

DOI: 10.20103/j.stxb.202309151992

张建华,周晓阳,马卉,宿贵霞,刘勇,张红,徐龙超.北京东灵山地区典型灌丛碳密度分配格局.生态学报,2025,45(5):2346-2354.

Zhang J H,Zhou X Y, Ma H, Su G X, Liu Y, Zhang H, Xu L C. Carbon density and its spatial distribution pattern of typical shrublands in Mt. Dongling, Beijing, China. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(5):2346-2354.

北京东灵山地区典型灌丛碳密度分配格局

张建华¹,周晓阳²,马卉¹,宿贵霞¹,刘勇³,张红³,徐龙超^{2,*}

1 忻州师范学院生物系,忻州 034000

2 太原理工大学环境与生态学院,晋中 030600

3 山西大学黄土高原研究所,太原 030006

摘要:灌丛面积增加引起的碳储量增加是我国陆地生态系统碳储量增加的重要原因之一,也被认为是陆地生态系统碳汇研究中的一个不确定因素。为揭示华北地区灌丛生态系统不同层片的碳密度,采用野外调查和异速生长方程法,研究了北京东灵山 2 种典型灌丛(绣线菊和荆条)生态系统的碳密度及分布特征。结果表明:荆条灌丛总碳密度(92.32 t/hm^2)显著高于绣线菊灌丛(70.47 t/hm^2) ($P < 0.05$),其中土壤碳密度占绝对优势(94.96%和 91.54%),分别为 87.67 t/hm^2 和 64.51 t/hm^2 ,土壤有机碳富集在 0—30 cm 土层中,且土壤有机碳密度随土层加深呈减小趋势。荆条灌丛各土层有机碳密度均高于绣线菊灌丛,这可能与荆条灌丛凋落物产量、质量较高及其根系垂直分布范围广等因素有关。荆条和绣线菊灌丛灌木层对整个生态系统碳密度贡献较小(4.73%和 7.86%),分别为 4.37 t/hm^2 和 5.54 t/hm^2 ,其中灌木层中枝的碳密度占绝对优势,其次为根和叶。灌木层碳密度与灌木密度显著正相关($P < 0.05$)。2 种灌丛草本层对灌丛总碳密度贡献最小(0.31%和 0.60%),分别为 0.28 t/hm^2 和 0.42 t/hm^2 ,且二者碳密度均表现为地上部分大于地下部分。对灌丛碳密度开展评估,为区域陆地生态系统碳循环的构建和校验提供了重要的实测数据,也为灌丛生态管理提供更有力的数据支持。

关键词:灌丛;生物量;碳密度;碳分配;东灵山

Carbon density and its spatial distribution pattern of typical shrublands in Mt. Dongling, Beijing, China

ZHANG Jianhua¹, ZHOU Xiaoyang², MA Hui¹, SU Guixia¹, LIU Yong³, ZHANG Hong³, XU Longchao^{2,*}

1 Department of Biology, Xinzhou Normal University, Xinzhou 034000, China

2 College of Environment and Ecology, Taiyuan University of Technology, Jinzhong 030600, China

3 Institute of Loess Plateau, Shanxi University, Taiyuan 030006, China

Abstract: Shrub recovery is one of significant contributors to the increase of carbon stocks in terrestrial ecosystems in China, yet there remains considerable uncertainty regarding the contribution of shrubs to the carbon sink. To reveal the carbon density of different layers of shrublands in North China, the carbon density and distribution characteristics of two typical shrub lands (*Vitex negundo* var. *heterophylla* and *Spiraea salicifolia*) in Dongling Mountain, Beijing, were measured based on the field investigation data and by employing allometric approaches. The results showed that the total carbon density (92.32 t/hm^2) of *V. negundo* shrubland was significantly higher than that (70.47 t/hm^2) of *S. salicifolia* shrubland ($P < 0.05$), in which the carbon storage of soil layer was the most (94.96% and 91.54%), and the carbon storage were 87.67 t/hm^2 and 64.51 t/hm^2 , respectively. Soil organic carbon was enriched in the 0—30 cm soil layer, and showed a

基金项目: NSFC 山西煤基低碳联合基金(U1910207);国家自然科学基金青年基金(31700413);山西省高等学校人文社会科学重点研究基地项目(20210122);山西省基础研究计划(自由探索类)(202203021221224)

收稿日期: 2023-09-15; **网络出版日期:** 2024-11-28

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xulongchao@tyut.edu.cn

decreasing trend with increasing soil depth. The organic carbon density in different soil layers of the *V. negundo* shrubland is higher than that of the *S. salicifolia* shrubland, possibly due to factors such as the high yield, quality of the litter, and wide vertical distribution range of roots of *V. negundo* shrubland. The contribution of the shrub layer of *V. negundo* shrubland and *S. salicifolia* to the carbon density of the entire ecosystem is relatively small (4.73% and 7.86%), and the carbon density were 4.37 t/hm² and 5.54 t/hm², respectively, in which, the carbon density of branches in the shrub layer was the highest, followed by root, and then leaf. The carbon density of the shrub layer was markedly positively correlated with the shrub density ($P < 0.05$). The herbaceous layer of the two shrublands contributes the least to the total carbon density of shrublands (0.31% and 0.60%), and the carbon density were 0.28 t/hm² and 0.42 t/hm², respectively, and the aboveground part of the herbaceous layer has a higher carbon density than the underground part. Evaluating the carbon density of shrublands provides important measured data for developing and validating C cycling models in regional terrestrial ecosystems, and providing data support for shrublands management.

