

毛乌素沙地樟子松人工林不同坡向的 碳储量及空间分布研究

徐松^{1,3}, 廖超英^{2,3}, 多杰吉^{3,4}, 付广军⁵

(1. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学

资源环境学院; 3. 农业部西北植物营养与农业环境重点实验室, 陕西 杨凌 712100;

4. 西北农林科技大学 林学院, 陕西 杨凌 712100; 5. 陕西省治沙研究所, 陕西 榆林 719000)

摘要: 采样分析了樟子松人工林林木不同器官碳储量、凋落物碳储量及土壤不同土层碳储量, 以研究不同坡向樟子松人工林系统碳储量及其空间分布。结果表明: 丘间地(Interdune)树木碳密度显著高于背风坡(Leeward)和迎风坡(Windward) ($p < 0.05$)。三种立地条件下樟子松各器官碳密度分配分别为: 树干碳密度 > 根碳密度 > 枝碳密度 > 叶碳密度, 其中丘间地和背风坡林木分配较多的碳同化物给树干生长, 迎风破林分则分配较多的同化物给根系生长, 说明植物各器官碳含量受坡向的影响。丘间地的凋落物密度与迎风坡没有明显差异, 而背风坡显著低于丘间地 ($p < 0.05$)。整个坡面(0—50 cm)土壤有机碳密度丘间地显著高于迎风坡和背风坡, 迎风坡与背风坡之间没有显著差异。樟子松林系统总碳密度大小为丘间地 (98.86 t/hm^2) > 背风坡 (72.3 t/hm^2) > 迎风坡 (51.2 t/hm^2), 其中凋落物占总碳储量的 2.8%~3.1%。背风坡和丘间地的土壤碳密度占林分总碳密度的比例低于迎风坡, 但林木碳密度占林分总碳密度比例则相反, 表明坡向对林分碳储量的空间分布有明显影响。

关键词: 樟子松; 坡向; 碳储量; 生物量

中图分类号: S791.253

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2015)06-0014-05

Study of Carbon Storage and Spatial Distribution of *Pinus sylvestris* Artificial Forest Under Different Slope Aspects in Mu Us Desert

XU Song^{1,3}, LIAO Chaoying^{2,3}, DUO Jieji^{3,4}, FU Guangjun⁵

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100,

China; 3. Key Laboratory of Plant Nutrition and Agri-environment in Northwest China, Ministry of

Agriculture, Yangling, Shaanxi 712100, China; 4. College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling,

Shaanxi 712100, China; 5. Desert Control Research Institute of Shaanxi province, Yulin, Shaanxi 719000, China)

Abstract: Based on the investigation data and laboratory experiment, the influence of slope aspects to carbon storage and its spatial distribution had been examined in *Pinus sylvestris* artificial forest. According to the measurement, the forest carbon density of interdune was much higher than leeward and windward, and the order of its organ carbon density was trunk, root, brunch and leaf. In addition, more carbon assimilation was distributed in trunk growth in interdune and leeward, while root got more carbon in windward, which showed that aspect had the effect on organ carbon distribution. There was not obvious difference between leeward and windward in litter carbon density, leeward was significantly lower than interdune. Moreover, the same results were obtained in whole soil profile. Under every part carbon storage in land, the order of total carbon density was interdune (98.86 t/hm^2), leeward (72.3 t/hm^2), windward (51.2 t/hm^2), the litter carbon storage accounted for 2.8% to 3.1% of total carbon. The soil carbon density accounting for stand carbon density in leeward and interdune were lesser than windward, but it was opposite in forest carbon density, which reflected that stand carbon distribution was affected by slope significantly.

