

DOI: 10.11686/cyxb2018309

http://cyxb.magtech.com.cn

李琳, 赵威. 豫西北地区暖性灌草丛类草地生态系统固碳特征. 草业学报, 2019, 28(5): 26-35.

Li L, Zhao W. Carbon sequestration characteristics of a warm shrub tussock grassland ecosystem in northwestern Henan. Acta Prataculturae Sinica, 2019, 28(5): 26-35.

豫西北地区暖性灌草丛类草地生态系统固碳特征

李琳, 赵威*

(河南科技大学农学院, 河南 洛阳 471023)

摘要: 草地中灌木数量动态变化是影响草地生态系统碳收支的重要因素, 灌木层的碳储量是草地生态系统碳库中最不确定的组分之一。暖性灌草丛在豫西北丘陵山地广泛分布, 属区域典型植被类型。为揭示暖性灌草丛类草地生态系统固碳特征, 对豫西北地区7个样地的灌木层、草本层与土壤碳密度进行了调查, 并对生态系统碳密度进行了计算。结果表明, 植被与土壤平均有机碳密度分别为 2360.07 和 $4610.47 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2}$, 其中灌木层植被碳密度 ($981.63 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2}$) 低于草本层 ($1387.44 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2}$), 但差异不显著 ($P > 0.05$)。植被碳密度主要由根系所贡献, 占整个植被碳密度的 93.04% , 其中灌木层根系所占比例为 41.51% , 略小于草本层。生态系统中土壤碳密度占有较大比例, 约占整个生态系统碳密度的 62.80% 。对不同样地而言, 由于各自所处生境不同, 其生态系统固碳特征存在一定区域差异。各样地的植被碳密度大小顺序依次为 $P_1 > P_5 > P_2 > P_4 > P_6 > P_7 > P_3$, 但差异并不显著 ($P > 0.05$); 土壤碳密度大小顺序依次为 $P_1 > P_2 > P_6 > P_5 > P_4 > P_3 > P_7$, 其中 P_1 与 P_4 、 P_3 、 P_7 存在显著差异 ($P < 0.05$); 生态系统碳密度大小顺序依次为: $P_1 > P_2 > P_6 > P_5 > P_4 > P_7 > P_3$, 其中 P_1 与 P_4 、 P_3 、 P_7 差异显著 ($P < 0.05$)。

关键词: 灌草丛草地; 生物量分布; 碳密度; 豫西北

Carbon sequestration characteristics of a warm shrub tussock grassland ecosystem in northwestern Henan

LI Lin, ZHAO Wei*

College of Agriculture, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China

Abstract: Dynamics of shrub populations are important factors affecting the carbon budget of natural grassland ecosystems. Shrub biomass and the soil carbon stock beneath shrubs are among the most uncertain components in grassland ecosystem carbon accounting. Warm shrub tussock is widely distributed in hilly areas in northwestern Henan and comprises a 'typical' (i. e. reference) regional vegetation type. To elucidate the carbon sequestration characteristics of a warm shrub tussock grassland ecosystem, the carbon density of above ground shrub and herb biomass, and the associated soil carbon density were measured in seven plots of different areas in northwestern Henan, and ecosystem carbon density was calculated. The mean vegetation and mean soil organic carbon densities were 2360.07 and $4610.47 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2}$, respectively. The vegetation carbon density for shrub vegetation was $981.63 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2}$, while that of the herb layer was $1387.44 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2}$. The carbon density was mainly contributed by the roots, which accounted for 93.04% of the total vegetation biomass. For

收稿日期: 2018-05-10; 改回日期: 2018-07-10

基金项目: NSFC-河南人才培养联合基金(U1304306), 中国科学院战略性先导科技专项-应对气候变化的碳收支认证及相关问题(XDA05050402)和河南科技大学学科提升计划(13660001)资助。

作者简介: 李琳(1994-), 女, 河南济源人, 在读硕士。E-mail: 345660744@qq.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: zhaoweil@haust.edu.cn

shrubs, the root biomass was 41.51%, of total biomass; for herbs it was slightly more. The soil carbon density accounted for 62.80% of the total ecosystem carbon density. Across the seven plots measured, there were differences in the characteristics of ecosystem carbon sequestration. For vegetation carbon density, the plots ranked: $P_1 > P_5 > P_2 > P_4 > P_6 > P_7 > P_3$, but the difference was not significant ($P > 0.05$). For soil carbon density the ranking was $P_1 > P_2 > P_6 > P_5 > P_4 > P_3 > P_7$, with significant differences between P_1 and P_4 , P_3 , and P_7 ($P < 0.05$). The ranking for ecosystem carbon density was $P_1 > P_2 > P_6 > P_5 > P_4 > P_7 > P_3$, with P_1 being significantly different from P_4 , P_3 and P_7 ($P < 0.05$).

Key words: shrub tussock grassland; biomass distribution; carbon density; northwest Henan

大气中温室气体逐年增加导致全球变暖日益严重,受到了越来越多国际学者的关注^[1]。陆地生态系统碳库主要由植被和土壤两部分构成,二者总储量约为大气碳库的 3 倍,对气候变化和生态系统碳循环具有重要影响^[2-3]。近年来,我国学者开展了大量有关森林和草地生态系统植被碳储量估算的研究^[4-6],但目前对于灌丛生态系统植被生产力与碳储量研究相对缺乏,尤其缺少地下根系和凋落物的数据^[7],导致对碳储量的估算具有极大的不确定性。灌草丛多为森林破坏后形成的次生植被,广泛分布于我国温带地区的丘陵山地,是一种以灌木为优势种、中生和旱中生草本为建群种的主要植被类型^[8]。灌木具有种类繁多、生命力强、生产力高、适生范围宽等特点,不仅在群落演替过程中扮演重要角色,在全球碳循环和气候调节中也发挥着重要作用^[1,9]。全球气候变暖以及人为干扰影响使得草地灌丛化日益严重^[10-11],以及生物入侵引发的区域碳储量变化,使得灌草丛固碳潜力研究成为新的研究热点^[12-13],而灌草丛面积增加被认为是陆地生态系统碳储量增加的主要原因^[14]。但对于灌草丛的研究主要集中在其地上部分^[9, 15],有关地下生物量研究较少。灌丛生物量的估算多采用转换因子法^[9],缺乏实测数据,导致估算结果与实测值相差较大。我国是世界上灌草丛分布面积最广泛的国家之一,拥有灌草丛近 $2.0 \times 10^8 \text{ hm}^2$ ^[16],占我国陆地面积的 1/5,是全球现存森林面积的近 2 倍^[9]。因此研究灌草丛面积增加而导致的生态系统碳储量改变,对于正确评价我国陆地生态系统的碳汇功能和固碳潜力具有重要意义。