Key Words: shrubland; biomass; carbon density; carbon allocation; Dongling Mountain

灌丛是中国山地和干旱地区极为普遍的植被类型之一,由于具有种类复杂多样、萌生能力强、生态适应范围极广等优势,灌丛在群落演替和生物固碳等方面均具有极其重要的作用^[1]。近年来,由于退化植被的恢复与重建,灌丛植被的分布面积迅速增加^[2],这成为了我国陆地生态系统碳储量增加的主要原因^[3]。碳密度指的是单位土地面积的碳存储量,能够反映生态系统碳存储能力,是一项生态系统碳储量估算及生态系统与大气碳交换相关研究的重要参数,准确估算碳密度被认为是判定碳汇、制定缓解全球变化的合理政策措施的重要依据^[4]。相比于森林和草地,由于人们对灌丛植被的定位及认识的偏差,针对灌丛生态系统的深入性调查工作开展得相对较少^[5],另外灌丛种类繁多,其生物量测定较难,且其分布变化迅速,导致灌丛生态系统的相关调查数据匮乏^[2]。尽管国内外开展了有关灌丛的研究,但多数集中于群落结构^[6-7]、生物量^[8]、土壤呼吸^[9]和微生物^[10]等方面,对灌丛生态系统碳密度的研究还较为缺乏。目前有关灌丛碳密度的研究往往局限于对某种或某几种类型灌丛灌木层生物量测定^[11-12],缺少地下根系^[13]、草本^[14]、地表凋落物^[15]和土壤碳库的测定^[16-17],没有对生态系统不同层片的碳密度同时进行测定,导致灌丛生态系统碳储量的估算仍有较大的不确定性。因此,研究中国灌丛生态系统的碳储量在正确评估陆地生态系统的碳储量和碳周转方面均扮演着极为重要的角色。

在华北地区,植被逆行演替随着人类的乱砍滥伐逐渐凸显,大面积灌丛快速形成^[18],因此该地区灌丛生态系统是我国陆地生态系统碳汇估算中必不可少的重要部分,在华北地区开展灌丛碳密度的研究非常必要。绣线菊(*Spiraea salicifolia*)和荆条(*Vitex negundo* var. *heterophylla*)灌丛是华北地区分布广泛、极具代表性的灌丛类型,分析其生态系统碳密度及探究其分配格局对揭示其碳循环机理有重要意义。本文选择北京东灵山地区典型灌丛荆条和绣线菊为研究对象,对其植被和土壤有机碳密度进行研究,以期为准评估华北地区灌丛生态系统碳汇估算奠定基础,并为指导当地生态植被建设提供科学依据。

1 研究区概况

研究地点位于北京市东灵山(39°48'—40°00'N, 115°24'—115°36'E),最高海拔为2303 m,属太行山系小五台山余脉(图1)。该区域年平均气温为3—5℃,年降水量为550—680 mm(集中于6—8月),常年出现严重春旱^[19-20],属暖温带半湿润大陆性季风气候。研究区地带性土壤类型为棕壤土^[21],地带性植被类型主要为暖温带落叶阔叶林。灌丛主要分布于海拔1100 m以下的低海拔区域,该地区最典型灌丛是绣线菊灌丛和荆条灌丛,二者均是森林植被退化而形成的次生群落^[22]。2种灌丛样地的基本情况见表1^[23]。

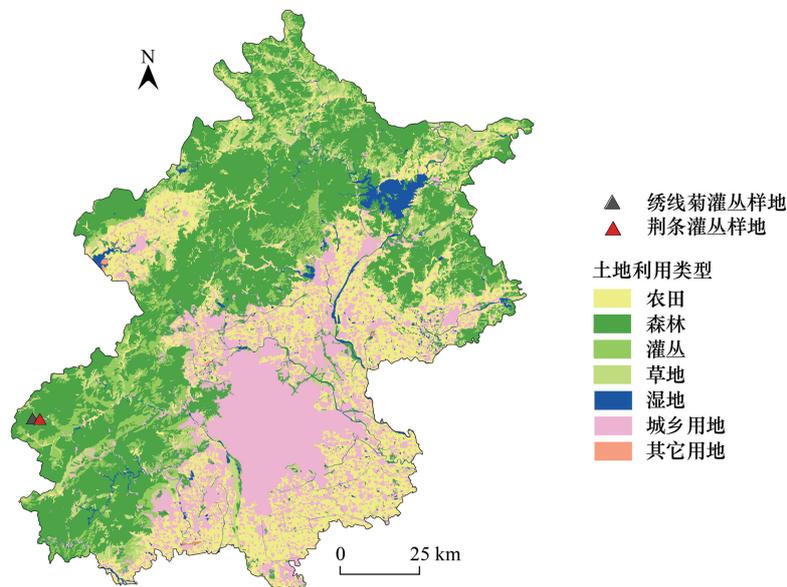


图 1 北京市地形图及采样点位置

Fig.1 Topographic map of Beijing and sampling location

表 1 实验样地地形、土壤和植被特征

Table 1 Topography, soil and vegetation characteristics of the experimental sites

项目 Item	荆条灌丛 <i>Vitex negundo</i> var. <i>heterophylla</i> shrubland	绣线菊灌丛 <i>Spiraea salicifolia</i> shrubland
地形特征 Topography character		
海拔 Elevation/m	791	1170
坡向 Aspect	S	S
坡度 Slope/(°)	28	25
表层土壤特征 Topsoil property		
土壤 pH 值	8.7	8.9
总碳 Total carbon/(mg/g)	28.88±2.10	39.50±5.03
总氮 Total nitrogen/(mg/g)	2.72±0.32	2.29±0.36
总磷 Total phosphorous/(mg/g)	0.47±0.04	0.48±0.03
无机氮 Inorganic nitrogen/(mg/g)	6.01±2.38	2.51±2.88
速效磷 Available phosphorous/(mg/g)	1.03±0.09	1.38±0.77
群落特征 Community character		
灌木高度 Shrub height/cm	78.1±12.37	79.8±7.43
平均基径 Average base diameter/cm	0.77±1.77	0.56±0.04
灌木密度 Shrub density/(株/hm ²)	1.6 × 10 ⁵	3.6 × 10 ⁵
灌木层优势种 Dominant species in shrub layer	荆条 <i>Vitex negundo</i> var. <i>heterophylla</i> 河蒴堇花 <i>Wikstroemia chamedaphne</i>	绣线菊 <i>Spiraea salicifolia</i> 山杏 <i>Armeniana sibirica</i> 荆条 <i>Vitex negundo</i> var. <i>heterophylla</i>
草本层优势种 Dominant species of herbaceous layer	细叶苔草 <i>Carex rigescens</i> 中华隐子草 <i>Cleistogenes chinensis</i>	细叶苔草 <i>Carex rigescens</i> 大油芒 <i>Spodiopogon sibiricus</i>
干扰程度 The Interference degree	轻度干扰	轻度干扰

