丛的碳密度以及其分配格局, 以此推断出滇中地区灌丛碳密度及其分布情况。

1 材料与方法

1.1 材料来源及样地设置

本研究共选取滇中地区 13 个市 (区) 设置样地 (表 1), 每块样地设置按照分布特征设计 3 个典型的 $5\text{m} \times 5\text{m}$ 的样方, 3 个样方的间距在 10m 左右, 总共 39 个样方。在对每个样方内的灌木层物种进行每木调查的同时, 在每个样方内随机选取 1 个 $1\text{m} \times 1\text{m}$ 的代表性样方, 测量该样方内所有矮杨梅的地上生物量及地下生物量。同时, 在每个灌丛样方内设置 1 个 $1\text{m} \times 1\text{m}$ 的代表性样方, 采用与灌木层同样的方法收集其样方内所有草本层中生物量。在每个灌丛样方的相邻位置选取 1 个 $1\text{m} \times 1\text{m}$ 的代表性样方, 收集其中的凋落物层生物量。灌木层和草本层各收集约 100g, 凋落物层收集约 500g, 带回实验室后烘干称重获取干质量。

每个样地挖取 1 个土壤剖面, 剖面规格在 1m^3 左右, 并用标准环刀以 0–10cm、10–20cm、20–30cm、30–50cm 的深度分层挖取土样, 带回实验室用烘干法称量土壤容重。

表 1 样地概况

Tab. 1 Sample plot survey

样地代码	调查地点	北纬 /°	东经 /°	海拔 /m	灌丛起源	坡位	灌木层盖度/%	草本层盖度/%
Q1	云南省姚安县	25.52	101.40	2 220	次生	山顶	43.0	12.0
Q2	云南省大姚县	25.66	101.15	2 258	次生	山顶	21.0	2.0
Q3	云南省牟定县	25.45	101.63	2 245	次生	中上部	45.0	8.0
Q4	云南省南华县	25.32	101.26	2 148	次生	中上部	84.0	75.0
Q5	云南省禄丰县	25.32	101.87	2 272	次生	山顶	94.0	5.0
Q6	云南省安宁县	24.82	102.42	2 123	次生	中上部	74.0	11.0
Q7	云南省昆明市盘龙区	25.14	102.61	2 183	次生	中上部	73.0	6.0
Q8	云南省嵩明县	25.41	103.04	2 084	次生	中上部	82.0	36.0
Q9	云南省昆明市五华区	25.22	102.66	2 137	次生	山顶	64.0	30.0
Q10	云南省富民县	25.28	102.63	2 214	次生	中上部	30.0	10.0
Q11	云南省寻甸县	25.54	103.39	2 060	原生	中上部	72.0	74.0
Q12	云南省会泽县	26.47	103.46	2 040	次生	中部	73.0	47.0
Q13	云南省师宗县	24.91	103.87	2 156	原生	中上部	74.0	68.0

测量时使用电子天平，将根、茎、叶等分开测量，每个器官选取大于或等于 150g 的材料带回实验室，并将材料放入 70℃ 的烘箱中烘烤 48h 至恒重，之后将样品分别放入粉碎机中粉碎，烘干至恒重后分别对粉碎物进行测量。

1.2 计算公式及方法

样品的有机碳含量测定采用重铬酸钾氧化法测定^[6]，并用公式（样品含碳率=样品碳含量/样品干质量×100%）进行计算。

灌丛中灌木层、草本层和凋落物层的碳密度测定，采用公式（样品碳密度=样品生物量×调查层盖度×各器官相应碳含量）^[5]求得，调查层盖度指灌丛中灌木层、草本层及凋落物层各自相应的盖度值。

土壤剖面有机碳密度的计算公式为^[7-8]，

$SOCD = \sum (1 - \theta_i) \times \rho_i \times C_i \times T_i / 100$ ，式中， $SOCD$ 为土壤剖面有机碳密度 (kg/m^2)； θ_i 为第 i 层砾石含量 (体积%)； ρ_i 为第 i 层土壤容重 (g/cm^3)； C_i 为第 i 层土壤有机碳含量 (g/kg)； T_i 为第 i 层土层厚度 (cm)。为统一单位，计算结果需在得出值后乘 10，以求得最终的 $SOCD$ 值^[5]。数据用 SPSS 23.0 及 Excel 2016 软件进行统计分析，并根据单因素方差相关性分析对不同样地间矮杨梅生物量、含碳率、碳密度间的差异做回归分析。