河南气候温和,雨量充沛,拥有各类草地面积约 $4.60 \times 10^6 \text{ hm}^2$,占全省土地面积的 27.54%,占全国草地的 1.20%。作为河南典型草地类型之一,暖性灌草丛主要分布在半干旱半湿润的豫西北地区。由于林地砍伐、土地弃耕等人类活动影响,豫西北灌草丛分布广泛,其碳储量占植被很大比例。本研究在豫西北暖性灌草丛草地进行调查取样,分析不同样地固碳特征,并比较草本层与灌木层的碳储量差异,以期为准确评估我国草地生态系统总体碳库及其固碳潜力提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

豫西北地区位于河南境内伏牛山脊和淮河干流的秦岭淮河一线以北,属暖温带、湿润至半湿润季风气候^[17],四季分明,年平均气温 $10.9 \sim 13.73 \text{ }^\circ\text{C}$,年平均降水量 $528.52 \sim 857.22 \text{ mm}$ ^[18]。暖性灌草丛集中分布在豫西北地区,地形多丘陵山地,主要土壤类型有钙质石质土、石质土、棕壤性土、褐土、黄绵土等。主要的灌木优势种为酸枣(*Ziziphus jujuba*)、黄荆(*Vitex negundo*)、杠柳(*Periploca sepium*)、长叶胡枝子(*Lespedeza caraganae*)等,草本优势种为白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)、阿拉伯黄背草(*Themeda triandra*)、马唐(*Digitaria sanguinalis*)等。

1.2 研究方法

1.2.1 样地选择 在 20 世纪 90 年代全国草地类型图和 2000 土地利用图基础上,结合 1997—1998 年郭孝等^[19-20]对河南草地的调查结果,选取豫西北地区暖性灌草丛草地,于 2017 年开展调查研究。

1.2.2 样方分布及取样原则 根据典型性和代表性原则设置 7 个样地(表 1),分别位于河南林州、辉县、灵宝、嵩县、淇县、浞池、修武,每个样地 1~4 个取样点。在每个取样点中,按照坡度方向设置一条 100 m 的样线,每隔 20 m 设定 12 个 $5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ 的灌木样方,同时在灌木样方内设置两个 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 的草本植物样方,调查灌木与草本植物种类及群落特征,并进行植物与土壤的取样。

表 1 样地概况

Table 1 Basic information of the sampled plots

样地 Plot	地理坐标 Location	海拔 Altitude (m)	植被盖度 Vegetation coverage (%)	土壤类型 Soil type	年降水量 Annual precipitation (mm)	年均温度 Mean average temperature (°C)	灌木物种组成 Composition of shrub species	草本优势种组成 Dominant species of herb
P ₁	113.73° E, 36.05° N	471	65	钙质石质土 Calcareous stone soil	672.1	12.8	酸枣, 黄荆, 截叶铁扫帚, 野皂荚, 多花胡枝子 <i>Ziziphus jujube</i> , <i>Vi-</i> <i>tex negundo</i> , <i>Lespedeza cuneata</i> , <i>Gleditsia microphylla</i> , <i>Lespede-</i> <i>za floribunda</i>	白羊草, 芨草, 阿拉伯黄背草, 马唐 <i>Bothriochloa ischae-</i> <i>mum</i> , <i>Arthraxon hispi-</i> <i>dus</i> , <i>Themeda triandra</i> , <i>Digitaria sanguinalis</i>
P ₂	113.65° E, 35.80° N	564	81	石质土 Stony soil	489.1	13.5	黄荆, 酸枣, 茵陈蒿, 野皂荚, 椭圆 叶木蓝, 杠柳, 中华绣线菊 <i>V. ne-</i> <i>gundo</i> , <i>Z. jujube</i> , <i>Artemisia</i> <i>capillaries</i> , <i>G. microphylla</i> , <i>In-</i> <i>digofera cassoides</i> , <i>Periploca</i> <i>sepium</i> , <i>Spiraea chinensis</i>	白羊草, 狗尾草, 阿拉伯黄 背草, 马唐 <i>B. ischae-</i> <i>mum</i> , <i>Setaria viridis</i> , <i>T.</i> <i>triandra</i> , <i>D. sanguinalis</i>
P ₃	114.68° E, 34.91° N	517	53	棕壤性土 Brown soil	606.5	14.5	铁杆蒿, 长叶胡枝子, 酸枣, 河北木 蓝, 地稍瓜, 截叶铁扫帚, 紫穗槐 <i>Artemisia gmelinii</i> , <i>Lespedeza</i> <i>caraganae</i> , <i>Z. jujube</i> , <i>Indigofera</i> <i>bungeana</i> , <i>Cynanchum thesioides</i> , <i>L. cuneata</i> , <i>Amorpha fruticosa</i>	白羊草, 野艾蒿, 芨草 <i>B.</i> <i>ischaeum</i> , <i>Artemisia la-</i> <i>xandulaefolia</i> , <i>A. hispi-</i> <i>dus</i>
P ₄	112.72° E, 34.52° N	362	53	褐土性土 Cinnamon soil	681.5	14.2	黄荆, 杠柳, 多花胡枝子, 中华绣 线菊, 两面针 <i>V. negundo</i> , <i>P.</i> <i>sepium</i> , <i>L. floribunda</i> , <i>S.</i> <i>chinensis</i> , <i>Zanthoxylum nitidum</i>	白羊草, 阿拉伯黄背草, 芨 草 <i>B. ischaemum</i> , <i>T. tri-</i> <i>andra</i> , <i>A. hispidus</i>
P ₅	114.05° E, 35.70° N	424	60	褐土、钙质 石质土 Cinnamon soil, Calcareous stone soil	519.6	13.8	黄荆, 酸枣, 野皂荚, 中华绣线菊, 长叶胡枝子, 卵叶鼠李, 杭子梢 <i>V. negundo</i> , <i>Z. jujube</i> , <i>G. mi-</i> <i>crophylla</i> , <i>S. chinensis</i> , <i>L. cara-</i> <i>ganae</i> , <i>Rhamnus bungeana</i> , <i>Campylotropis macrocarpa</i>	白羊草, 芨草, 马唐 <i>B.</i> <i>ischaeum</i> , <i>A. hispidus</i> , <i>D. sanguinalis</i>
P ₆	111.96° E, 35.01° N	729	65	黄绵土 Loessial soil	662.4	12.6	陕西荚蒾, 黄栌, 多花胡枝子, 黄 荆, 酸枣, 美丽胡枝子 <i>Viburnum</i> <i>schensianum</i> , <i>Cotinus coggygria</i> , <i>L. floribunda</i> , <i>V. negundo</i> , <i>Z.</i> <i>jujube</i> , <i>Lespedeza formosa</i>	野艾蒿, 阿拉伯黄背草, 马 唐 <i>A. lavandulaefolia</i> , <i>T.</i> <i>triandra</i> , <i>D. sanguinalis</i>
P ₇	113.38° E, 35.47° N	1234	76	棕壤性土 Brown soil	560.4	14.4	黄荆, 悬钩子, 地稍瓜, 多花胡枝 子, 杠柳, 椭圆叶木蓝, 雀儿舌头 <i>V. negundo</i> , <i>Rubus coreanus</i> , <i>C.</i> <i>thesioides</i> , <i>L. floribunda</i> , <i>P.</i> <i>sepium</i> , <i>I. cassoides</i> , <i>Leptopus</i> <i>chinensis</i>	白羊草, 阿拉伯黄背草, 芨 草 <i>B. ischaemum</i> , <i>T. tri-</i> <i>andra</i> , <i>A. hispidus</i>