2 研究方法

2.1 样地设置

2012 年 5 月,在物种组成、群落结构和生境相对均匀的荆条和绣线菊灌丛坡面上,分别设置 12 个 5 m×

5 m的灌木调查样方,样方之间设置约 10 m 的缓冲区。在每个样方内随机设置 1 个 1 m×1 m 的草本层收获样方。

2.2 灌木层碳密度估算

为推算灌木层的生物量,统计每个样方内灌木名称,测量样方内每一株灌木的高度(H)和基径(D),对于由根部萌生的多根茎构成的丛生灌木,将灌木每根茎看作一个“克隆个体”^[23],测定每根茎的基径(D)和高度(H),利用已建立的灌木种各器官生物量和 D^2H 之间的相关生长式(表 2)^[23]和实测的基径(D)和株高(H)数据,计算样方内所有灌木个体的生物量,相加得到灌木层生物量,灌木层含碳率按 0.5 计算^[24],通过换算得到灌木层碳密度。

表 2 东灵山地区 9 种常见灌木物种生物量异速生长模型

Table 2 Biomass allometric models for nine common shrub species in Mt. Dongling

物种 Species	器官 Organ	变量 Variable	方程 Equation	a	b	R^2	F	P
河蒴蕨花 <i>Wikstroemia chamedaphne</i>	根	D^2H	$y = ax^b$	0.81	0.61	0.83	128.46	<0.0001
	茎	D^2H	$y = ax^b$	0.92	0.78	0.95	468.52	<0.0001
	叶	D^2H	$y = ax^b$	1.32	0.35	0.48	24.61	<0.0001
荆条 <i>Vitex negundo</i> var. <i>heterophylla</i>	总	D^2H	$y = ax^b$	2.31	0.68	0.92	308.47	<0.0001
	根	D^2H	$y = ax^b$	0.2	1.09	0.84	101.70	<0.0001
	茎	D^2H	$y = ax^b$	0.54	0.95	0.82	88.73	<0.0001
胡枝子 <i>Lespedeza bicolor</i>	叶	D^2H	$y = ax^b$	0.86	0.59	0.66	39.62	<0.0001
	总	D^2H	$y = ax^b$	1.07	0.95	0.90	174.07	<0.0001
	根	D^2H	$y = ax^b$	0.19	1.06	0.41	5.53	0.047
山杏 <i>Armeniana sibirica</i>	茎	D^2H	$y = ax^b$	0.15	1.5	0.87	55.04	<0.0001
	叶	D^2H	$y = ax^b$	0.29	1.25	0.84	43.59	0.0002
	总	D^2H	$y = ax^b$	0.61	1.29	0.84	42.62	0.0002
小叶白腊 <i>Fraxinus bungeana</i>	根	D^2H	$y = ax^b$	1.26	0.77	0.81	100.04	<0.0001
	茎	D^2H	$y = ax^b$	1.09	0.79	0.94	387.69	<0.0001
	叶	D^2H	$y = ax^b$	1.61	0.56	0.87	161.66	<0.0001
小叶鼠李 <i>Rhamnus parvifolius</i>	总	D^2H	$y = ax^b$	3.53	0.74	0.91	243.33	<0.0001
	根	D^2H	$y = ax^b$	0.2	0.91	0.88	185.51	<0.0001
	茎	D^2H	$y = ax^b$	5.47	0.51	0.5	25.44	<0.0001
绣线菊 <i>Spiraea salicifolia</i>	叶	D^2H	$y = ax^b$	0.13	0.8	0.77	81.91	<0.0001
	总	D^2H	$y = ax^b$	4.47	0.62	0.72	64.84	<0.0001
	根	D^2H	$y = ax^b$	0.7	0.85	0.95	378.09	<0.0001
蚂蚱腿子 <i>Pertya dioica</i>	茎	D^2H	$y = ax^b$	0.74	0.91	0.96	473.21	<0.0001
	叶	D^2H	$y = ax^b$	0.89	0.58	0.88	159.83	<0.0001
	总	D^2H	$y = ax^b$	1.95	0.85	0.96	485.15	<0.0001
暴马丁香 <i>Syringa reticulata</i>	根	D^2H	$y = ax^b$	0.18	1.14	0.77	81.22	<0.0001
	茎	D^2H	$y = ax^b$	0.23	1.18	0.78	85.71	<0.0001
	叶	D^2H	$y = ax^b$	0.07	1.15	0.62	38.78	<0.0001
蚂蚱腿子 <i>Pertya dioica</i>	总	D^2H	$y = ax^b$	0.48	1.16	0.79	92.45	<0.0001
	根	D^2H	$y = ax^b$	0.07	1.16	0.95	420.22	<0.0001
	茎	D^2H	$y = ax^b$	0.42	1	0.91	194.40	<0.0001
暴马丁香 <i>Syringa reticulata</i>	叶	D^2H	$y = ax^b$	0.31	0.71	0.79	74.54	<0.0001
	总	D^2H	$y = ax^b$	0.64	1	0.95	343.63	<0.0001
	根	D^2H	$y = ax^b$	0.1	1.08	0.81	117.10	<0.0001
暴马丁香 <i>Syringa reticulata</i>	茎	D^2H	$y = ax^b$	0.33	1.02	0.92	311.34	<0.0001
	叶	D^2H	$y = ax^b$	0.43	0.75	0.8	114.20	<0.0001
	总	D^2H	$y = ax^b$	0.71	0.98	0.92	324.16	<0.0001