Keywords: *Pinus sylvestris*; aspect; carbon storage; biomass

收稿日期: 2014-12-07

修回日期: 2014-12-22

资助项目: 国家自然科学基金资助项目(3067033)

第一作者: 徐松(1988—), 男, 新疆阿瓦提县人, 硕士研究生, 主要从事水土保持与荒漠化研究。E-mail: shouxincool@163.com

通信作者: 廖超英(1959—), 男, 安徽宿州人, 教授, 博士生导师, 主要从事水土保持与荒漠化防治研究。E-mail: chaoying95@163.com

沙漠化作为一个全球性环境问题日益引起人们的关注^[1]。对沙漠化的防治和研究重点应为两种生态系统相邻的边界区域,即是生态系统脆弱带的研究^[2]。毛乌素沙地东南缘位于我国农牧交错带的西部,典型的多层次过渡带生态环境脆弱^[3],是我国北方沙漠化最为严重的区域之一,但其中防风固沙林一直发挥着重要的生态、经济和社会效益。

樟子松(*Pinus sylvestris* var)因其具有耐寒、耐旱、速生、材质好以及抗逆性强等特性,成为干旱、半干旱风沙区主要造林树种^[4]。部分学者对人工栽植林地碳储量的研究表明,立地条件(坡向、坡位、土壤等)对人工林的生长及碳储量具有重要影响^[5-9],而目前测定碳储量方法多以空间方法为主,很难准确测定且结果可靠性差^[10],沙区这方面研究比较匮乏,尚需要更多区域实测数据^[11-12]。基于此,本文以榆林毛乌素沙地栽植年代相近的人工樟子松林为研究对象,研究不同坡位条件下樟子松人工林碳储量,为空间尺度区域调查提供实测碳储量数据,以期为毛乌素樟子松固沙林的可持续经营、治沙成果巩固提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区地处毛乌素沙地东南部红石峡(109°12'E, 38°26'N),属温带半干旱大陆性季风气候,日照充足,热量丰富。该区海拔 1 100 m,年均温 7.9℃,极端最高温 37.6℃,极端最低温-32.7℃,年均无霜期 159 d,年均蒸发量 967.3 mm,年均降水量 397 mm,雨量分配不均,年际变化大。土壤类型主要为风沙土,表土疏松,区域性植被稀少,主要的建群种为踏郎(*Hedysarum mongolicum*)、花棒(*Hedysarum scoparium*)、柠条(*Caragana korshinskii*)、沙蒿(*Artemisia desteriorum*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、沙柳(*Salix cheilophila*)等。乔木固沙树种多为樟子松(*Pinus sylvestris* var.)、河北杨(*Populus X hopeiensis*)等。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置 2013 年 9 月选择典型立地条件设置样地进行调查,选取海拔、林龄相近的樟子松林地为研究对象,在迎风坡(Windward,WD)和背风坡(Leeward,LD)以及丘间地(Interdune,ID)3 种立地条件下按照坡位分别建立 3 块 20 m×20 m 的样地,对每块样地进行每木检尺,测定树高和胸径。样地基本状况(表 1)。

1.2.2 林分生物量测定 本文生物量,仅指以重量表示单位面积上或单株林木地上部分和根系有机体干重。根据林地每木检尺,每个样地内选择 1 株标准

木伐倒,其中树干从基部到梢按 1 m 分段取样,称量带皮鲜重,在两端处取 5 cm 树皮称重,按比例计算全段鲜树皮重,并由此计算树干鲜重,枝叶分别全部称重;以伐倒木为中心 1 m 为半径挖取根系,冲洗干净,阴干称其总重^[13]。将各部分称取少量密封编号带回实验室在 75℃烘箱中烘至恒重,测定各部分含水率,得出植株各器官干物质质量及地上部分干物质质量。由于林下灌木和草本稀疏,故本研究忽略不计。

表 1 各标准地基本情况

样地类型	平均树高/m	平均胸径/cm	密度/(株·hm ⁻²)	坡度/(°)	郁闭度/%
迎风坡	6.6±1.09	9.4±1.48	2436	10	74~80
背风坡	7.5±1.07	14.6±1.92	1943	17	60~67
丘间地	11±1.60	14.5±2.04	2031	3	60~65
裸沙地	—	—	—	6	<5

