

DOI: 10.16853/j.cnki.1009-3575.2020.01.006

# 兴安落叶松林植被层碳密度分配及固碳潜力

王飞, 刘璇, 张秋良\*  
(内蒙古农业大学林学院 呼和浩特 010019)

**摘要:** 加强对兴安落叶松林碳储量和固碳潜力的研究,是制定大兴安岭地区增汇能力的重要依据。在根河地区,选择不同年龄的兴安落叶松林,运用空间代替时间的方法,分析碳密度空间分布特征,计算不同龄组固碳潜力。结果如下:兴安落叶松林植被层碳密度随着林龄增加而增加,幼龄林、中龄林、近熟林和成熟林分别为  $53.17 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $104.61 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $129.30 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $140.15 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。各层碳密度大小顺序基本为:乔木层 > 枯落物层 > 木质物残体 > 灌木层 > 草本层 > 藓被层,分别占植被层碳密度的 79.71% ~ 85.78%、8.81% ~ 15.28%、1.11% ~ 5.62%、0.69% ~ 3.54%、0.19% ~ 1.39% 和 0 ~ 0.15%。其中,活地被物占植被碳密度的 81.66% ~ 90.71%。从幼龄到近熟林阶段,兴安落叶松林固碳潜力分别为  $86.98 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $35.54 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$  和  $10.55 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。大兴安岭兴安落叶松林幼中龄林比重大,若对现有森林进行科学管理,可以发挥巨大的碳汇潜力。

**关键词:** 大兴安岭;兴安落叶松林;碳密度;固碳潜力

中图分类号: Q948;S718 文献标识码: A 文章编号: 1009-3575(2020)01-0032-05

## CARBON DENSITY DISTRIBUTION AND CARBON SEQUESTRATION POTENTIAL OF VEGETATION LAYER IN *Larix gmelinii* FOREST

WANG Fei, LIU Xuan, ZHANG Qiuliang\*  
(Forestry College, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010019, China)

**Abstract:** To strengthen the research of forest carbon storage and carbon sequestration potential, which is an important basis for the development policy of increasing carbon sequestration in The Greater Khingan Mountains. *Larix gmelinii* forest of different ages was selected to analyze the spatial distribution of carbon density using the method of space instead of time. The results were as follows: The carbon density of *Larix gmelinii* plantations increased with the increase of stand ages and The ecosystem carbon densities of the young, middle-aged, near-mature and mature forests were  $53.17 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,  $104.61 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,  $129.30 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,  $140.15 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ . The order of carbon density in each layer was as follows: tree layer > litter layer > wood residue > shrub layer > herb layer > moss layer, accounting for 79.71% - 85.78%, 8.81% - 15.28%, 1.11% - 5.62%, 0.69% - 3.54%, 0.19% - 1.39% and 0 - 0.15%. Among them, the living land cover accounted for 81.66% - 90.71% of the vegetation carbon density. The carbon sequestration of *Larix gmelinii* were  $86.98 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,  $35.54 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$  and  $10.55 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ . In the Greater Khingan Mountains, middle-aged forests had a greater proportion than the forests in other age classes. If the existing forest is managed scientifically, it can exert great potential for carbon sink.

**Key words:** The Greater Khingan Mountains; *Larix gmelinii*; carbon density; carbon sequestration

森林生态系统是陆地生态系统的主体,拥有巨大的碳库和较高的生产力<sup>[1]</sup>,在维持全球碳平衡、减缓全球气候变化等方面起到重要的作用<sup>[2-4]</sup>。

大兴安岭是我国唯一的寒温带针叶林区,作为国家重要的生态功能区与生态敏感区,对我国东北平原乃至华北平原起着重要的生态屏障作用,在天然林保护工程之前,一直是我国木材生产的重要基

地。2014年实施全面停止天然林商业性采伐后,将降低中幼林而提高成、过熟林及老龄林的比重,中幼龄林向成熟林过渡,林龄结构会发生长期动态变化<sup>[5]</sup>。而林龄与森林生态系统碳密度的大小<sup>[6-7]</sup>、碳密度分配格局和固碳速率及潜力密切相关<sup>[8-9]</sup>。因此,准确评估不同年龄林分的固碳能力及潜力具有重要意义。

收稿日期: 2019-04-08

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0504003-5)。

作者简介: 王飞(1980—),女,副教授,硕士生导师,主要从事森林生态及森林可持续经营方面的研究。

\* 通信作者: 张秋良 E-mail: 18686028468@163.com.