D (cm): 基径 basal diameter; H (cm): 株高 stem height; D^2H ((mm^2) × cm): 基径平方与树高乘积; a 和 b 是参数

2.3 草本层碳密度估算

草本层生物量调查采用收获法,分别收获每个草本样方中的地上与地下部分并称取鲜量,然后各取样 100 g 烘干至恒重,计算含水率,求算草本层地上与地下生物量。草本层含碳率按 0.5 计算^[24],换算得到草本层的碳密度。

植被碳密度为灌木层和草本层的碳密度之和。

2.4 土壤碳密度估算

于 2012 年 7 月在荆条和绣线菊灌丛坡面上,在上坡、中坡、下坡各开挖 1 m 深、1.5 m 长、1 m 宽的土壤剖面,除去枯落物层后,按 0—10、10—20、20—30 cm 和 30—50 cm 共 4 层采集土样,自然风干并除去砂砾及植物根系等杂质,研磨过 2 mm 筛后,经过冷冻混合球磨机磨碎后过 0.1—0.2 mm 筛,用于测定土壤有机碳,土壤有机碳含量采用重铬酸钾氧化外加加热法测定^[25]。同时,采用环刀法测定不同层次土壤容重,每层 3 次重复。

土壤有机碳密度计算公式如下:

$$SOC D_i = \sum_{i=1}^n C_i \times D_i \times B_i \times (1 - G_i) / 100$$

式中, $SOC D_i$:第 i 层土壤有机碳密度 (kg/m^2), C_i :第 i 层土壤有机碳含量 (g/kg), D_i :第 i 层土壤厚度 (cm), B_i :第 i 层土壤容重 (g/cm^3), G_i :第 i 层 > 2 mm 砾石的体积百分含量 (%)^[26]。

调查中发现荆条和绣线菊灌丛地表枯落物现存量很少,可忽略不计,因此本研究中灌丛生态系统总碳密度为植被(灌丛层和草本层)与土壤碳密度之和。

2.5 数据分析

数据整理和统计分析通过 Excel 2010 和 SPSS 20.0 软件完成,利用单因素方差分析法 (One-way ANOVA)、LSD 法和独立样本 T 检验比较群落内和群落间的差异。文中所有柱形图均采用 SigmaPlot 12.0 绘制。图表中的数据为平均值 \pm 标准误。

3 结果和分析

3.1 灌木层各器官碳密度及其分配特征

由图 2 可以看出,除了根器官,荆条灌丛灌木层枝和叶碳密度均显著低于绣线菊灌丛 ($P < 0.05$)。荆条和绣线菊灌丛灌木层不同器官碳密度之间均存在显著差异 ($P < 0.05$),且均表现为枝 > 根 > 叶,其中枝是灌木层碳密度的主体,为 $(2.24 \pm 0.30) \text{ t}/\text{hm}^2$ 和 $(2.82 \pm 0.38) \text{ t}/\text{hm}^2$,分别占灌木层碳密度的 $(51.50 \pm 0.56)\%$ 和 $(50.82 \pm 0.44)\%$;根碳密度为 $(1.61 \pm 0.25) \text{ t}/\text{hm}^2$ 和 $(2.01 \pm 0.30) \text{ t}/\text{hm}^2$,分别占灌木层碳密度的 $(36.59 \pm 0.62)\%$ 和

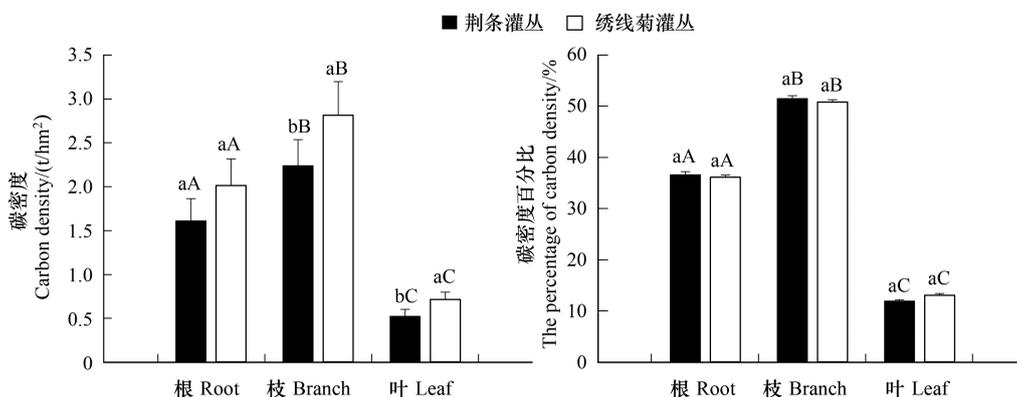


图 2 荆条和绣线菊灌丛灌木层各器官碳密度及分配格局

Fig.2 Carbon density and its allocation of shrub layer in *Vitex negundo* var. *heterophylla* and *Spiraea salicifolia* shrublands

柱形图上不同小写字母表示同一组在不同群落间差异显著 ($P < 0.05$),不同大写字母表示同一群落内不同组间差异显著

(36.14±0.44)%;叶碳密度最低,为(0.52±0.07) t/hm²和(0.71±0.08) t/hm²,分别占灌木层碳密度的(11.90±0.24)%和(13.04±0.34)%。

3.2 草本层碳密度及分配特征

由图 3 可以看出,荆条和绣线菊灌丛草本层地上部分碳密度大于地下部分,且荆条灌丛草本层碳密度显著低于绣线菊灌丛($P<0.05$),二者地上部分草本层碳密度为(0.17±0.01) t/hm²和(0.22±0.01) t/hm²,分别占整个草本层碳密度的 59.67%和 53.20%;地下部分碳密度为(0.11±0.01) t/hm²和(0.20±0.01) t/hm²,分别占整个草本层碳密度的 40.33%和 46.80%。绣线菊灌丛草本层地上和地下部分的碳密度差异不显著($P>0.05$),而在荆条灌丛存在显著差异($P<0.05$)。