1.3 生物量的测定

采用收获法^[8]测定群落植物活体和凋落物生物量。草本植物地面以上的所有部分齐地面剪下, 灌木按照高

度(height, H)大小确定剪取比例,收集所有当年的新枝、老龄枝和叶片($H > 2.0$ m,取 25%; $H = 1.0 \sim 2.0$ m,取 50%; $H < 1.0$ m,取 100%)以及地上的凋落物,除去土粒和杂质,带回实验室于 65 °C 下 48 h 烘干后称量。地下生物量草本层测定采用根钻法。在每个草本样方中用 7.0 cm 根钻取 3 钻后合并,分成 0~5 cm、5~10 cm、10~20 cm、20~30 cm、30~50 cm、50~70 cm、70~100 cm 共 7 个土层,在 0.125 mm 筛中清洗干净,放进 65 °C 烘干至恒重。其他调查取样全部完成后,对灌木样方内生长的所有灌木进行完整挖掘,挖出的根系洗净后 65 °C 烘干至恒重。土壤样品采集方法与草本层根系生物量相同,分层装好后带回实验室置于室内阴凉处风干,去除杂质研磨后过筛(0.200 mm)备用。

1.4 植被和土壤碳密度计算

1.4.1 植被有机碳含量测定和碳密度计算 采用 Carlo-Erba 的 NA1500 元素分析仪测定地上植物活体、凋落物的有机碳含量,结合各自生物量数据计算碳密度。

$$Cd = \alpha \times M$$

式中: Cd 为碳密度($\text{g C} \cdot \text{m}^{-2}$); α 为有机碳含量(%); M 为地上或地下生物量($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)。

1.4.2 土壤有机碳含量测定和碳密度计算 采用 Carlo-Erba 的 NA1500 元素分析仪测定土壤有机碳含量。根据土壤有机碳含量、土壤容重、土层深度等参数计算土壤有机碳密度(soil organic carbon density, $\text{SOC}_{\text{density}}$, $\text{g C} \cdot \text{m}^{-2}$):

$$\text{SOC}_{\text{density}} = \sum_{i=1}^n D_i \times \theta_i \times C_i \times (1 - \delta_i) \times 10$$

式中: n 为土层数; D_i 为不同土层厚度(cm); θ_i 为土壤容重($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$); C_i 为不同土层土壤有机碳含量(%); δ_i 为 > 2 mm 砾石含量(体积%)。

1.5 数据处理

采用 Microsoft Excel 2013 进行数据整理。采用 SPSS 18.0 软件 One-way ANOVA 模块进行单因素方差分析和 Duncan 多重比较($\alpha = 0.05$)。采用 OriginPro 18.0 软件作图。

2 结果与分析

2.1 生物量及群落层组成

由表 2 可知,豫西北地区不同样地暖性灌草丛灌木层的生物量大小顺序为: $P_7 > P_1 > P_6 > P_2 > P_4 > P_3 > P_5$,数值介于 1426.08~3193.47 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$,平均为 2231.41 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$,但各样地间生物量差异并不显著($P > 0.05$)。灌木层各器官生物量大小顺序为:根系>老枝>新枝>叶片>凋落物,其中地下平均生物量为 2076.37 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$,地上平均生物量为 155.02 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ 。不同样地草本层生物量差异较大,顺序依次为: $P_5 > P_4 > P_1 > P_2 > P_6 > P_3 > P_7$,平均生物量为 4261.01 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$,其中 P_5 最大为 7060.21 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$, P_7 最小为 2280.3 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$,二者之间差异显著($P < 0.05$)。草本层生物量大小顺序为:根系>活体>凋落物,地下平均生物量为 3889.52 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$,地上平均生物量为 271.49 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$,其中地下生物量明显高于地上生物量。不同样地群落整体生物量大小顺序为: $P_5 > P_1 > P_4 > P_2 > P_6 > P_7 > P_3$,平均生物量为 6492.42 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$,其中草本层生物量(65.63%)>灌木层(34.37%)。