近年来,国内外学者采用多种研究手段,针对不同目标,从林分<sup>[10]</sup>、区域<sup>[11-13]</sup>、国家<sup>[14-15]</sup>及全球尺度上<sup>[16]</sup>对森林生态系统固碳速率及潜力进行了研究报道。针对兴安落叶松林固碳能力<sup>[17-21]</sup>进行了大量研究,但大多都着眼于乔木层的估算,对灌木层、草本层和枯落物层则分散在不同的研究之中。固碳潜力特征更是尚不清楚。鉴于此,本文以大兴安岭兴安落叶松林为研究对象,采用空间代替时间法,估算其植被层的固碳现状、固碳速率和固碳潜力,旨在了解大兴安岭兴安落叶松林的碳汇现状及其动态变化特征,为我国区域尺度的森林碳汇估算研究提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于国家林业局所属大兴安岭森林生态系统国家野外科学观测研究站试验区(50°49′—50°51′N, 121°30′—121°31′E),地处大兴安岭北坡,属寒温带半湿润气候区。冬季(平均气温 < 10℃)长达 7 个月,夏季(平均气温 ≥ 22℃)不超过 1 个月。全年平均温度 4.1℃,(据根河气象局 1971 年—2000 年气象数据计算而得),年降水量 450 ~ 500 mm,每年降水主要集中在 7 ~ 8 月,土壤类型主要为棕色针叶林土,土层 30 ~ 40 cm。主要乔木树种有兴安落叶松和少量白桦(*Betula platyphylla*)等<sup>[22]</sup>。

### 1.2 样地设置及取样

野外调查于 2010 年—2012 年 7 ~ 8 月进行,在潮查林场内杜香-兴安落叶松原始林典型地段,分龄组(幼龄林、中龄林、近熟林和成熟林)设置坡向、海拔及坡度等立地条件基本一致的 30 m × 30 m 样地各 3 块(表 1)。对样地内所有胸径大于 5 cm 的乔木进行每木检尺,测定胸径和树高。在每个乔木样地的四角加中心设置 5 个 5 m × 5 m 的灌木样方和 5 个 1 m × 1 m 的草本(枯落物现存量)样方。最后分别采集乔木层、灌木层、草本层、枯落物层和枯死木层各部分器官约 200 g 样品带回实验室,用于分析含水率和有机碳含量。有机碳含量采用重铬酸钾-硫酸氧化法进行测定。

### 1.3 研究方法

**1.3.1 植被生物量测定及碳密度计算** 乔木层生物量:在选定的固定样地内,每木检尺,利用该样地建立的各个树种的异速生长方程计算各组分生物量。兴安落叶松各组分生物量方程如下<sup>[23]</sup>:

$$\text{树干生物量方程:} \\ W = 0.0623D^{2.5581} \quad R^2 = 0.986 \quad (1)$$

$$\text{树枝生物量方程:} \\ W = 0.0247D^{2.2742} \quad R^2 = 0.943 \quad (2)$$

$$\text{树叶生物量方程:} \\ W = 0.0241D^{1.91} \quad R^2 = 0.949 \quad (3)$$

树皮生物量方程:

$$W = 0.0538D^{1.9729} \quad R^2 = 0.976 \quad (4)$$

地下生物量方程:

$$W = 0.0638D^{2.0152} \quad R^2 = 0.964 \quad (5)$$

(6) 地上生物量方程:

$$W = 0.1359D^{2.4077} \quad R^2 = 0.983 \quad (6)$$

注:  $D$ —胸径 Diameter at breast height(cm),胸径范围为 4 ~ 27 cm。

白桦各组分生物量方程如下:

树干生物量方程:

$$W = 0.02853(D^2H)^{0.89278} \quad (7)$$

树枝生物量方程:

$$W = 0.00278(D^2H)^{1.02568} \quad (8)$$

树叶生物量方程:

$$W = 0.01545(D^2H)^{0.61265} \quad (9)$$

树皮生物量方程:

$$W = 0.023923(D^2H)^{0.71131} \quad (10)$$

地下生物量方程:

$$W = 0.04577(D^2H)^{0.69612}$$

灌木、草本、藓被层及枯落物层:在上述每块固定样地的四角和中心设 5 个 5 m × 5 m 样方调查灌木,5 个 1 m × 1 m 样方用来调查草本、苔藓及枯落物现存量。采用样方收获法测定灌木、草本、藓被、和枯落物层生物量。灌木层分别茎、叶和根,草本层分别地上和地下部分,枯落物分别未分解和半分解收集称鲜重并取样。

木质物残体则按形态和腐烂等级进行分类,分别计算枯立木和枯倒木的体积,并根据不同腐烂等级的密度计算枯死木的干质量,具体方法见王飞等<sup>[24]</sup>结合相应腐烂等级样本的碳含量得到枯死木的碳储量。

乔木层各器官生物量(树干、树枝、树叶、树皮及树根)乘以相应的碳含量,累加得到乔木层碳储量。灌木层、草本层、藓被层及枯落物现存量的碳储量是根据各器官含水率换算为其干质量并分别乘以各器官对应的有机碳含量求得的。将碳储量分别换算到单位面积储量即为碳密度( $t \cdot hm^{-2}$ )。将上述各层碳密度累加得到兴安落叶松林植被碳密度。

**1.3.2 固碳潜力的计算** 本文按照理论固碳潜力计算兴安落叶松原始林固碳潜力。理论固碳潜力为参照系碳密度与平均碳密度的差值<sup>[13]</sup>。这里的参照系选取兴安落叶松成熟原始林碳密度,公式为:兴安落叶松林各林龄固碳潜力 = 兴安落叶松成熟林碳密度 - 兴安落叶松各林龄碳密度

## 2 结果与分析

### 2.1 植被层碳密度

本文中的植被层包括活地被物层(乔木层、灌木层、草本层、藓被层)和死地被物层(枯落物层和木质

物残体)两部分。不同龄组兴安落叶松林植被碳密度在  $53.17 \sim 140.15 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$  之间,其中,乔木层、灌木层、草本层、藓被层、枯落物层和木质物残体碳密度分别在  $45.61 \sim 111.71 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $0.72 \sim 2.45 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $0.28 \sim 0.74 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $0.06 \sim 0.19 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $4.35 \sim 21.42 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$  和  $0.45 \sim 4.29 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$  之间。除了幼龄林外,兴安落叶松林植被各层碳密度大小顺序为:乔木层 > 枯落物层 > 木质物残体 > 灌木层 > 草本层 > 藓被层,以上各层占植被层碳密度的  $79.71\% \sim 85.78\%$ 、 $8.81\% \sim 15.28\%$ 、 $1.11\% \sim 5.62\%$ 、 $0.69\% \sim 3.54\%$ 、 $0.19\% \sim 1.39\%$  和  $0 \sim 0.15\%$ 。活地被物占植被碳密度的  $81.66\% \sim 90.71\%$ 。

**2.1.1 乔木层碳密度** 乔木层碳密度随龄组的增大而增加,中龄林是幼龄林的 1.92 倍,近熟林是中

龄林的 1.26 倍,而成熟林与近熟林很相近,是近熟林的 1.01 倍,可见幼林增长迅速,中龄以后长势降低。乔木层碳密度占活地被物层碳密度的  $94.57\% \sim 98.89\%$ ,该比例随着龄组的增大而呈单峰曲线,在中龄林最高,幼龄林最低。

不同龄组乔木层各组分碳密度的分配不一,幼中龄林为:干 > 根 > 皮 > 枝 > 叶,近成熟林为:干 > 枝 > 根 > 皮 > 叶,树干占乔木层碳密度的  $57.26\% \sim 67.42\%$ ,树根、树枝和树皮次之,分别占  $11.09\% \sim 14.96\%$ 、 $11.38\% \sim 12.78\%$  和  $8.86\% \sim 13.17\%$ 。树叶比例最小,为  $1.21\% \sim 2.50\%$ ,所有龄组地上碳密度比例( $85.04\% \sim 88.91\%$ )远高于地下部分。各组分碳密度及比例随着龄组的增大变化趋势也不尽相同。