2 结果与分析

2.1 矮杨梅灌丛生物量大小及其分布

矮杨梅灌丛生物量大小及其分布结果见表 2。

表 2 滇中地区矮杨梅灌丛各组分生物量 (平均值±标准差)

Tab. 2 The each part biomass of *M. nana* Cheval in central Yunnan (mean±standard deviation)

样地代码	灌木层				草本层			凋落物层	生物层
	根	茎	叶	合计	根	叶	合计		
Q1	166.37±	148.80±	115.10±	430.27±	/	/	/	108.77±	539.04±
	58.34	56.76	49.22	21.27				40.35	321.50
Q2	157.03±	158.90±	137.27±	453.2±	42.70±	15.70±	58.40±	93.50±	605.10±
	41.79	34.02	29.69	9.79	0.00	0.00	13.50	5.40	178.41
Q3	118.37±	119.47±	100.83±	338.67±	80.60±	65.00±	145.60±	82.67±	566.94±
	8.08	3.27	8.55	8.54	0.00	0.00	7.80	10.39	108.92
Q4	83.80±	84.07±	62.03±	229.9±	47.23±	38.43±	85.67±	103.87±	419.44±
	46.07	23.90	12.92	10.33	6.54	17.00	4.40	11.62	64.13
Q5	99.60±	103.83±	98.13±	301.56±	51.25±	25.20±	76.45±	108.87±	486.88±
	23.56	26.15	28.85	2.42	4.15	13.40	13.03	11.96	99.36
Q6	124.80±	139.73±	102.57±	367.1±	62.13±	49.13±	111.27±	106.33±	584.70±
	6.22	3.07	14.77	15.27	7.39	9.49	6.50	12.93	121.78
Q7	129.33±	129.03±	123.97±	382.33±	53.25±	52.65±	105.90±	94.90±	583.13±
	7.30	10.76	5.78	2.46	8.15	3.15	0.30	2.06	132.98
Q8	136.63±	108.60±	99.23±	344.46±	63.10±	61.30±	124.40±	74.63±	543.49±
	49.87	34.12	23.85	15.89	9.30	10.30	0.90	2.34	117.24
Q9	150.23±	151.77±	134.23±	436.23±	56.50±	49.73±	106.23±	85.10±	627.56±
	18.96	11.82	8.48	7.93	16.08	13.04	3.38	3.94	160.78
Q10	125.53±	129.37±	129.17±	384.07±	66.80±	57.33±	124.13±	79.43±	587.63±
	26.50	4.44	13.83	1.76	12.47	13.34	4.73	2.71	134.32
Q11	94.13±	95.43±	68.73±	258.29±	59.37±	39.60±	98.97±	95.97±	453.23±
	36.01	15.74	22.72	12.29	5.68	9.39	9.88	21.67	75.82
Q12	97.30±	98.27±	67.17±	262.74±	63.37±	46.00±	109.37±	89.37±	461.48±
	42.14	30.55	16.49	14.44	12.14	10.34	8.68	8.07	77.44
Q13	118.70±	122.90±	110.43±	352.03±	78.80±	59.70±	138.50±	85.07±	575.60±
	82.45	69.66	67.66	5.18	34.94	20.30	9.55	11.60	115.33
均值	123.22±	122.32±	103.76±	349.3±	60.43±	46.65±	107.07±	104.12±	541.09±
	24.23	22.54	24.25	8.97	10.97	14.21	24.01	42.23	125.91
合计	1 601.83±	1 590.17±	1 348.87±	4 540.15±	725.10±	559.78±	1 284.88±	1 280.48±	7 034±
	24.23	22.54	24.25	67.92	10.97	14.21	24.01	11.00	125.91