2.2 地上碳密度

如图 1 所示,各样地灌木层地上碳密度大小依次为: $P_5 > P_7 > P_1 > P_4 > P_2 > P_3 > P_6$,平均碳密度为 70.17 $\text{g C} \cdot \text{m}^{-2}$,其中 P_5 最大为 102.43 $\text{g C} \cdot \text{m}^{-2}$, P_6 最小为 44.54 $\text{g C} \cdot \text{m}^{-2}$,但二者差异并不显著($P > 0.05$)。灌木层各器官平均碳密度大小顺序为:老龄枝>叶片>新枝>凋落物,其中老龄枝最高为 30.12 $\text{g C} \cdot \text{m}^{-2}$,但不同器官碳密度各样地之间差异均不显著($P > 0.05$)。各样地草本层地上碳密度大小依次为: $P_2 > P_6 > P_4 > P_1 > P_3 > P_7 > P_5$,平均碳密度为 103.01 $\text{g C} \cdot \text{m}^{-2}$,其中 P_2 最大为 192.88 $\text{g C} \cdot \text{m}^{-2}$, P_5 最小为 61.46 $\text{g C} \cdot \text{m}^{-2}$,二者之间差异显著($P < 0.05$)。草本层活体碳密度大小顺序为: $P_2 > P_1 > P_6 > P_4 > P_3 > P_7 > P_5$,平均碳密度为 65.87 $\text{g C} \cdot \text{m}^{-2}$,但各样地间差异并不显著($P > 0.05$)。凋落物碳密度大小依次为: $P_2 > P_4 > P_6 > P_1 > P_5 > P_3 > P_7$,平均碳密度为 37.13 $\text{g C} \cdot \text{m}^{-2}$,其中 P_2 最大为 104.22 $\text{g C} \cdot \text{m}^{-2}$,显著大于其他 6 个样地($P < 0.05$)。不同样地地上平

均碳密度草本层>灌木层,但不同样地草本层地上碳密度差异显著($P<0.05$),但灌木层差异不显著($P>0.05$)。

2.3 根系碳密度

由图 2 可知,暖性灌草丛根系总碳密度为 $2195.88 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2}$ 。其中灌木层根系碳密度大小顺序为: $P_7 > P_1 > P_6 > P_2 > P_4 > P_3 > P_5$,平均碳密度为 $911.45 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2}$,占草地根系总碳密度的 41.51%,但 7 个样地间差异并不显著($P>0.05$)。草本层根系碳密度大小依次为: $P_5 > P_1 > P_2 > P_4 > P_6 > P_3 > P_7$,平均碳密度为 $1284.43 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2}$,其中 P_5 最大为 $2192.66 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2}$, P_7 最小为 $469.82 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2}$,两者间差异显著($P<0.05$)。

表 2 各样地不同群落层生物量

Table 2 Biomass of community layers in each sampled plot (Mean±SE, $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)

层次 Layer	器官 Organ	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	P ₆	P ₇	平均 Average
灌木层 Shrub layer	叶片 Leaf	49.31±	47.33±	29.92±	59.26±	81.15±	34.82±	84.43±	55.17±
		25.14a	9.18a	4.15a	16.10a	22.18a	7.39a	38.50a	8.01
	新枝 New branch	22.57±	8.74±	11.81±	17.39±	14.17±	24.85±	41.46±	20.14±
		16.27a	2.24a	2.99a	6.12a	2.83a	2.46a	22.10a	4.16
	老枝 Old branch	91.10±	40.03±	42.42±	61.35±	109.71±	40.94±	78.47±	66.29±
		44.50a	5.88a	9.25a	13.45a	29.67a	14.34a	19.03a	10.44
	凋落物 Litter	9.94±	19.55±	20.84±	14.05±	23.40±	0.00b	6.19±	13.42±
		3.40ab	7.86ab	9.00ab	4.45ab	12.66a		3.80ab	3.22
根系 Root	2591.87±	1922.46±	1663.22±	1725.65±	1197.64±	2450.87±	2982.92±	2076.37±	
	513.21a	1045.11a	354.57a	765.42a	324.48a	788.01a	891.12a	234.89	
总计 Total	2764.79±	2038.11±	1768.21±	1877.70±	1426.08±	2551.48±	3193.47±	2231.41±	
	500.96a	1031.46a	350.61a	748.43a	295.56a	782.17a	927.64a	235.94	
草本层 Herb layer	活体 Living	189.73±	197.51±	168.22±	178.34±	108.69±	177.05±	125.46±	163.57±
		31.05a	32.16a	24.42a	37.83a	13.01a	44.82a	12.23a	68.74
	凋落物 Litter	83.15±	263.73±	51.47±	149.75±	48.76±	123.50±	35.09±	107.92±
		11.91bc	46.18a	7.53c	15.64b	4.44c	31.37b	11.69c	88.90
	根系 Root	4642.15±	3604.81±	2297.30±	5221.91±	6902.76±	3137.95±	2119.75±	3889.52±
		306.03bc	294.96cd	307.45d	615.15b	923.99a	473.96cd	6.79d	648.52
	总计 Total	4915.03±	4066.05±	2516.98±	5550.00±	7060.21±	3438.50±	2280.30±	4261.01±
		309.67bc	330.47bc	308.16d	625.54ab	893.55a	517.57dc	20.68d	647.42
生物层 Biological layer	7679.82±	6104.16±	4285.20±	7427.71±	8486.28±	5989.98±	5473.77±	6492.42±	
	504.34ab	1250.58ab	601.53b	1228.09ab	1415.31a	1427.62b	1178.09b	547.13	

注:同列不同小写字母表示差异显著($P<0.05$),下同。

Note: Different lowercase letters in the same column indicated significant difference at 0.05 level, the same below.