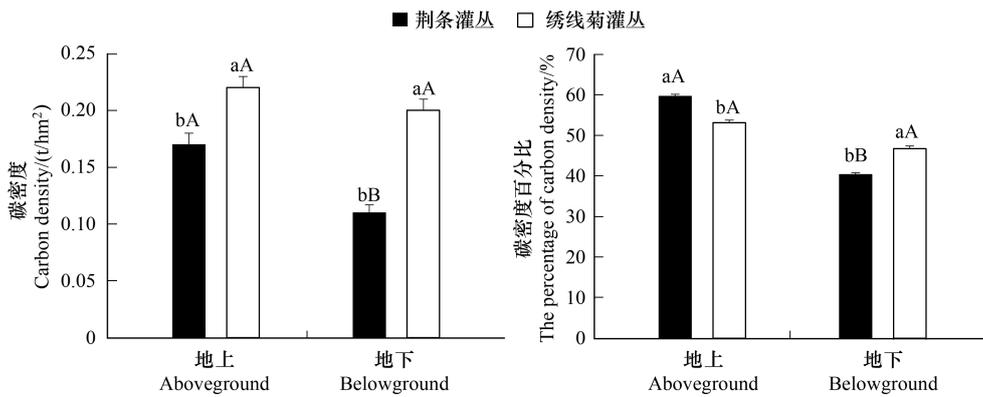


图 3 荆条和绣线菊灌丛草本层碳密和分配

Fig.3 Carbon density and its allocation of herb layer in *Vitex negundo* var. *heterophylla* and *Spiraea salicifolia* shrublands

3.3 土壤层碳密度及分配特征

由图 4 可以看出,在荆条灌丛,不同土层的碳密度存在显著差异($P<0.05$);在绣线菊灌丛,不同土层的碳密度无显著差异($P>0.05$)。荆条灌丛各土层有机碳密度均分别高于绣线菊灌丛,尽管两灌丛间的差异没有达到显著性水平($P>0.05$)。两灌丛土壤有机碳密度均呈现随着土层深度增加而逐渐降低的趋势(土层厚度以 10 cm 计)。绣线菊和荆条灌丛 0—10 cm 土层的土壤碳密度最大,分别为(32.30±11.47) t/hm²和(23.20±6.71) t/hm²,分别占整个土壤层碳密度的 34.78%和 34.67%;10—20 cm 土层次之,为(17.28±1.51) t/hm²和(12.26±2.15) t/hm²,分别占总量的 20.09%和 19.72%;20—30 cm 土层的碳密度为(14.37±1.73) t/hm²和

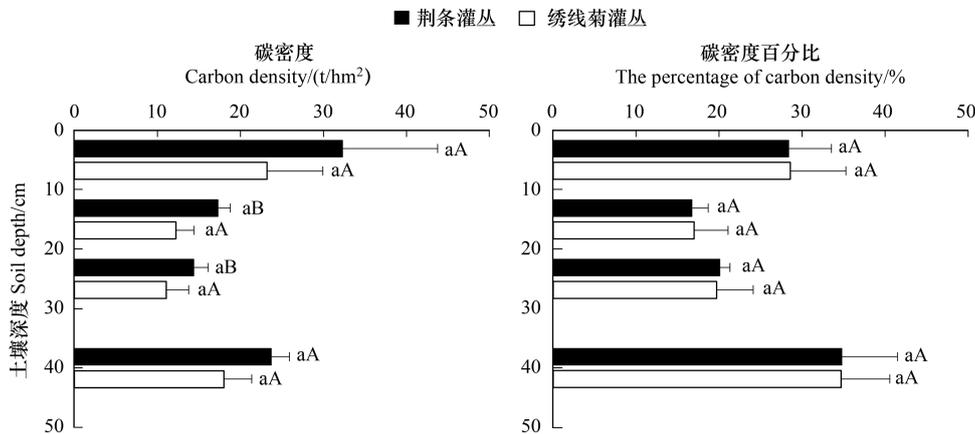


图 4 荆条和绣线菊灌丛土壤层碳密度和分配

Fig.4 Carbon density and its allocation of soil layer in *Vitex negundo* var. *heterophylla* and *Spiraea salicifolia* shrublands

(11.03±2.73) t/hm², 分别占整个土壤层碳密度的 16.72% 和 17.00%; 30—50 cm 土层的碳密度为 (23.71±2.20) t/hm² 和 (18±3.35) t/hm², 占总土壤碳密度的 28.40% 和 28.60%。0—30 cm 土层碳密度占整个土壤层碳密度的 71.59% 和 71.39%, 表明土壤层有机碳主要存储在 0—30 cm 土层。

从表 3 可以看出, 荆条灌丛生态系统的碳密度为 92.32 t/hm², 显著高于绣线菊灌丛 (70.47 t/hm²) ($P < 0.05$), 荆条与绣线菊灌丛的灌木层与土壤层碳密度之间均无显著性差异, 但前者草本层碳密度显著低于后者 ($P < 0.05$)。荆条和绣线菊灌丛均以土壤层碳密度最大, 为 87.67 t/hm² 和 64.51 t/hm², 分别占总碳密度的 94.96% 和 91.54%; 其次为灌木层, 荆条灌丛灌木层的碳密度 (4.37 t/hm²) 低于绣线菊灌丛 (5.54 t/hm²), 分别占总碳密度的 4.73% 和 7.86%; 2 种灌丛草本层的碳密度最小, 为 0.28 t/hm² 和 0.42 t/hm², 分别占总碳密度的 0.31% 和 0.60%。因此, 在荆条和绣线菊灌丛生态系统碳库中, 土壤碳库占绝对优势。