注：/表示数据未采集到。以下同。

由表2可知,云南省滇中地区矮杨梅灌丛灌木层的生物量介于 $229.9 \pm 10.33 \text{g/m}^2 - 453.2 \pm 9.79 \text{g/m}^2$ 之间,平均为 $349.3 \pm 8.97 \text{g/m}^2$ 。矮杨梅灌丛灌木层各器官生物量大小为根($123.22 \pm 24.23 \text{g/m}^2$) > 茎($122.32 \pm 22.54 \text{g/m}^2$) > 叶($103.76 \pm 24.25 \text{g/m}^2$)。云南省滇中地区矮杨梅灌丛草本层的生物量介于 $58.40 \pm 13.50 \text{g/m}^2 - 145.60 \pm 7.80 \text{g/m}^2$ 之间,平均为 $107.07 \pm 24.01 \text{g/m}^2$,草本层地下部分生物量与地上部分生物量差异较大。云南省滇中地区矮杨梅灌丛凋落物层的生物量介于 $74.63 \pm 2.34 \text{g/m}^2 - 108.87 \pm 11.96 \text{g/m}^2$ 之间,平均为 $104.12 \pm 42.23 \text{g/m}^2$ 。

云南省滇中地区矮杨梅灌丛群落平均生物量占总体生物量大小的排序为:灌木层(63.90%) > 草本层(18.08%) > 凋落物层(18.02%),且灌木层生物量所占比例明显高于草本层和凋落物层生物量大小,草本层的生物量所占比例与凋落物层的生物量占总体群落生物量的比例相近。

2.2 矮杨梅灌丛植被各组分、凋落物及土壤有机碳含量

云南省滇中地区不同样地矮杨梅灌丛平均含碳率分别为83.21%、74.18%、84.77%、81.40%、78.07%、75.77%、73.07%、67.71%、64.79%、74.08%、70.39%、67.82%、67.26% (表3),不同样地间灌木层平均含碳率差异显著($P < 0.05$)。

灌木各器官平均含碳率表现为叶(85.45%) > 茎(69.21%) > 根(68.94%)。草本层、凋落物层平均含碳率分别为79.79%和48.12%,凋落物层的平均含碳率相对最小。

表3 滇中地区矮杨梅灌丛生物层含碳率

Tab. 3 Carbon content of biological layer of *M. nana* Cheval in central Yunnan %

样地代码	样地名称	灌木层含碳率	草本层含碳率	凋落物层含碳率
Q1	云南省姚安县	83.21	/	43.06
Q2	云南省大姚县	74.18	140.00	45.40
Q3	云南省牟定县	84.77	54.21	55.94
Q4	云南省南华县	81.40	98.22	43.72
Q5	云南省禄丰县	78.07	120.97	41.60
Q6	云南省安宁县	75.77	73.39	41.70
Q7	云南省昆明市盘华区	73.07	79.43	47.11
Q8	云南省嵩明县	67.71	56.94	56.90
Q9	云南省昆明市五华区	64.79	74.23	53.82
Q10	云南省富民县	74.08	53.89	59.40
Q11	云南省寻甸县	70.39	73.98	48.24
Q12	云南省会泽县	67.82	57.56	40.76
Q13	云南省师宗县	67.26	74.60	47.91
	平均	74.04	79.79	48.12

表4 滇中地区矮杨梅灌丛土壤含碳率

Tab. 4 Soil carbon content of *M. nana* Cheval shrub in central Yunnan %

土层深度	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8	Q9	Q10	Q11	Q12	Q13
0-10cm	0.67	1.80	2.15	1.79	0.94	3.09	1.40	1.07	1.68	1.99	2.47	1.36	2.32
10-20cm	0.42	0.76	1.04	0.68	0.65	0.93	0.57	0.78	1.01	0.88	0.95	0.56	0.86
20-30cm	0.26	0.68	0.52	0.38	0.29	0.46	0.27	0.59	0.81	0.38	0.71	0.42	0.43
30-50cm	0.17	0.27	0.23	0.31	0.17	0.27	0.19	0.34	0.63	0.18	0.40	0.31	0.41
合计	1.52	3.52	3.95	3.16	2.06	4.75	2.43	2.78	4.13	3.42	4.53	2.65	4.01