2.4 植被与土壤碳密度

如图 3 所示,暖性灌草丛植被碳密度为 $2360.07 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2}$ 。其中灌木层植被碳密度大小依次为: $P_7 > P_1 > P_6 > P_2 > P_4 > P_3 > P_5$,平均碳密度为 $981.63 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2}$,其中 P_7 最大为 $1428.25 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2}$, P_5 最小为 $630.65 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2}$,但样地间差异并不显著($P>0.05$)。草本层植被碳密度大小顺序为: $P_5 > P_2 > P_1 > P_4 > P_6 > P_3 > P_7$,平均碳密度为 $1387.44 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2}$,其中 P_5 最大为 $2254.12 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2}$, P_7 最小为 $533.72 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2}$,二者之间差异显著($P<0.05$)。由以上结果可知,不同样地植被碳主要分布于地下,灌木层根系碳密度占植被碳密度的 83.76%~96.02%,草本层根系碳密度占植被碳密度的 88.02%~97.27%。土壤是暖性灌草丛最主要的固碳场

所。各样地土壤碳密度大小依次为： $P_1 > P_2 > P_6 > P_5 > P_4 > P_3 > P_7$ ，平均碳密度为 $4610.47 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2}$ ，其中 P_1 最大为 $8426.29 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2}$ ， P_7 最小为 $1794.3 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2}$ ，二者之间差异显著 ($P < 0.05$)。

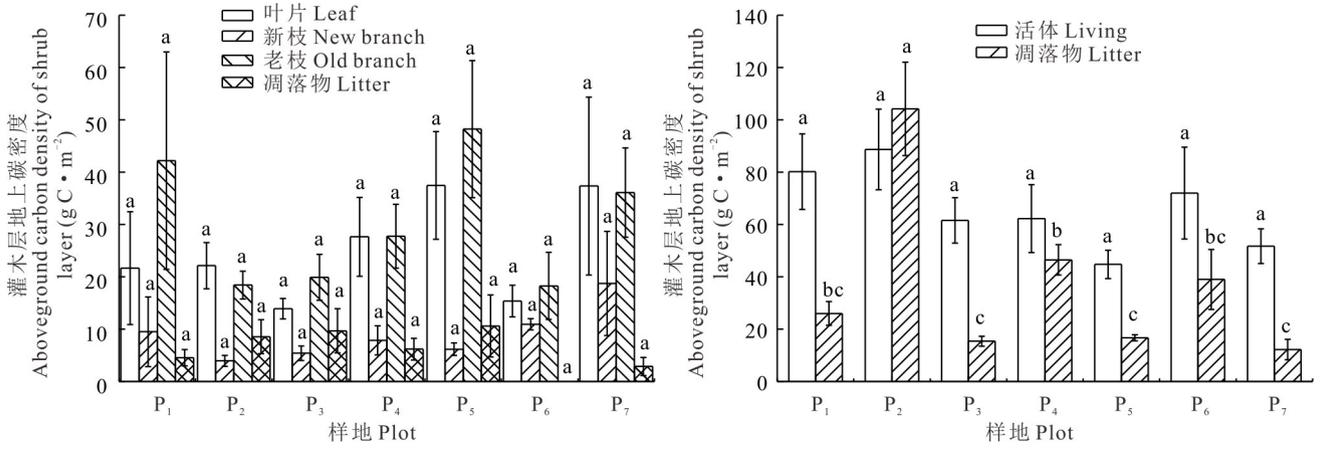


图 1 各样地地上碳密度

Fig. 1 Aboveground carbon density of each sampled plot

不同小写字母表示不同样地间差异显著 ($P < 0.05$)，下同。Different lowercase letters indicated significant difference among different sampling sites at 0.05 level, the same below.