表 1 不同龄组植被层碳密度

Table 1 Carbon density of vegetation layer in different age groups(单位:  $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ )

层次	器官	幼龄林	中龄林	近熟林	成熟林
乔木层	干	26.11	55.76	74.40	73.55
	枝	5.53	9.97	12.60	14.28
	叶	1.14	1.33	1.34	1.47
	皮	6.01	9.05	9.77	9.94
	根	6.82	11.50	12.24	12.47
	地上	38.78	76.13	98.11	99.24
灌木层	小计	45.61	87.63	110.35	111.71
	叶	0.22	0.10	0.10	0.30
	茎	0.39	0.25	0.19	0.84
草本层	根	1.27	0.37	1.20	1.31
	小计	1.88	0.72	1.49	2.45
	地上	0.11	0.08	0.06	0.04
藓被层	地下	0.63	0.12	0.28	0.23
	小计	0.74	0.20	0.34	0.28
	未分解	0.00	0.06	0.19	0.00
枯落物	未分解	0.45	0.77	1.38	2.14
	半分解	3.90	9.35	11.71	19.28
	小计	4.35	10.12	13.09	21.42
木质物残体		0.59	5.88	3.86	4.29
植被层		53.17	104.61	129.32	140.15

**2.1.2 林下植被层碳密度** 林下植被层碳密度为  $0.98 \sim 2.73 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$  (表 1),占活地被层碳密度的  $1.11\% \sim 5.43\%$ ,其中,灌木层碳密度比例为  $71.70\% \sim 89.83\%$ ,并随龄组的增大也呈“U”型变化趋势,草本层碳密度比例为  $10.17\% \sim 28.30\%$ ,随龄组的增大而降低,藓被层碳密度比例在近熟林大于中龄林。

幼龄林、中龄林、近熟林和成熟林的枯落物层碳密度分别为  $4.35 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $10.12 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $13.09 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$  和  $21.42 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,与乔木层碳密度很相近的是,幼龄林到中龄林阶段枯落物层碳密度增加幅度最大,中龄林为幼龄林的 2.33 倍,之后增加幅度降低,分别为 1.29 和 1.64 倍。枯落物层可划分为未分解层和半分解层,所有龄组的枯落物层均以半分

解层为主,占枯落物总量的 89.44%~92.35%。未分解和半分解层碳贮量均随着龄组的增大而增加,但两者的比例随着龄组的增大波动很大。

**2.1.3 木质物残体碳密度** 木质物残体碳密度为 0.59~4.29 t·hm<sup>-2</sup>。木质物残体碳密度随着龄组的增大而增加。

## 2.2 兴安落叶松林固碳潜力

由现有数据计算得到(图1),从幼龄到近熟林阶段,兴安落叶松林固碳潜力分别为 86.98 t·hm<sup>-2</sup>、35.54 t·hm<sup>-2</sup>和 10.55 t·hm<sup>-2</sup>。随着年龄的增加呈降低趋势。其中,活地被物固碳潜力比例与植被总固碳潜力变化趋势一致,分别为 76.12%、72.68%和 19.17%。死地被物则呈增加趋势,分别为 23.88%、27.32%和 80.83%。究其原因,幼龄林林间竞争死亡率很高,产生大量枯立木,浅根系的特点也使大量兴安落叶松倒下,随着郁闭度增加,虽然枯死木、倒木逐渐减少(659 株·hm<sup>-2</sup>、299 株·hm<sup>-2</sup>和 173 株·hm<sup>-2</sup>),但从径级结构上来说,幼龄林中均为径级 2.5~10 cm,中龄林中有 8 株 10~20 cm,近熟林中有 43 株 10~20 cm 的。同样是一株倒木,小径级 CWD 径级小,在整个林分的碳密度上不占优势,胸径小于 2.5 cm 和 10~20 cm 的碳密度相差很大。