由表4可以看出,土壤(0-50cm)含碳率介于0.17%-3.09%之间,且随着土层深度的增加,各取样地的土壤含碳率在垂直方向上逐级减小,垂直分布特征明显。

2.3 矮杨梅灌丛植被、凋落物及土壤碳密度分配格局

由表5和图1可知,云南省不同样地矮杨梅灌丛灌木层碳密度存在差异($P < 0.05$),碳密度大小依次为:Q3 < Q9 < Q10 < Q6 < Q2 < Q7 < Q5 < Q4 < Q1 < Q11 < Q13 < Q12 < Q8,平均 $45.16 \pm 21.74 \text{t/hm}^2$ 。云南省

不同样地矮杨梅灌丛灌木层碳在根茎叶中的分布含量差别不大,但相较下滇中地区矮杨梅灌丛灌木层碳在茎部最多(35.07%),而灌木层碳密度在其生态系统中占有率最高,依次为Q3(1.15%) < Q9(23.84%) < Q6(41.02%) < Q4(51.60%) < Q5(52.61%) < Q7(53.19%) < Q13(61.37%) < Q11(61.70%) < Q12(63.85%) < Q8(64.03%) < Q10(64.47%) < Q1(74.78%) < Q2(78.02%),整体占其生态系统生物层碳密度的56.23%左右。

表 5 滇中地区矮杨梅灌丛生态系统各组分碳密度及其分配格局 (平均值±标准差)

Tab. 5 The carbon density and its allocation pattern of constituents of *M. nana* Cheval shrub ecosystem in central Yunnan (mean±standard deviation)

样地 编号	灌木层				草本层			凋落 物层	土壤层	生物层	生态 系统
	根	茎	叶	合计	根	叶	合计				
Q1	20.20± 4.53	21.52± 6.14	16.44± 3.62	58.16± 2.15	/	/	/	19.61± 7.55	0.01± 0.01	77.77± 24.16	77.78± 23.74
Q2	10.62± 2.47	11.27± 2.19	10.42± 2.39	32.31± 0.36	0.53± 0.00	0.13± 0.00	0.66± 0.20	8.41± 1.35	0.03± 0.01	41.38± 13.47	41.41± 13.10
Q3	0.09± 0.01	0.09± 0.00	0.08± 0.01	0.26± 0.00	2.79± 0.00	2.88± 0.00	5.67± 0.04	16.65± 1.60	0.02± 0.01	22.58± 6.82	22.60± 6.74
Q4	19.12± 6.66	21.51± 9.49	17.75± 7.68	58.38± 1.55	9.10± 5.58	7.02± 3.88	16.12± 1.04	38.61± 2.92	0.02± 0.01	113.11± 7.26	113.13± 22.13
Q5	18.78± 9.10	18.72± 8.90	18.57± 8.25	56.07± 0.09	2.88± 0.79	1.52± 1.01	4.40± 0.68	46.09± 6.39	0.01± 0.00	106.56± 22.38	106.57± 24.74
Q6	9.70± 0.61	11.20± 0.96	9.06± 2.02	29.96± 0.90	4.68± 0.83	4.09± 1.61	8.77± 0.30	34.28± 3.97	0.02± 0.01	73.01± 11.15	73.03± 14.29
Q7	13.34± 1.64	13.53± 0.99	14.02± 1.37	40.89± 0.29	2.40± 0.03	2.60± 0.13	5.00± 0.10	30.96± 0.89	0.02± 0.02	76.85± 15.13	76.87± 17.16
Q8	25.11± 4.23	20.32± 2.44	20.29± 4.25	65.72± 2.27	4.78± 1.74	6.09± 2.63	10.87± 0.66	26.03± 1.94	0.02± 0.01	102.62± 23.13	102.64± 24.91
Q9	4.74± 0.73	5.03± 0.76	4.72± 0.71	14.49± 0.14	10.16± 4.79	11.20± 4.32	21.36± 0.52	24.90± 1.30	0.02± 0.01	60.75± 4.32	60.77± 9.53
Q10	8.63± 2.28	9.06± 0.69	9.58± 0.76	27.27± 0.39	1.53± 0.27	2.24± 0.47	3.77± 0.36	11.23± 0.34	0.03± 0.02	42.27± 9.80	42.30± 10.45
Q11	23.68± 4.18	24.20± 4.62	17.10± 0.84	64.98± 3.23	4.80± 2.01	4.47± 3.02	9.27± 0.17	31.05± 8.18	0.02± 0.01	105.30± 22.92	105.32± 25.00
Q12	24.50± 1.55	24.61± 1.55	17.75± 3.12	66.86± 3.21	7.77± 1.71	6.86± 3.11	14.63± 0.46	23.20± 1.27	0.02± 0.01	104.69± 22.87	104.71± 24.91
Q13	23.77± 1.09	24.92± 0.47	23.01± 0.79	71.70± 0.79	10.75± 0.95	9.42± 1.59	20.17± 0.67	24.94± 2.49	0.02± 0.02	116.81± 23.25	116.83± 26.26
总值	202.28± 7.93	205.98± 7.75	178.79± 6.33	587.05± 21.74	62.17± 3.32	58.52± 3.18	120.69± 6.42	335.96± 10.18	0.26± 0.01	1 043.70± 29.82	1 043.96± 29.82
均值	15.56± 7.93	15.84± 7.75	13.75± 6.33	45.16± 21.74	5.18± 3.32	4.88± 3.18	10.06± 6.42	25.84± 10.18	0.02± 0.01	80.28± 29.82	80.30± 29.82