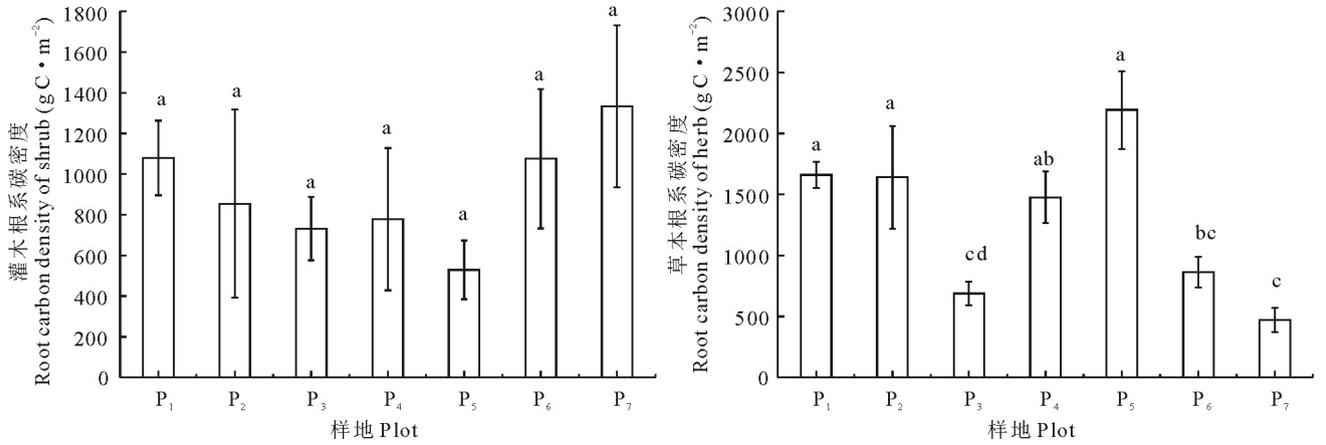


图 2 各样地根系碳密度

Fig. 2 Root carbon density of each sampled plot

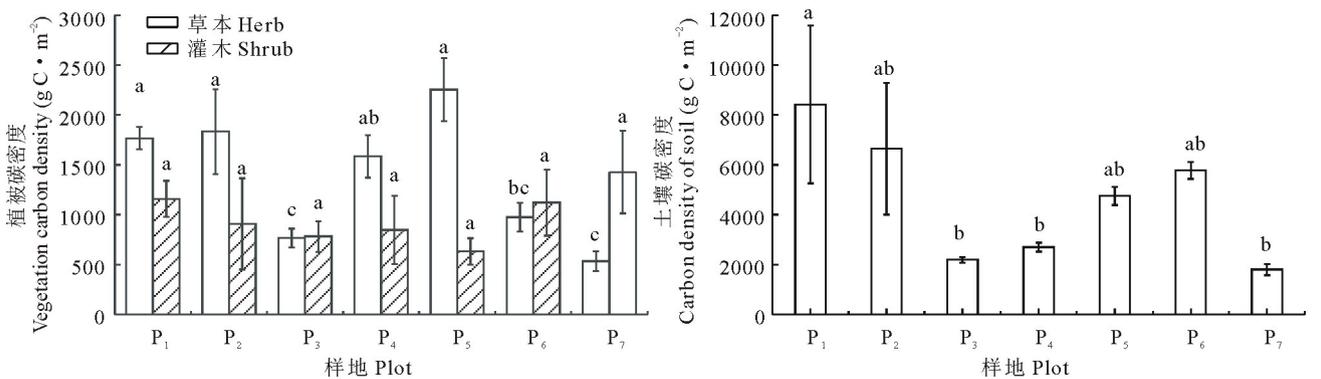


图 3 各样地植被与土壤碳密度

Fig. 3 Vegetation and soil carbon density of each sampled plot

2.5 生态系统碳密度

各样地生态系统碳密度大小顺序为: $P_1 > P_2 > P_6 > P_5 > P_4 > P_7 > P_3$, 生态系统平均碳密度为 $6979.54 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2}$, 其中 P_1 最大为 $11349.89 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2}$, P_3 最小为 $3733.06 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2}$, 二者之间差异显著 ($P < 0.05$) (图 4)。土壤层有机碳密度占生态系统的比例分别为 $P_1 (74.24\%) > P_6 (73.38\%) > P_2 (70.8\%) > P_5 (62.21\%) > P_3 (58.61\%) > P_4 (52.56\%) > P_7 (47.77\%)$ 。草本层占生态系统碳密度的 $12.39\% \sim 30.92\%$, 灌木层占生态系统碳密度的 $8.26\% \sim 38.02\%$ 。暖性灌草丛生态系统碳密度空间分布序列为: 土壤层 $>$ 植被层 (灌木层 + 草本层), 而土壤碳密度是生态系统碳密度的最主要来源。

3 讨论

植被净初级生产力是陆地生态系统碳库的主要来源, 植被净初级生产力变化反映了生态系统对气候及土地利用变化的响应^[14]。灌草丛生态系统作为一个巨大的潜在碳汇, 在全球碳平衡和气候调节中发挥着重要作用^[21]。生物量动态变化是反应物质积累与生产潜力的重要指标, 也体现了植物的生长规律^[22]。而植物不同组分生物量分配不仅受外界环境限制, 同时还受植物遗传特性和个体差异影响^[23]。根据最优分配理论, 植物通过调节生物量在各器官中的分配来适应外界环境, 以最大限度获取资源, 从而维持最大生长速率^[24]。当光照受到限制时, 植物会分配更多资源在枝、叶; 而当水分和养分受限时, 更多资源会分配到地下根系^[25]。本研究中暖性灌草丛灌木层各器官生物量大小顺序为: 根系 $>$ 老枝 $>$ 新枝 $>$ 叶片 $>$ 凋落物, 草本层生物量大小顺序为: 根系 $>$ 活体 $>$ 凋落物, 无论是灌木层还是草本层, 其地下生物量均明显高于地上, 这是由于暖性灌草丛主要分布在豫西北地区, 降水较豫南地区少, 但光照充足。灌草丛生物量在群落不同层次之间的分配受群落特性和物种组成等因素的综合影响^[26]。已有的亚热带灌草丛生物量研究中, 生物量在植被层上的分配多表现为灌木层 $>$ 草本层 $>$ 凋落物层^[27], 本研究中将灌木层与草本层的凋落物进行分别计算, 更能准确估算灌木层和草本层各自的固碳量。研究结果表明, 灌木层生物量小于草本层, 主要原因是研究区草本物种丰富、种群密度大, 且黄背草等株型高大, 具有明显竞争优势, 相比而言灌木层则显得较为稀疏。在灌木层中, 老龄枝生物量普遍高于新枝, 叶片生物量最低, 可见本地区灌木生物量主要分配在老龄枝中, 而新枝所占比重较小, 反映了灌木固碳缓慢, 这与杨昊天等^[28]的研究结果一致。此外灌木叶片所占比例最小, 也与研究地点普遍存在放牧等人为干扰, 导致其生物量降低有关^[29]。

植被碳储量反映了绿色植物在光合作用中固定贮存碳的能力, 是物质组分的一个综合指标^[30]。灌木层作为植被碳密度的主体之一, 也是陆地生态系统重要碳汇来源。本研究的灌木层碳密度占整个植被碳密度的 41.60% , 表明灌木层是植被碳储量不可忽略的部分。胡会峰等^[9]研究河南灌丛碳密度为 $624.45 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2}$, 全国灌丛碳密度为 $10.88 \text{ mg C} \cdot \text{hm}^{-2}$; Woodwell 等^[31]估算了全球 $2.65 \times 10^9 \text{ hm}^2$ 灌木林和沙漠灌丛的平均碳密度为 $10.50 \text{ mg C} \cdot \text{hm}^{-2}$, 而 Ni^[6]估算我国灌丛碳密度为 $45.60 \text{ mg C} \cdot \text{hm}^{-2}$, 而本研究灌木碳密度显著高于以上结果, 主要是由于在植被碳含量研究中, 不同地区、不同植被类型的碳含量存在差异, 不同研究得出结果也不尽相同^[32-33]。目前关于碳密度的研究, 大部分采用平均碳密度方法^[9, 34], 即碳密度等于生物量乘以换算系数 0.50 或 0.45 。然而不同物种、不同器官之间碳含量存在差异, 用平均碳密度法会高估生态系统碳密度。而植物碳密度也受植被生物量的影响^[35]。本试验使用不同物种不同器官的含碳率和生物量来计算灌草丛植被的地上碳密度, 结果较为可靠。豫西北地区暖性灌草丛根系总碳密度占植被的 93.04% , 表明根系是植被碳密度重要的组成部分。但灌木层根系平均碳密度较草本层低, 约占植被碳密度的 40.51% 左右, 符合地上地下生物量分布结果。土壤有机碳对生态系统过程、大气组成及气候变化速率的作用及其重要意义已经得到普遍的认同^[2, 36]。在豫西