1.2.3 林木碳密度测定 将烘干的树木叶、枝、干、根样品进行研磨,过 60 目筛放于密封袋中。采用重铬酸钾氧化—外加热法测定各组分 ω (植株碳)。通过树木各组分生物量和 ω (植株碳),求出樟子松各器官碳密度。然后结合林分密度,计算树木碳密度。

1.2.4 凋落物及土壤碳密度测定 在每块样地中,采用“S”形 5 点采样法挖取 5 个剖面按照 0—15, 15—30,30—50 cm 分层取样,同一层 5 个土样混合后,四分法留取 300~500 g 土样装袋、编号;同时每层土壤用环刀取样测定土壤容重。在每个样地内随机设置 5 个 1 m×1 m 的小样方收集凋落物,并选取约 250 g 凋落物带回实验室测定含水率,并通过小样方内干物质质量和凋落物含碳率来推算单位面积凋落物碳密度^[14],以裸沙地为对照。土壤碳密度和凋落物碳密度均采用重铬酸钾氧化—外加热法测定。土壤碳密度^[15](SOC,t/hm²)采用下式计算:

$$SOC=\sum_i^n C_i \times H_i \times B_i \times (1-S_i) \times 10$$

式中: C_i ——每层土壤有机碳(g/kg); H_i ——每层厚度(cm); B_i ——每层土壤容重(g/cm³); S_i ——每层石砾。

1.3 数据处理

所有试验数据均使用 Excel 2003 和 SPSS 16.0 软件进行分析,采用 SPSS 16.0 的单因素方差分析

2 结果与分析

2.1 植株碳储量

对三种不同坡位条件下的樟子松不同器官碳密度的分析表明(表 2),干的碳密度 ID 最高,其次 LD,WD 最小,LD 的干碳密度是 WD 的 2.43 倍;枝碳密度也以 WD 最小,ID 和 LD 之间没有显著差异;叶碳

密度在三种立地条件下差异不显著。根密度大小为 ID>LD>WD,其碳密度在三种立地条件下的差异性显著。三种立地条件下的樟子松总碳密度有显著差异性,ID 最高,其次为 LD,WD 最小,ID 总碳密度分别是 LD 和 WD 的 1.4 倍和 2.12 倍。在干旱、半干旱地区水分是土壤发育、植被生长重要的因子,植被吸收水分和养分主要是由植被根系的细中根部分^[16],樟子松细中根主要集中分布在 50 cm 以上土

层^[17],因此采用细中根系较浅的樟子松造林,一方面对沙区有限土壤水分和养分利用更为充分,同时又不会造成土壤中地下水位迅速下降而导致植物根系脱离含水层而枯萎。根据学者研究,在不进行人工灌水情况下,樟子松人工林土壤质量含水量丘间地>背风坡>迎风坡^[18]。由此可见,在贫瘠较早的毛乌素沙地区域坡度较低的丘间地更有利于樟子松林的生长和碳含量的累积。

表 2 不同立地条件下樟子松各器官碳密度 t/hm²

立地条件	干	枝	叶	根	总和
WD	21.6±0.59a	3.4±0.07a	3.4±0.05a	5.7±0.1a	34.1±0.79a
LD	35.2±0.86b	5.3±0.15b	4.3±0.12b	6.8±0.12b	51.6±1.13b
ID	52.4±3.83c	5.7±0.28a	4.6±0.15a	9.6±0.6c	72.3±4.70c

樟子松林在三种立地条件下的各器官碳储量分配模式基本一致,均为干碳密度最大,其次为根碳密度,再次是枝碳密度,叶碳密度最小。ID 和 LD 根密度分别占林木总碳密度的 13.3%和 13.2%,而 WD 根密度占林木碳密度的 16.7%。对比于 ID 和 LD,WD 条件下,林木分配更多的碳累积物供给根系的生长以储存更多的碳,更有利于碳的累积。