表 3 荆条和绣线菊灌丛碳密度及其分配比例

Table 3 Carbon density and distribution proportion of *Vitex negundo* var. *heterophylla* and *Spiraea salicifolia* shrublands

组分 Component	项目 Item	V.n	S.t	组分 Component	项目 Item	V.n	S.t
灌木层 Shrub layer	碳密度/(t/hm ²) 比例/%	4.37±0.31a 4.73	5.54±0.37a 7.86	土壤层 Soil layer	碳密度/(t/hm ²) 比例/%	87.67±3.50a 94.96	64.51±7.21a 91.54
草本层 Herb layer	碳密度/(t/hm ²) 比例/%	0.28±0.02b 0.31	0.42±0.03a 0.60	总计 Total	碳密度/(t/hm ²) 比例/%	92.32±0.62a 100	70.47±0.73b 100

V.n: 荆条灌丛 *Vitex negundo* var. *heterophylla* shrubland; S.t: 绣线菊灌丛 *Spiraea salicifolia* shrubland; 同行不同字母表示群落类型间差异显著 ($n = 12, P < 0.05$)

4 讨论与结论

4.1 讨论

4.1.1 土壤碳密度

土壤碳储量是陆地生态系统中的最大碳库^[27-28]。本研究表明北京东灵山荆条和绣线菊灌丛生态系统碳密度均以土壤层碳密占比最大 (94.96% 和 91.54%), 这与我国灌丛土壤层碳储量占其生态系统碳储量的 89.22% 结论相似^[5]。可见, 2 种温带灌丛生态系统主要以土壤来固存碳量。本研究中土壤有机碳含量、碳密度均随着土层加深而降低, 这与梁启鹏等^[29] 和舒洋等^[30] 的研究结论一致。荆条和绣线菊灌丛表层土壤 (0—30 cm) 碳密度分别占整个土壤层的 71.59% 和 71.39%, 这是因为植物根系、动植物残体和凋落物等分解形成的有机质首先进入土壤表层, 使得表层土壤有机碳密度高于深层土壤^[31]。另外, 表层土壤聚集了大量根系, 根系分泌物也形成了大量的根际碳, 以上因素是土壤有机碳表面富集的主要因素^[32]。因此, 对灌丛表层土壤进行有效的防护十分必要。在不同植被类型条件下, 植物根系、凋落物分解程度及人类活动等因素均会对土壤产生不同程度的干扰, 致使土壤容重及土壤有机碳含量随之发生变化, 进而导致土壤碳密度也存在一定差异^[29]。研究中荆条灌丛的土壤碳密度高于绣线菊, 尽管差异没有达到显著性水平, 可能是因为荆条灌丛每年归还土壤中的凋落物生物量较多^[23], 前期研究结果显示, 由于荆条凋落物 C/N 低于绣线菊灌丛, 所以易分解^[33], 更有利于土壤有机碳的积累。另外, 绣线菊是一种浅根系的植物, 其根系生长范围为 0—20 cm 土壤层^[34], 荆条根系发达, 生物量较大, 根系垂直分布范围为 0—60 cm 土层^[35], 二者的根系特征及其生长分布规律上的差异也是可能也是导致荆条灌丛的土壤碳含量和碳密度均显著高于绣线菊的原因之一。荆条和绣线菊灌丛土壤碳密度均值为 76.09 t/hm², 均低于我国森林和草地土壤碳密度平均水平 (123.3 t/hm² 和 143 t/hm²)^[36-37], 但灌丛碳密度分别占森林与草地碳密度的 61.60% 和 53.15%, 更进一步说明了华北地区灌丛土壤碳库在中国乃至全球土壤碳库的重要性。

4.1.2 灌丛生物量碳密度

植被生物量碳作为生态系统总碳储量的重要组成部分之一, 了解生态系统碳汇的前提是准确估算植被碳汇

量^[38]。造林密度^[39]、地形和气候^[5]等多种因素均会影响林分碳密度。本研究中灌木层是植被碳密度的主体,灌木层中碳储量以枝为主,约占整个灌木层碳密度的50%,是由灌木各器官生物量决定的。绣线菊灌木层碳密度为 5.54 t/hm^2 ,为荆条灌丛的1.27倍,很可能是因为绣线菊灌木林植株密度高于荆条灌木林,导致其生物量较高(表1和图5)。在对2种灌丛进行群落调查时,我们发现荆条灌木层郁闭度大于绣线菊灌丛。本研究中,荆条灌丛草本层碳密度小于绣线菊灌丛,可能是因为前者较高的灌木层郁闭度导致林下光照不足,进而影响草本层正常生长。荆条和绣线菊灌丛植被层碳密度分别为 4.65 t/hm^2 和 5.96 t/hm^2 ,与湖南省灌丛植被平均碳密度(15.62 t/hm^2)相比^[13],二者相对较低,也低于全国灌丛植被平均碳密度(9.2 t/hm^2)^[5],但显著高于西鄂尔多斯荒漠灌丛植被的碳密度($0.76\text{—}1.47 \text{ t/hm}^2$)^[40]。这主要是由于我国亚热带常绿阔叶林区域的灌丛分布面积占全国灌丛总面积的51.16%^[41],且该区域的水热条件有利于植物的生长,使得植被碳密度偏高。此外,西鄂尔多斯属于干旱区,该区域的植被生物量和生长形态取决于土壤水分,干旱缺水的环境导致该区域荒漠灌丛植被碳密度偏低^[40]。