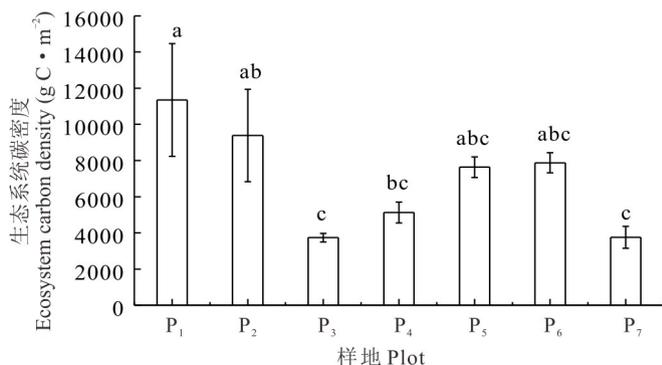


图 4 各样地生态系统碳密度

Fig. 4 Ecosystem carbon density of each sampled plot

北地区暖性灌草丛中,土壤层有机碳密度为 $4610.47 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2}$,占生态系统总碳密度的 62.8%。赵威等^[18]计算河南豫西北地区草地土壤碳密度为 $5.81 \times 10^3 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2}$,虽然本结果低于上述研究,但也达到了总碳密度的 79.34%,进一步证实了暖性灌草丛土壤碳库在整个豫西北地区土壤碳库中占有重要地位。

4 结论

豫西北地区暖性灌草丛草地植被碳密度为 $2360.07 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2}$,其中灌木层(41.6%)略低于草本层(58.4%),但差异并不明显。根系是植被碳密度的主要组成,占植被碳密度的 93.04%;其中灌木层根系碳密度(41.51%)低于草本层(58.49%)。生态系统碳密度约 62.8%由土壤所贡献,其次是根系的 19.35%,地上部分仅贡献了 17.85%。综上所述,豫西北地区暖性灌草丛灌木层在植被碳密度中占很大比重,如果在固碳研究中忽略了灌木碳储量,将导致草地生态系统碳储量估算出现较大误差。

参考文献 References:

- [1] Fang J Y, Guo Z D, Amp S L, *et al.* Terrestrial vegetation carbon sinks in China, 1981–2000. *Science China Earth Sciences*, 2007, 50(9): 1341–1350.
- [2] Jobbágy E G, Jackson R B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological Applications*, 2000, 10(2): 423–436.
- [3] Sun H L, Li W H, Yang Y H, *et al.* Soil organic carbon changing with altitudes on the Mountainous Region. *Scientia Geographica Sinica*, 2012, 32(5): 603–608.
孙慧兰, 李卫红, 杨余辉, 等. 伊犁山地不同海拔土壤有机碳的分布. *地理科学*, 2012, 32(5): 603–608.
- [4] Fang J Y, Yang Y H, Ma W H, *et al.* Ecosystem carbon stocks and their changes in China's grassland. *Scientia Sinica Vitae*, 2010, 40(7): 566–576.
方精云, 杨元合, 马文红, 等. 中国草地生态系统碳库及其变化. *中国科学: 生命科学*, 2010, 40(7): 566–576.
- [5] Zhao M, Zhou G S. Carbon storage of forest vegetation and its relationship with climate factors. *Scientia Geographica Sinica*, 2004, 24(1): 50–54.
赵敏, 周广胜. 中国森林生态系统的植物碳贮量及其影响因子分析. *地理科学*, 2004, 24(1): 50–54.
- [6] Ni J. Carbon storage in grasslands of China. *Journal of Arid Environments*, 2002, 50(2): 205–218.
- [7] Vourlitis G L, Zorba G, Pasquini S C, *et al.* Carbon and nitrogen storage in soil and litter of southern Californian semi-arid shrublands. *Journal of Arid Environments*, 2007, 70(1): 164–173.
- [8] Zhou G Y, Ye Z F, Li X G. The grassy thicket in the northern part of China. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 1986, 3(28): 45–47.
周光裕, 叶正丰, 李相敢. 中国北方的灌草丛. *江西农业大学学报*, 1986, 3(28): 45–47.
- [9] Hu H F, Wang Z H, Liu G H, *et al.* Vegetation carbon storage of major shrublands in China. *Acta Phytocologica Sinica*, 2006, 30(4): 539–544.
胡会峰, 王志恒, 刘国华, 等. 中国主要灌丛植被碳储量. *植物生态学报*, 2006, 30(4): 539–544.
- [10] Zhang H, Shi P J. Research progress in relationship between shrub invasion and soil heterogeneity in a natural semiarid grassland. *Acta Phytocologica Sinica*, 2001, 25(3): 366–370.
张宏, 史培军. 半干旱地区天然草地灌丛化与土壤异质性关系研究进展. *植物生态学报*, 2001, 25(3): 366–370.
- [11] Zheng J G, Zhang B Y, He M Z, *et al.* The effects of shrub patches on soil heterogeneity in grasslands on the west slope of the Helan Mountain. *Arid Zone Research*, 2009, 26(1): 28–33.
郑敬刚, 张本昀, 何明珠, 等. 灌丛化对贺兰山西坡草场土壤异质性的影响. *干旱区研究*, 2009, 26(1): 28–33.
- [12] Goodale C L, Davidson E A. Uncertain sinks in the shrubs. *Nature*, 2002, 418(6898): 593–594.
- [13] Jackson R B, Banner J L, Jobbágy E G, *et al.* Ecosystem carbon loss with woody plant invasion of grasslands. *Nature*, 2002, 418(6898): 623–626.
- [14] Wang Y L, Gong R, Wu F M, *et al.* Temporal and spatial variation characteristics of China shrubland net primary production and its response to climate change from 2001 to 2013. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2017, 41(9): 925–937.
王亚林, 龚容, 吴凤敏, 等. 2001–2013 年中国灌木生态系统净初级生产力的时空变化特征及其对气候变化的响应. *植物生态学报*, 2017, 41(9): 925–937.
- [15] Piao S L, Fang J Y, Huang Y. The carbon balance of terrestrial ecosystems in China. *China Basic Science*, 2010, 12(2): 20–22, 65.
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, 65.