2.2 凋落物碳储量

三种立地条件下的植被凋落物的碳密度也不同,LD,WD 和 ID 之间存在显著差异,WD 条件下凋落物碳密度显著低于 LD 和 ID(图 1)。LD 和 ID 凋落物碳密度分别比 WD 高 44.5%和 107.5%。坡向的不同,其水分条件会存在一定差异,受环境大气候及光照的影响也有所不同,从而造成不同坡向林分内的温湿度不同,影响植物枝叶的正常新陈代谢及枯落物产生^[19]。不同坡向的自然环境(风、雨等)在不同程度上也导致凋落物层生物量产生较大异质性,因而造成凋落物层碳含量相差较大^[20-21]。

LD 和 WD 土壤有机碳密度在该层相近。ID 土壤有机碳密度也在整个土壤剖面(0—50 cm)中最高,分别比 LD 和 WD 高 26.4%和 50.26%。3 种立地条件下每层土壤有机碳比裸沙地高出 161%~605.2%,总有机碳密度分别是裸沙地的 4.1 倍、3.46 倍和 5.19 倍,这说明樟子松对土壤有明显改良作用。土壤中大部分有机质来自植被枯枝落叶分解的物质转移,一部分来自根系分泌物和根系老化分解及动物活动。樟子松自然整枝能力较强,凋落物层生物量输入大^[22],相比于 WD 和 LD,ID 条件下凋落物层向土壤转移有机质的过程更少受到自然环境的破坏,向土壤层输入有机物更多。凋落物对土壤的影响都集中于土壤表层,短时间内对深层土壤影响较小,但随着植被生长、土壤中有机碳分解和转移,土壤碳含量逐渐增大但彼此间差距逐渐减小,是土壤趋于稳定的一个表现。

表 3 不同立地类型土壤有机碳密度 t/hm²

立地条件	0—15 cm	15—30 cm	30—50 cm	0—50 cm
LD	8.19±0.4a	5.52±0.5a	4.88±0.8a	18.59±0.8a
WD	7.09±0.7a	4.16±0.4b	4.41±0.9a	15.66±0.6a
ID	9.52±0.7b	8.07±0.8c	5.94±1.4a	23.53±2.6b
SD	1.35±0.1c	1.50±0.1d	1.69±0.2b	4.53±0.3c

三种立地条件下樟子松人工林总碳密度分别是 72.3 t/hm² (LD)、51.2 t/hm² (WD)、98.86 t/hm² (ID),丘间地条件下樟子松林总碳密度显著高于其他两种立地条件(图 2)。不同立地条件下均为树木碳密度最高,其次为土壤碳密度,凋落物碳密度占林分总碳密度的 2.8%~3.1%。LD 和 ID 的土壤碳密度占林分总碳密度的比例低于 WD,但林木碳密度占林分总碳密度比例则相反,表明不同立地条件影响樟子松林地碳储量的空间分布。相比于 LD 和 ID,WD 条件下空间碳储量分布更倾向于土壤碳的增加,这可能与林分分配更多的碳有机物用于根系的生长有关。

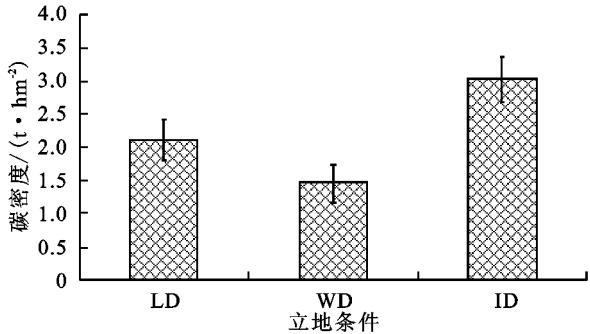


图 1 不同立地条件凋落物碳密度

2.3 土壤碳储量

不同立地条件下土壤有机碳在土层中的分配基本一致,有机碳密度均随土层深度的增加而递减(表 3)。在各个土层 ID 土壤有机碳密度均显著高于 LD 和 WD,在 30—50 cm 土层,LD,WD 和 ID 差异性不显著,