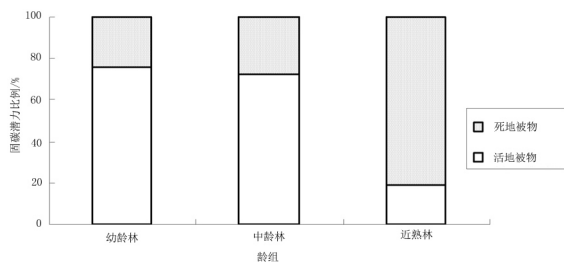


图1 兴安落叶松林固碳潜力

Fig.1 Carbon sequestration potential of *Larix gmelini* forest

## 3 结论

本研究估算了兴安落叶松林植被层碳密度和固碳潜力。研究结果表明:不同龄组兴安落叶松林植被碳密度在 53.17~140.15 t·hm<sup>-2</sup>之间。随着林龄的增加,兴安落叶松天然林植被碳密度逐渐增大。从幼龄到近熟林阶段,兴安落叶松林固碳潜力分别为 86.98 t·hm<sup>-2</sup>、35.54 t·hm<sup>-2</sup>和 10.55 t·hm<sup>-2</sup>。随着年龄的增加呈降低趋势。目前大兴安岭地区兴安落叶松幼中龄林比重偏大,未来固碳提升空间较大。2014年实施全面停止天然林商业性采伐后,幼中龄林逐步会向成熟林过渡,固碳能力会进一步增强。应通过科学抚育,提高林分质量,增加的碳汇能力,以此更好地提升兴安落叶松森林生

态系统在全球碳循环中的作用。

## 4 讨论

### 4.1 碳密度特征

本研究结果活地被物层碳密度为 48.23~114.44 t·hm<sup>-2</sup>,大于刘国华等<sup>[25]</sup>(38.7 t·hm<sup>-2</sup>)和赵敏等<sup>[26]</sup>(41.32 t·hm<sup>-2</sup>)对全国森林植被平均碳密度的研究结果。赵俊芳<sup>[27]</sup>(104.5 t·hm<sup>-2</sup>)、方精云等<sup>[28]</sup>(42.07~93.19 t·hm<sup>-2</sup>)对东北地区森林植被平均碳密度的研究结果介于本研究范围内。

### 4.2 林龄对碳密度的影响

林龄与森林碳循环的许多组分都密切相关,包括粗木质残体、土壤碳、生物量、总初级生产力(GPP)等<sup>[29-30]</sup>。不同林龄的森林生态系统呈现碳源/碳汇的不确定性很大。本研究中,杜香-兴安落叶松林碳密度随着龄组的增大而增加,与齐光等<sup>[20]</sup>对兴安落叶松林研究一致。一般来说,植物生长是满足 Logistic 方程,随林龄的增大,乔木层碳储量变化趋势类似于“S”形曲线<sup>[31]</sup>。

### 4.3 林下植被的贡献

虽然林下灌草在整个森林植被生物量中所占的比例较小,但在维持森林群落的稳定性、维护全球气候变化,特别是减缓大气 CO<sub>2</sub> 浓度上升等有着重要的意义<sup>[32]</sup>。如果忽略这一部分,将造成森林生态系统碳储量的不精准。本研究中上述碳储量与乔木层碳储量的变化趋势没有相关性,这与曹小玉等<sup>[33]</sup>、杨昆等<sup>[34]</sup>研究的结果一致。究其原因,可能是林木随着年龄的增长不断长大,伴随着林分结构和冠层特征的改变,林下光照、水分、养分等生境因子也发生变化。

### 4.4 固碳潜力

兴安落叶松林植被及活地被物固碳潜力随着龄组的增加而逐渐减小,活地被物层固碳潜力比例随着龄组的增加也逐渐减小。幼龄林和中龄林的总碳密度都较低,近熟林、成熟林和过熟林的总碳密度相对较高。随着森林的自然生长,幼龄林和中龄林都必然向近熟林、成熟林和过熟林方向发展<sup>[12]</sup>,因此兴安落叶松林森林生态系统的固碳潜力尚有较大的增长空间,总碳储量必然增加。

## 参考文献:

- [1]周国逸.中国森林生态系统固碳现状、速率和潜力研究[J].植物生态学报,2016,40(4):279-281.
- [2]Dixon RK,Solomon AM,Brown S,et al. Carbon pool and flux of global forest ecosystems[J]. Science,1994,263:185-190.
- [3]Houghton RA. Aboveground forest biomass and the global carbon balance[J]. Global Change Biology,2005,11,945-958.
- [4]谢馨瑶,李爱农,新华安.大尺度森林碳循环过程模拟模