- [16] Li X R, Liu Q J, Chen Y R, *et al.* Aboveground biomass of three conifers in Qianyanzhou plantation. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(8): 1382–1388.
李轩然, 刘琪璟, 陈永瑞, 等. 千烟洲人工林主要树种地上生物量的估算. *应用生态学报*, 2006, 17(8): 1382–1388.
- [17] Xu C Y, Chen Z C, Hao C Y, *et al.* Research on the correlation between plant species diversity and its main environment factors of Baiyunshan in the transitional region from warm temperate zone to subtropical zone. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23(3): 371–376.
许传阳, 陈志超, 郝成元, 等. 暖温带和北亚热带过渡区白云山植物物种多样性与环境因子相关性. *生态环境学报*, 2014, 23(3): 371–376.
- [18] Zhao W, Li L, Wang Y J, *et al.* Carbon sequestration characteristics and regional difference of typical warm and tropical grasslands in Henan Province, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(6): 1867–1875.
赵威, 李琳, 王艳杰, 等. 河南典型暖(热)性草地固碳特征及区域差异. *应用生态学报*, 2018, 29(6): 1867–1875.
- [19] Guo X. Introduction to the development and utilization of Henan steppe. *Grassland of China*, 1997, 4: 11–15.
郭孝. 河南草地开发与利用概况. *中国草地学报*, 1997, 4: 11–15.
- [20] Guo X, Liu T Y, Chen G R. Studies on classification and animal ecologic environments of Henan grassland. *Ecology of Domestic Animal*, 1998, 1: 15–18.
郭孝, 刘太宇, 陈桂荣. 河南草地的分类及家畜生态环境的研究. *家畜生态学报*, 1998, 1: 15–18.
- [21] Piao S L, Fang J Y, Ciais P, *et al.* The carbon balance of terrestrial ecosystems in China. *Nature*, 2009, 458: 1009–1013.
- [22] Liu J P, Zhang X Q, You M H. Dynamical characteristics of population component and biomass structure of cultivated *Hemiarthra compressa* grassland. *Acta Agrestia Sinica*, 2006, 14(4): 310–314.
刘金平, 张新全, 游明鸿. 扁穗牛鞭草人工种群构件及生物量动态变化. *草地学报*, 2006, 14(4): 310–314.
- [23] Cheng Y F, Guo Q X, Li X N. Biomass distribution and its functioning of forest understory vegetation. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29(11): 2146–2154.
程远峰, 国庆喜, 李晓娜. 东北天然次生林下木树种的生物量器官分配规律. *生态学杂志*, 2010, 29(11): 2146–2154.
- [24] McConnaughay K D, Coleman J S. Biomass allocation in plants: Ontogeny or optimality? A test along three resource gradients. *Ecology*, 1999, 80(8): 2581–2593.
- [25] Bloom A J, Chapin F S, Mooney H A. Resource limitation in plants—an economic analogy. *Annual Review of Ecology & Systematics*, 1985, 16(1): 363–392.
- [26] Zhang Q, Li J X, Xu W T, *et al.* Estimation of biomass allocation and carbon density of *Rhododendron simsii* shrubland in the subtropical mountainous areas of China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2017, 41(1): 43–52.
张蕾, 李家湘, 徐文婷, 等. 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.
- [27] Wang L. Study of biomass and its models of main shrub community type in northwest Sichuan. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2009.
王玲. 川西北地区主要灌丛类型生物量及其模型的研究. 雅安: 四川农业大学, 2009.
- [28] Yang H T, Li X R, Liu L C, *et al.* Biomass allocation patterns of four shrubs in desert grassland. *Journal of Desert Research*, 2013, 33(5): 1340–1348.
杨昊天, 李新荣, 刘立超, 等. 荒漠草地4种灌木生物量分配特征. *中国沙漠*, 2013, 33(5): 1340–1348.
- [29] Wan L Q, Li X L, Su J K, *et al.* Influence of grazing on change of importance values of shrubs on a shrubland in the Three Gorges Region of Yangtze River. *Grassland of China*, 2001, 23(1): 11–16.
万里强, 李向林, 苏加楷, 等. 不同放牧强度对三峡地区灌丛草地灌木重要值变化的影响. *中国草地学报*, 2001, 23(1): 11–16.
- [30] Long S Y, Bao Y J, Li Z H, *et al.* The carbon contents and the relationship with the calorific values of 67 plant species in Inner Mongolia grassland. *Acta Prataculturae Sinica*, 2013, 22(1): 112–119.
龙世友, 鲍雅静, 李政海, 等. 内蒙古草原67种植物碳含量分析及与热值的关系研究. *草业学报*, 2013, 22(1): 112–119.
- [31] Woodwell G M, Whittaker R H, Reiners W A, *et al.* The biota and the world carbon budget. *Science*, 1978, 199(4325): 141–146.
- [32] Zheng W J, Bao W K, Gu B, *et al.* Carbon concentration and its characteristics in terrestrial higher plants. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(3): 307–313.
郑帷婕, 包维楷, 辜彬, 等. 陆生高等植物碳含量及其特点. *生态学杂志*, 2007, 26(3): 307–313.
- [33] Yu G, Li X, Wang Q, *et al.* Carbon storage and its spatial pattern of terrestrial ecosystem in China. *Journal of Resources and Ecology*, 2010, 2: 97–109.
- [34] Li Y N, Yu X F, Xu Z Q, *et al.* Carbon density characteristics of two typical shrub communities in the Northern Mountain Region of Hebei. *Scientia Silvae Sinicae*, 2014, 50(6): 28–33.

李亚男, 虞晓凡, 许中旗, 等. 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.

- [35] Xiao F M, Fan S H, Wang S L, *et al.* Carbon storage and spatial distribution in *Phyllostachy pubescens* and *Cunninghamia lanceolata* plantation ecosystem. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(7): 2794—2801.
肖复明, 范少辉, 汪思龙, 等. 毛竹(*Phyllostachy pubescens*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)人工林生态系统碳贮量及其分配特征. 生态学报, 2007, 27(7): 2794—2801.
- [36] Montané F, Romanyà J, Rovira P, *et al.* Aboveground litter quality changes may drive soil organic carbon increase after shrub encroachment into mountain grasslands. *Plant & Soil*, 2010, 337(1/2): 151—165.