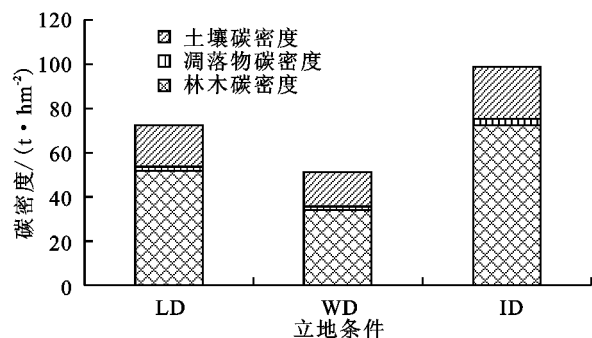


图2 不同立地条件下樟子松林木、凋落物和土壤碳密度

3 讨论

坡向对林木各个器官的碳储量分配,林分的生长和空间碳储量均有显著影响。于顺龙^[23]、王向荣^[13]等指出坡向、坡位对东北林区水曲柳中龄林林分生长和生物量分配有重要影响,坡向对林分平均胸径和树高的影响大于坡位;何志斌等^[24]报道了祁连山青海云杉木林受地形条件的影响变化,指出坡向直接影响森林土壤有机碳含量及其分配;这些研究结果都揭示了坡向因子对林分碳储量有显著影响。研究表明,阴坡方向的林木碳储量和土壤碳储量显著高于阳坡。研究样地区域处于陕西北部易旱区,土壤水分可能是限制该区域林地碳储量的主要因素之一。研究发现,丘间地(ID)的土壤含水量高于背风坡(LD)和迎风坡(WD)。对麻栎林^[14]、沙棘林^[25]的研究也表明,坡向对林地生产力有显著影响,阴坡方向林分的生物量和生长量都明显高于阳坡,这些研究均认为林分土壤肥力和土壤含水量与阴坡较高林地碳储量有密切关系。而学者对毛竹林的研究则指出处于阳坡的植被碳储量和土壤碳储量均显著高于阴坡^[26]。这些不同的研究结果说明了研究不同的树种在特定生物环境中影响其林木生长的主要生态因子存在差异。由于毛竹林生长区域降雨量普遍较高,坡位对阳光的影响可能优先于土壤水分的作用,这也使得处于阳坡的毛竹林具有较高的生产力和碳储量。而本研究林地处于陕北土壤水分贫瘠区域,土壤水分对林木的碳储量有重要影响,因而处于水分条件较好的丘间地(ID)更有利于樟子松林的生长和碳的累积,这与学者研究一致^[9,13]。

林地中土壤碳含量具有“表聚作用”^[27]。本文中同一坡向0—15 cm土层土壤有机碳密度是15—30 cm的1.2~1.7倍,是30—50 cm的1.5~1.7倍,说明不同坡向条件下土壤有机碳有较强的表聚性,与相关研究结果一致^[7,14,18]。土壤中的碳含量是受生物因素和非生物因素共同影响的结果。植被覆盖类型的不同直接影响SOC的含量和分布,还通过影响与SOC形成和转化有关的因子间接影响SOC^[28]。对