- 型综述[J]. 生态学报, 2018, 38(1): 1-14.
- [5]徐文茹, 贺红土, 罗旭, 等. 停止商业性采伐对大兴安岭森林结构与地上生物量的长期影响[J]. 生态学报, 2018, 38(1): 1-13.
- [6]Bárcena TG, Kiær LP, Vesterdal L, et al. Soil carbon stock change following afforestation in Northern Europe: A meta-analysis[J]. *Global Change Biology* 2014, 20: 2393-2405.
- [7]Liu YC, Yu GY, Wang QF, et al. How temperature, precipitation and stand age control the biomass carbon density of global mature forests[J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2014, 23: 323-333.
- [8]赵玮, 胡中民, 杨浩, 等. 浑善达克沙地榆树疏林和小叶杨人工林碳密度特征及其与林龄的关系. [J]. 植物生态学报, 2016, 40(4): 318-326.
- [9]吴国训, 唐国君, 阮宏华, 等. 基于森林资源清查的江西省森林碳储量及固碳潜力研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2019, 43(1): 105-110.
- [10]王建, 王根绪, 王长庭, 等. 青藏高原高寒区阔叶林植被固碳现状、速率和潜力[J]. 植物生态学报, 2016, 40(4): 374-384.
- [11]张美丽. 赤峰市敖汉旗农田土壤有机碳库变化特征及其固碳潜力研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2018.
- [12]汲玉河, 郭柯, 倪健, 等. 安徽省森林碳储量现状及固碳潜力[J]. 植物生态学报, 2016, 40(4): 395-404.
- [13]梁萌杰, 陈龙池, 汪思龙. 湖南省杉木人工林生态系统碳储量分配格局及固碳潜力[J]. 生态学杂志, 2016, 35(4): 896-902.
- [14]刘迎春, 于贵瑞, 王秋凤. 基于成熟林生物量整合分析中国森林碳容量和固碳潜力[J]. 中国科学, 2015, 45(2): 210-222.
- [15]廖亮林, 周蕾, 王绍强. 2005-2013年中国新增造林植被生物量碳库固碳潜力分析[J]. 地理学报, 2016, 71(11): 1939-1947.
- [16]刘魏魏, 王效科, 逯非. 全球森林生态系统碳储量、固碳能力估算及其区域特征[J]. 应用生态学报, 2015, 26(9): 2881-2890.
- [17]刘娜, 齐淑艳, 陈宏伟. 大兴安岭呼中林区不同火后恢复年限森林碳密度变化研究[J]. 西北林学院学报, 2017, 32(5): 8-12.
- [18]彭妮, 董利虎, 李凤日. 基于可加性生物量模型的大兴安岭东部主要林型森林植被碳储量及其分配[J]. 应用生态学报, 2016, 27(12): 3749-3758.
- [19]魏亚伟, 周旺明, 周莉, 等. 兴安落叶松天然林碳储量及其碳库分配特征[J]. 生态学报, 2015, 35(1): 0189-0195.
- [20]齐光, 王庆礼, 王新闯, 等. 大兴安岭林区兴安落叶松人工林植被碳储量. [J]. 应用生态学报, 2011, 22(2): 273-279.
- [21]格日乐高娃, 杜香. 兴安落叶松林碳密度及固碳潜力研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2018.
- [22]周梅. 大兴安岭森林水文规律研究[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2003.
- [23]王飞. 兴安落叶松天然林碳密度与碳平衡研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2018.
- [24]王飞, 张秋良, 王冰, 等. 不同年龄杜香-兴安落叶松林粗木质残体贮量及特征[J]. 生态学杂志, 2012, 31(12): 2981-2989.
- [25]刘国华, 傅伯杰, 方精云. 中国森林碳动态及其对全球碳平衡的贡献[J]. 生态学报, 2000, 20(5): 733-740.
- [26]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[J]. 地理科学, 2004, 24(1): 50-54.
- [27]赵俊芳, 延晓冬, 贾根锁. 1981-2002年中国东北地区森林生态系统碳贮量的模拟[J]. 生态学报, 2009, 20(2): 241-249.
- [28]方精云, 陈安平. 中国森林植被碳库动态变化及其意义[J]. 植物学报, 2001, 43(9): 967-973.