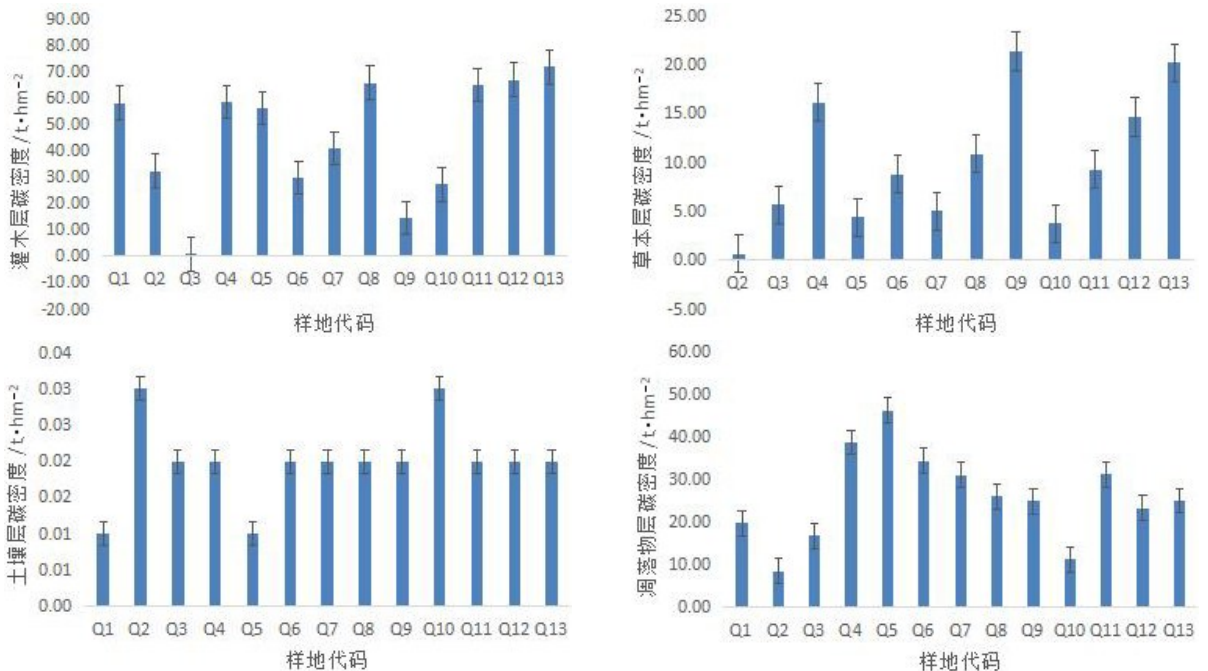


图 1 云南滇中地区各矮杨梅样地灌丛碳密度 (平均值±标准误差)