4.1.3 灌丛生态系统碳密度

荆条和绣线菊灌丛碳密度分别为 92.32 t/hm^2 和 70.47 t/hm^2 ,绣线菊灌丛碳密度与我国北方温带灌丛生态系统碳密度(69.8 t/hm^2)^[42]持平,而荆条灌丛碳密度与我国灌丛生态系统(90.07 t/hm^2)^[25]和草地(90.25 t/hm^2)^[43]的平均碳密度持平,但二者均明显低于森林生态系统(163.8 t/hm^2)^[43]。尽管如此,但灌丛植被仍能在一定程度上维持陆地生态系统碳库。荆条和绣线菊灌丛生态系统的总碳密度分别达到该地区白桦(*Betula platyphylla*)林、油松(*Pinus tabulaeformis*)林和辽东栎(*Quercus wutaishanica*)林总碳密度的36.19%—35.60%、31.73%—30.98%、33.33%—33.01%和27.62%—27.18%、24.22%—23.65%、25.44%—25.19%^[44],表明该地区灌丛生态系统存在一定的碳截存效应,因此对灌丛生态系统的碳密度研究是评估区域生态系统碳密度的重要内容。然而,近年来在对森林植被碳汇评估的大部分研究中,灌丛植被未被考虑在内^[45],进而低估了区域水平上碳储量。因此,重视灌丛碳储量的研究是深入掌握中国森林生态系统碳储量的重要内容。

4.2 结论

荆条和绣线菊灌丛碳密度分别为 92.32 t/hm^2 和 70.47 t/hm^2 ,其中灌木层是植被碳密度的主体,2种灌丛灌木层碳密度为 4.37 t/hm^2 和 5.54 t/hm^2 ,分别占整个植被层的93.98%和92.95%,荆条和绣线菊灌丛灌木层各器官的碳密度为枝显著高于根,且二者均显著高于叶。草本层在植被碳密度中碳汇贡献率较低。灌木层碳密度与灌木密度显著正相关。土壤是生态系统碳密度的主体,2种灌丛土壤碳密度为 87.67 t/hm^2 和 64.51 t/hm^2 ,分别占生态系统碳密度的94.96%和91.54%,土壤有机碳富集于表层土壤中,即表聚作用明显,在以后的研究中应该重点加强对表层土壤的研究。荆条灌丛各土壤层碳密度均高于绣线菊灌丛,可能与荆条凋落物产量、质量较高及根系垂直分布范围广等因素有关。从固碳功能来看,在华北地区进行植被重建时,合理密植荆条和绣线菊灌丛,有利于提高灌丛的碳汇能力。

参考文献(References):

- [1] Piao S L, Fang J Y, Ciais P, Peylin P, Huang Y, Sitch S, Wang T. The carbon balance of terrestrial ecosystems in China. *Nature*, 2009, 458(7241): 1009-1013.
- [2] 谢宗强,唐志尧. 中国灌丛生态系统碳储量的研究. *植物生态学报*, 2017, 41(1): 1-4.