天然柴松林、辽东栎林和油松林的土壤有机碳研究表明,三种林地土壤有机碳含量差异显著,不同土层有机碳也达到显著水平,但随着深度增加,不同林分间差异逐渐减小^[15]。研究发现,相同植被类型条件下,ID土壤有机碳密度在整个土壤剖面(0—50 cm)中最高,分别比LD和WD高26.4%和50.26%,说明不同坡向影响着土壤的碳储量及其分布。三种立地条件的总有机碳密度分别是裸沙地的4.1倍、3.46倍和5.19倍,裸沙地没有很好的植被覆盖,长期处于侵蚀状态,土壤养分损失严重,表现为裸沙地各层土壤碳相近且随土壤深度增加,碳含量逐渐增加趋势。但随着植被的生长,生物量不断增加,进入土壤的植被凋落物增多,微生物数量逐渐增加,代谢加强,从而提高了土壤碳的含量,改善了土壤性质^[29]。植被的枯落物作为土壤中碳的主要来源,由于坡向不同,影响了林木的生物量和进入土壤中的植被凋落物含量,因而处于生境条件相对较好的丘间地(ID)和背风坡(LD),土壤有机碳含量要高于迎风坡(WD)。樟子松作为乔木,其根系发达,分布范围广,根系分泌物对土壤碳也有着重要影响^[30]。本研究中坡向除了影响林木生长外,还会造成林分水热状况的差异,必然会影响土壤温度、呼吸等,进而导致土壤碳的分解和转移出现差异。今后应加强土壤温度、土壤呼吸和根系分泌物对土壤碳的研究,以便更深入揭示其影响机理。

4 结论

(1) 三种立地条件下林木各个器官的碳储量分配模式基本一致,都为树干密度最大,其次为根碳密度,其次为枝碳密度,叶碳密度最小。不同立地条件下的樟子松总碳密度ID最高,其次为LD,WD最小,其中ID和LD根密度分别占林木总碳密度的13.3%和13.2%,而WD根密度占林木碳密度的16.7%。相比于ID和LD,WD条件下林木分配更多的碳累积物供给根系的生长以储存更多的碳,更有利于碳的累积。

(2) 土壤有机碳在不同立地条件下土层中的分配基本一致,有机碳密度均随土层深度的增加而递减。ID土壤有机碳密度在整个土壤剖面(0—50 cm)中最高,分别比LD和WD高26.4%和50.26%。3种立地条件下每层土壤有机碳比裸沙地高出161%~605.2%,表明林分不断的生长,提高了土壤碳含量,改善了土壤性质。

(3) 三种立地条件下樟子松人工林总碳密度分别是72.3 t/hm² (LD)、51.2 t/hm² (WD)、98.86 t/hm² (ID),其碳的空间分配模式基本一致,均为树木碳密度最高,其次为土壤碳密度,凋落物碳密度最小。其中

LD和ID的土壤碳密度占林分总碳密度的比例低于WD,但林木碳密度占林分总碳密度比例则相反,表明不同立地条件影响樟子松林地碳储量的空间分布。

参考文献:

- [1] 高国雄. 毛乌素沙地东南缘人工植被结构与生态功能研究[D]. 北京:北京林业大学,2007.
- [2] 尉秋实,闫来基. 干旱沙区樟子松育苗造林技术[J]. 林业科技通讯,2001(9):7-9.
- [3] 樊晓英,廖超英,谢燕,等. 毛乌素沙地东南部樟子松生长状况调查分析[J]. 西北林学院学报,2008(4):112-116.
- [4] Zhu J J, Fan Z P, Zeng D H, et al. Comparison of stand structure and growth between artificial and natural forests of *Pinus sylvestris* var. *Mongolica* on sandy land[J]. Journal of Forestry Research,2003,14(2):103-111.
- [5] Hairston A B, Grigal D F. Topographic influences on soils and trees within single mapping units on a sandy outwash landscape [J]. Forest Ecology and Management,1991,43(1):35-45.
- [6] 黄从德,张国庆. 人工林碳储量影响因素[J]. 世界林业研究,2009,22(2):34-38.
- [7] 郭建明,郑博福,胡理乐,等. 井冈山两种典型森林土壤有机碳密度及其影响因素的比较[J]. 生态环境学报,2011,20(12):1836-1840.
- [8] Toit B D. Effects of site management on growth, biomass partitioning and light use efficiency in a young stand of *Eucalyptus grandis* in South Africa [J]. Forest Ecology and Management,2008,255(7):2324-2336.
- [9] 陈淑容. 不同立地因子对楠木生长的影响[J]. 福建林学院学报,2010,30(2):157-160.
- [10] Wang W J, Qiu L, Zu Y G, Su D X, et al. Changes in soil organic carbon, nitrogen, pH and bulk density with the development of larch(*Larix gmelinii*) plantations in China[J]. Global Change Biology,2011,17(8):2657-2676.
- [11] Sun Y J, Zhang J, Han A H, et al. Biomass and carbon pool of *Larix gmelinii* young and middle age forest in Xing'an mountains Inner Mongolia[J]. Acta Ecologica Sinica,2007,27(5):1756-1762.
- [12] Wang S Q, Zhou C H, Liu J Y, et al. Simulation analyses of terrestrial carbon cycle balance model in Northeast China[J]. Acta Geographica Sinica,2001,56(4):400-407.
- [13] 王向荣,孙海龙,余鑫,等. 坡向和坡位对水曲柳中龄林生长的影响[J]. 山西农业大学学报:自然科学版,2011,31(1):30-34.
- [14] 成向荣,虞木奎,吴统贵,等. 立地条件对麻栎人工林碳储量的影响[J]. 生态环境学报,2012,21(10):1674-1677.
- [15] 杨晓梅,程积民,孟蕾,等. 不同林地土壤有机碳储量及垂直分布特征[J]. 中国农学通报,2010,26(9):132-135.
- [16] Morris A R. Soil fertility and long-term productivity of *Pinus patula* plantations in Swaziland[D]. Burke, UK: University of Reading,1986.
- [17] 苏芳莉,刘明国,郭成久,等. 沙地樟子松根系垂直分布特征及对土壤的影响[J]. 中国水土保持,2006(1):20-24.
- [18] 段民福,廖超英,孙长忠,等. 毛乌素沙地樟子松人工林土壤物理性质的时空变异规律[J]. 西北农业学报,2012,21(3):188-192.
- [19] 钟国辉,辛学兵. 西藏色季拉山暗针叶林凋落物层化学性质研究[J]. 应用生态学报,2004,15(1):167-169.
- [20] 张德强,叶万辉,余清发,等. 鼎湖山演替系列中代表性森林凋落物的研究[J]. 生态学报,2000,20(6):938-944.
- [21] 李海涛,于贵瑞,李家永,等. 亚热带红壤丘陵区四种人工林凋落物分解动态及养分释放[J]. 生态学报,2007,27(3):898-908.
- [22] 胡海清,罗碧珍,魏书精,等. 大兴安岭5种典型林型森林生物碳储量研究[J]. 生态学报,2014,35(17):1-21.
- [23] 于顺龙. 坡向,坡位对水曲柳中龄林生长与生物量分配的影响[J]. 内蒙古林业调查设计,2009,32(1):54-56.
- [24] 何志斌,赵文智,刘鹄,等. 祁连山青海云杉林斑表层土壤有机碳特征及其影响因素[J]. 生态学报,2006,26(8):2572-2577.
- [25] 魏宇昆,梁宗锁,崔浪军,等. 黄土高原不同立地条件下沙棘的生产力与水分关系研究[J]. 应用生态学报,2004,15(2):195-200.
- [26] 范叶青,周国模,施拥军,等. 坡向坡位对毛竹林生物量与碳储量的影响[J]. 浙江农林大学学报,2012,29(3):321-327.
- [27] 梁启鹏,余新晓,庞卓,等. 不同林分土壤有机碳密度研究[J]. 生态环境学报,2010,19(4):889-893.
- [28] 王艳芬,陈佐忠. 人类活动对锡林郭勒地区主要草原土壤有机碳分布的影响[J]. 植物生态学报,1998,22(6):545-551.
- [29] 薛立,邝立刚,陈红跃,等. 不同林分土壤养分,微生物与酶活性的研究[J]. 土壤学报,2003,40(2):280-285.
- [30] 康宏樟,朱教君,李智辉,等. 沙地樟子松天然分布与引种栽培[J]. 生态学杂志,2004,23(5):134-139.