Fig. 1 Carbon density of each sample shrubs of *M. nana* Cheval in central Yunnan (mean±standard deviation)

云南省滇中地区矮杨梅灌丛草本层碳密度差异显著 ($P < 0.05$), 大小依次为: Q2 (0.66%) < Q10 (3.77%) < Q5 (4.40%) < Q7 (5.00%) < Q3 (5.67%) < Q6 (8.77%) < Q11 (9.27%) < Q8 (10.87%) < Q12 (14.63%) < Q4 (16.12%) < Q13 (20.17%) < Q9 (21.36%), (其中 Q1 草本层数据未采集到, 因此未计入), 草本层有机碳密度占生态系统碳密度的比例为: Q2 (1.59%) < Q5 (4.13%) < Q7 (6.50%) < Q11 (8.80%) < Q10 (8.91%) < Q8 (10.59%) < Q6 (12.01%) < Q12 (13.97%) < Q4 (14.25%) < Q13 (17.26%) < Q3 (25.09%) < Q9 (35.15%), 地下部分平均值 $5.18 \pm 3.32 \text{ t/hm}^2$ (40.58% - 80.30%), 地上部分平均值为 $4.88 \pm 3.18 \text{ t/hm}^2$ (19.70% - 59.42%)。

云南省滇中地区不同样地矮杨梅灌丛凋落物层碳密度差异显著 ($P < 0.05$), 碳密度大小依次为: Q2 < Q10 < Q3 < Q1 < Q12 < Q9 < Q13 < Q8 < Q7 < Q11 < Q6 < Q4 < Q5, 平均为 $25.84 \pm 10.18 \text{ t/hm}^2$ 。凋落物有机碳密度占生态系统碳密度的比例为: Q3 (73.20%) > Q6 (46.84%) > Q5 (46.44%) > Q9 (40.84%) > Q7 (40.18%) > Q4 (36.73%) > Q11 (30.37%) > Q10 (26.38%) > Q1 (26.24%) > Q8 (26.03%) > Q12 (22.11%) > Q13 (21.18%) > Q2 (20.84%)。

云南省滇中地区矮杨梅灌丛土壤有机碳密度差异不显著 ($P > 0.05$), 大小依次为 Q2 > Q10 > Q12 > Q11 > Q9 > Q7 > Q8 > Q13 > Q6 > Q3 > Q4 > Q1 > Q5, 土壤层有机碳密度平均在 2120.20 g/m^2 。土壤有机碳密度占生态系统碳密度的比例为: Q2 (20.31%) < Q13 (21.35%) < Q12 (22.16%) < Q1 (25.21%) < Q8 (25.36%) < Q10 (26.55%) < Q11 (29.48%) < Q4 (34.13%) < Q7 (40.28%) < Q9 (40.97%) < Q5 (43.25%) < Q6 (46.94%) < Q3 (73.67%), 由以上结果可以看出, 滇中地区的矮杨梅灌丛碳储量最丰富的部分不是土壤层, 而在于灌木层中。云南省滇中地区矮杨梅灌丛生态系统差异显著 ($P < 0.05$), 表现为: Q3 (22.60 t/hm^2) < Q2 (41.41 t/hm^2) < Q10 (42.30 t/hm^2) < Q9 (60.77 t/hm^2) < Q6 (73.03 t/hm^2) < Q7 (76.87 t/hm^2) < Q1 (77.78 t/hm^2) < Q8 (102.64 t/hm^2) < Q12 (104.71 t/hm^2) < Q11 (105.32 t/hm^2) < Q5 (106.57 t/hm^2) < Q4 (113.13 t/hm^2) < Q13 (116.83 t/hm^2), 平均为 $80.30 \pm 29.82 \text{ t/hm}^2$ 。矮杨梅灌丛生态系统碳密度空间分布序列为: 植被层 > 凋落物层 > 土壤层。