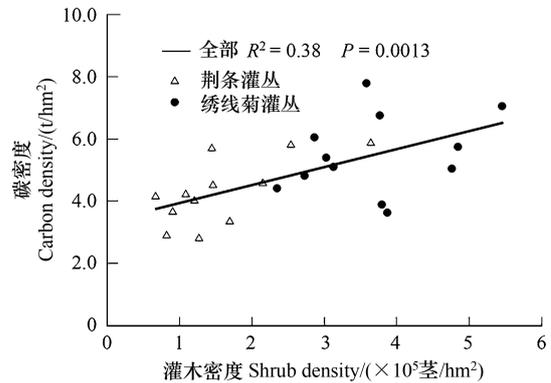


图5 灌木层碳密度与灌木碳密度的相关关系

Fig.5 Relationship between carbon density of shrub layer and shrub density

- [3] 朴世龙,方精云,黄耀. 中国陆地生态系统碳收支. 中国基础科学,2010,12(2): 20-22.
- [4] 吕超群,孙书存. 陆地生态系统碳密度格局研究概述. 植物生态学报,2004,28(5): 692-703.
- [5] 谢宗强,唐志尧,刘庆,徐文婷. 中国灌丛生态系统碳收支研究. 北京: 科学出版社,2019.
- [6] 王昭懿,王灵军,田晓龙,张乾,王吉高,帅洪刚,陈芬,刘敏,金宝成,赵学春. 黔西北地区不同杜鹃灌丛群落特征和物种多样性. 生态学报,2023,43(2): 693-701.
- [7] Zong H, Sun J R, Zhou L, Bao F, Zheng X Z. Effect of altitude and climatic parameters on shrub-meadow community composition and diversity in the dry valley region of the eastern Hengduan Mountains, China. Journal of Mountain Science, 2022, 19(4): 1139-1155.
- [8] 刘冲,野起瑞,李江文,张晓曦,邓健,裴婧宏,樊慧. 黄土丘陵区撂荒年限和坡向对灌丛生物量及丰富度的影响. 草地学报,2023,31(9): 2826-2833.
- [9] 刘鹏,贾昕,杨强,查天山,王奔,马景永. 毛乌素沙地油蒿灌丛从生态系统的土壤呼吸特征. 林业科学,2018,54(5): 10-17.
- [10] 梁雪丽,梁晓霞,毛晓雅,柴宝峰,贾彤. 芦芽山鬼箭锦鸡儿灌丛不同深度土壤细菌群落分布格局及其影响因素. 应用生态学报,2024,35(2): 381-389.
- [11] 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.
- [12] Ni J. Carbon storage in terrestrial ecosystems of China: estimates at different spatial resolutions and their responses to climate change. Climatic Change, 2001, 49(3): 339-358.
- [13] 杨路存,李长斌,宁伟,聂秀青,徐文华,周国英. 青海高寒金露梅灌丛碳密度及其分配格局. 植物生态学报,2017,41(1): 62-70.
- [14] 王鑫,杨德刚,熊黑钢,柳妍妍,安尼瓦尔·买买提. 新疆干旱区4种柽柳灌丛碳储量特征. 生态学报,2017,37(13): 4384-4391.
- [15] Vourlitis G L, Zorba G, Pasquini S C, Mustard R. Carbon and nitrogen storage in soil and litter of southern Californian semi-arid shrublands. Journal of Arid Environments, 2007, 70(1): 164-173.
- [16] 高巧,阳小成,尹春英,刘庆. 四川省甘孜藏族自治州高寒矮灌丛生物量分配及其碳密度的估算. 植物生态学报,2014,38(4): 355-365.
- [17] 张蕾,李家湘,徐文婷,熊高明,谢宗强. 中国亚热带山地杜鹃灌丛生物量分配及其碳密度估算. 植物生态学报,2017,41(1): 43-52.
- [18] 张建华,唐志尧,沈海花,方精云. 氮添加对北京东灵山地区灌丛土壤呼吸的影响. 植物生态学报,2017,41(1): 81-94.
- [19] 冯云,马克明,张育新,祁建,张洁瑜. 北京东灵山辽东栎(*Quercus liaotungensis*)林海拔梯度的物种多度分布. 生态学报,2007,27(11): 4743-4750.
- [20] 李宗善,陈维梁,韦景树,买尔当·克依木,张育新,张霜,王晓春. 北京东灵山辽东栎林树木生长对气候要素的响应特征. 生态学报,2021,41(1): 27-37.
- [21] 高贤明,王巍,杜晓军,马克平. 北京山区辽东栎林的径级结构、种群起源及生态学意义. 植物生态学报,2001,25(6): 673-678.
- [22] 胡淑萍,余新晓,郭永盛. 北京山区天然荆条灌丛立地条件的数量化分析. 林业资源管理,2010(3): 60-63.
- [23] 张建华,唐志尧,沈海花,方精云. 北京东灵山地区常见灌丛生长及凋落物生产对氮添加的响应. 植物生态学报,2017,41(1): 71-80.
- [24] 李亚男,虞晓凡,许中旗,刘乐乐,姚卫星,王丽. 冀北山地2种典型灌丛的碳密度特征. 林业科学,2014,50(6): 28-33.
- [25] 舒蛟靖,陈奇伯,常玉山,赵吉霞,黄北. 华山松人工林土壤碳密度及其影响因子. 干旱区资源与环境,2015,29(8): 110-114.
- [26] 马剑,金铭,敬文茂. 祁连山中段典型植被土壤有机碳密度研究. 2020,40(8): 99-105.
- [27] Schulze E D, Freibauer A. Environmental science: carbon unlocked from soils. Nature, 2005, 437(7056): 205-206.
- [28] Dawson J J C, Smith P. Carbon losses from soil and its consequences for land-use management. Science of the Total Environment, 2007, 382(2/3): 165-190.
- [29] 梁启鹏,余新晓,庞卓,王琛,吕锡芝. 不同林分土壤有机碳密度研究. 生态环境学报,2010,19(4): 889-893.
- [30] 舒洋,周梅,赵鹏武,葛鹏,张波,王梓璇,赵威. 兴安落叶松人工林土壤碳密度分布特征研究. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2017, 45(6): 44-52.
- [31] 朱建佳,戴尔卓,郑度,王晓莉. 会同森林生态实验站磨哨林场森林碳密度及分配特征. 自然资源学报,2016,31(11): 1871-1880.
- [32] 廖娇娇,窦艳星,安韶山. 黄土高原不同植被群落多样性与土壤有机碳密度关系研究. 水土保持研究,2022,29(4): 75-82.
- [33] Zhang J H, Li H, Zhang H F, Zhang H, Tang Z Y. Responses of litter decomposition and nutrient dynamics to nitrogen addition in temperate shrublands of North China. Frontiers in Plant Science, 2021, 11: 618675.
- [34] 杨吉华,李红军,李焕平,杨德运,李萍. 4种灌木林地根系分布特征及其固持土壤效应的研究. 水土保持学报,2007,21(3): 48-51.
- [35] 王锋佰,孙海红. 辽西低山丘陵区荆条根系特征与生长分布规律. 辽宁林业科技,2019(5): 17-20,70.
- [36] 李江. 中国主要森林群落林下土壤有机碳储量格局及其影响因子研究[D]. 雅安: 四川农业大学,2008.
- [37] 张利,周广胜,汲玉河,白永飞. 中国草地碳储量时空动态模拟研究. 中国科学: 地球科学,2016,46(10): 1392-1405.
- [38] 周玉荣,于振良,赵士洞. 我国主要森林生态系统碳储量与碳平衡. 植物生态学报,2000,24(5): 518.
- [39] 王蕾,张景群,王晓芳,苏印泉. 黄土高原两种人工林幼林生态系统碳汇能力评价. 东北林业大学学报,2010,38(7): 75-78.
- [40] 党晓宏,高永,蒙仲举,高君亮,丁延龙,王祯仪. 西鄂尔多斯荒漠灌丛生态系统碳密度. 中国沙漠,2018,38(2): 352-362.
- [41] 王杨. 中国灌丛生物量的组分分配和空间分布[D]. 北京: 中国科学院大学,2017.
- [42] 郭焱培,杨弦,安尼瓦尔·买买提,刘鸿雁,马文红,于顺利,唐志尧. 中国北方温带灌丛生态系统碳、氮、磷储量. 植物生态学报,2017,41(1): 14-14.
- [43] Tang X L, Zhao X, Bai Y F, Tang Z Y, Wang W T, Zhao Y C, Wan H W, Xie Z Q, Shi X Z, Wu B F, Wang G X, Yan J H, Ma K P, Du S, Li S G, Han S J, Ma Y X, Hu H F, He N P, Yang Y H, Han W X, He H L, Yu G R, Fang J Y, Zhou G Y. Carbon pools in China's terrestrial ecosystems: new estimates based on an intensive field survey. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2018, 115(16): 4021-4026.
- [44] 方精云,刘国华,朱彪,王效科,刘绍辉. 北京东灵山三种温带森林生态系统的碳循环. 中国科学: D辑,2006(6): 533-543.
- [45] 康文星,田微,何介南,崔莎莎. 广州市十种森林生态系统的碳循环. 应用生态学报,2009,20(12): 2917-2924.