3 讨论与结论

3.1 滇中地区矮杨梅灌丛生物量

本研究选取了 13 块县(市、区)的样地, 选取样地时为使使得无关变量对研究结果影响最小, 皆尽量保持样地的经度、纬度相似, 海拔相似, 坡位均选择在山坡中上部以上的位置设置样点。在相似的环境条件下, 不同物种的生物量分配策略不同, 反映了植物在生长发育过程中各种功能(生长、繁殖和防御等)的优先选择次序^[9]。经调查, 云南省滇中地区矮杨梅灌丛各层的生物量间存在显著差异, 灌木层生物量最高, 其平均值为 $349.3 \pm 8.97 \text{ g/m}^2$, 草本层其次, 平均值为 $107.07 \pm 24.01 \text{ g/m}^2$, 凋落物层最少, 平均值为 $104.12 \pm 42.23 \text{ g/m}^2$, 符合生物量在植被层次上的分配多表现为灌木层 > 草本层 > 凋落物层^[10-11]的规律, 且高于全国灌丛生物量平均值 21.76 Mg/hm^2 ^[2] 和全球灌丛生物量平均值 21.00 Mg/hm^2 ^[12]。灌木层各器官生物量排序根 ($123.22 \pm 24.23 \text{ g/m}^2$) 最多, 其次是茎 ($122.32 \pm 22.54 \text{ g/m}^2$) 和叶 ($103.76 \pm 24.25 \text{ g/m}^2$), 灌木层根茎叶的生物量大小区别虽不够差异较大, 但仍能表明本研究中的样地地区灌木层植物将更多的生物量分配到地下部分的器官中, 而将较少的部分分配于进行光合作用的地上部分, 地上部分中茎 ($122.32 \pm 22.54 \text{ g/m}^2$) 的平均生物量也较大于叶 ($103.76 \pm 24.25 \text{ g/m}^2$) 的平均生物量, 这可能与滇中地区较强的阳光辐射减缓了光合作用的最大效率进行有关, 因此该灌丛植物在选择储存生物养分时会更多的选择其地下部分^[13]。

本研究中, 除灌木层的生物量占其总生物量的 63.90% 外, 矮杨梅灌丛草本层和凋落物层的生物量分别占总生物量的 18.08% 和 18.02%, 合计占矮杨梅生态系统的 36.10%, 说明矮杨梅灌丛草本层和凋落物层对矮杨梅灌丛生态系统生物量具有一定的贡献。以往的研究表明, 低温低湿的环境有利于根生物量的积累, 而高温高湿的条件有利于茎的生长^[14-16], 这也验证了灌丛生长需湿润条件的特点。目前灌丛碳储量的研究往往忽略了灌木下草本层和凋落物层的生物量^[17-18], 这会在一定程度上低估了灌丛生态系统的碳储量, 并会造成灌丛生态系统碳储量估算的不准确。本实验中通过加入对灌木下草本层和凋落物层的生物量测定, 使之在计算时减小了相对误差, 但因实验条件和时间所限, 并

未对光照条件与灌丛生物量积累的关系进行深入调研，今后的研究中可在这一方面进行进一步的探究。

3.2 滇中地区矮杨梅灌丛有机含碳率

云南省滇中地区矮杨梅灌丛灌木层平均含碳率为74.04%，矮杨梅各器官含碳率在64.79%–84.77%之间。植物的含碳率因器官的不同而存在差异，灌木各器官平均含碳率表现为叶(85.45%)>茎(69.21%)>根(68.94%)。草本层、凋落物层平均含碳率分别为79.79%和48.12%，凋落物层的平均含碳率相对最小。通过此次调查求得滇中地区矮杨梅灌丛中，灌丛生态系统土壤剖面(0–50cm)有机碳含率分别为：1.74% (土壤剖面深度0–10cm)、0.78% (土壤剖面深度10–20cm)、0.48% (土壤剖面深度20–30cm)和0.30% (土壤剖面深度30–50cm)，可见滇中地区矮杨梅灌丛的土壤有机碳含量不高，其多储存于植物体中。研究中通过计算发现个别研究地(Q2和Q5)草本层的含碳率数值过高，这可能与调查地受人为因素干扰有关，影响了其正常的数值。表层土壤虽能积累一定的有机碳，且有机碳含量随着土壤深度的增加而减少，而深层土壤碳库对植物灌丛也同样做出了一定的贡献。如果实验中忽略深层土壤碳库对整个生态系统生物层做出的贡献，则会使得在统计计算时整体土壤碳密度偏低。因此在今后的实验研究过程中，在进行土壤碳密度的估算时，必须考虑深层土壤碳库的储量和对整体灌丛植物的影响。

3.3 滇中地区矮杨梅灌丛碳密度及分配格局

植物的碳密度含量可以有效地反映出植物的生长状态^[19]。本研究中，矮杨梅灌丛植被的碳密度平均为 $45.16 \pm 21.74 \text{ t/hm}^2$ ，大于本生物层及土壤层中其它组分的碳密度含量，但小于胡会峰等^[2]在全国尺度上对灌丛生物碳密度的估值(108.80 t/hm^2)，形成差异的原因可能与以下两个因素有关：(1)滇中地区矮杨梅灌丛生物量整体上较小，介于 $229.9 \pm 10.33 \text{ g/m}^2$ – $453.2 \pm 9.79 \text{ g/m}^2$ 之间，平均为 $349.3 \pm 8.97 \text{ g/m}^2$ ，含碳率平均值为74.04%，受采集当地高海拔及强日照的条件影响，植物多选择将用于生长的养分储存于地下部分，因此在碳密度的计算结果上使得矮杨梅灌丛碳密度小于其它灌丛。(2)与人类干扰少有关。滇中地区矮杨梅灌丛的调查样地分布多位于山坡中上部及山顶，人类活动的干扰较少，且在样地选择上为最大可能地排除人为因素，多选择干扰频度小的灌丛进行取样，

使其计算时误差最小，而高海拔地区使得植物生长受限，一些植物处于生长的初始状态使得地上生物积累量低于预期值。在整体的植被系统中，灌木层($45.16 \pm 21.74 \text{ t/hm}^2$)的碳密度远大于草本层($10.06 \pm 6.42 \text{ t/hm}^2$)及凋落物层($25.84 \pm 10.18 \text{ t/hm}^2$)的碳密度含量，灌木层中茎的碳密度含量($15.84 \pm 7.75 \text{ t/hm}^2$)与根($15.56 \pm 7.93 \text{ t/hm}^2$)大小近似，高于叶($13.75 \pm 6.33 \text{ t/hm}^2$)的碳密度含量，这表明滇中地区矮杨梅灌丛的固碳能力较强，且集中于茎部和根部，相反叶部固碳能力较低，这可能与植物本身叶片情况以及滇中地区强日照地理因素有关。灌木层根部的生物量高于茎部与叶部，说明在滇中地区相似的地理与环境条件下，矮杨梅灌丛更多的选择用于生成与生长的营养物质和能量集中于其根部，在强日照条件下，将光合作用储存的能量以及周围环境中吸收的能量集中于其根部能够更好的应对周围环境的变化以其滇中地区的强日照及干旱环境。因此，在条件允许的情况下，为了更加精确地估算植被碳储量及灌丛碳分配格局，有必要对在特定区域中的主要植被类型的含碳率分别进行测定和分析，并结合研究地的气候日照等环境因素进行综合考虑及推测，最大程度地减少估算其误差，这对于今后灌丛碳储量的研究和正确认识滇中地区植被碳汇分布及特征具有重要意义。

参考文献：

- [1] 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]. 生态学杂志, 2011, 30(11): 2577–2583.
- [2] 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, 30(4): 539–544.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 杨路存, 李长斌, 宁祎, 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.
- [6] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.
- [7] Veldkamp E. Organic carbon turnover in three tropical soils under pasture after deforestation[J]. Soil Science Society of American Journal, 1994, 58: 175–180.