

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第34卷 第10期 Vol.34 No.10 **2014**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 34 卷 第 10 期 2014 年 5 月 (半月刊)

目次

前沿理论与学科综述

- 景观可持续性与景观可持续性科学..... 赵文武,房学宁 (2453)
- 生态系统服务付费的诊断框架及案例剖析 朱文博,王 阳,李双成 (2460)
- 湿地植物根表铁膜研究进展..... 刘春英,陈春丽,弓晓峰,等 (2470)
- 水生生态环境中捕食信息素的生态学效应..... 覃光球,卢豪良,唐振柱,等 (2481)
- 脊椎动物传播植物肉质果中的次生物质及其生态作用 潘 扬,罗 芳,鲁长虎 (2490)

个体与基础生态

- 中亚热带天然林土壤 CH_4 吸收速率对模拟 N 沉降的响应 陈朝琪,杨智杰,刘小飞,等 (2498)
- 塔里木盆地南缘早生芦苇生态特征与水盐因子关系..... 贡 璐,朱美玲,塔西甫拉提·特依拜,等 (2509)
- 黄刺玫叶片光合生理参数的土壤水分阈值响应及其生产力分级..... 张淑勇,夏江宝,张光灿,等 (2519)
- 亚热带杉木和米老排人工林土壤呼吸对凋落物去除和交换的响应..... 余再鹏,万晓华,胡振宏,等 (2529)
- 施钾提高蚜害诱导的小麦茉莉酸含量和叶片相关防御酶活性..... 王 伟,张月玲,苏建伟,等 (2539)
- 高浓度 O_3 及太阳辐射减弱对冬小麦 PS II 光合活性及光能耗散的影响 孙 健,郑有飞,吴荣军,等 (2548)
- 蜡样芽孢杆菌 B3-7 在大田小麦根部的定殖动态及其对小麦纹枯病的防治效果 黄秋斌,张 颖,刘凤英,等 (2559)
- 有限供水下冬小麦全程耗水特征定量研究..... 张兴娟,薛绪掌,郭文忠,等 (2567)
- 抗真菌转基因水稻生态适合度评价..... 李 伟,郭建夫,袁红旭,等 (2581)
- 花生叶片蛋白组对 UV-B 辐射增强的响应 杜照奎,李钧敏,钟章成,等 (2589)
- 南海南部悬浮颗粒物脂肪酸组成..... 刘华雪,柯常亮,李纯厚,等 (2599)
- 年龄、集群、生境及天气对鄱阳湖白鹤越冬期日间行为模式的影响..... 袁芳凯,李言阔,李凤山,等 (2608)
- [树]麻雀羽再生的能量预算和水代谢散热调节 杨志宏,吴庆明,杨 渺,等 (2617)
- 低剂量杀虫剂对星豹蛛捕食效应的影响及其机理 李 锐,李 娜,刘 佳,等 (2629)
- 空心莲子草叶甲对越冬保护的响应与控害效能..... 刘雨芳,王秀秀,李 菲,等 (2638)
- ### 种群、群落和生态系统
- 气候变化对鄱阳湖白鹤越冬种群数量变化的影响..... 李言阔,钱法文,单继红,等 (2645)
- 不同退耕年限下菜子湖湿地土壤磷素组分特征变化..... 刘文静,张平究,董国政,等 (2654)

查干湖湿地浮游植物与环境因子关系的多元分析	李然然,章光新,张 蕾 (2663)
闽江河口区淡水和半咸水潮汐沼泽湿地土壤产甲烷菌多样性.....	曾志华,杨民和,余晨兴,等 (2674)
环境及遗传背景对延河流域植物叶片和细根功能性状变异的影响.....	郑 颖,温仲明,宋 光,等 (2682)
衡阳紫色土丘陵坡地植被恢复阶段土壤特性的演变.....	杨 宁,邹冬生,杨满元,等 (2693)
海平面上升影响下广西钦州湾红树林脆弱性评价.....	李莎莎,孟宪伟,葛振鸣,等 (2702)
中国南方 3 种主要人工林生物量和生产力的动态变化.....	杜 虎,曾馥平,王克林,等 (2712)
杉木人工林土壤真菌遗传多样性.....	何苑擘,周国英,王圣洁,等 (2725)
科尔沁固定沙地植被特征对降雨变化的响应.....	张腊梅,刘新平,赵学勇,等 (2737)
黄土丘陵区退耕还林地刺槐人工林碳储量及分配规律.....	申家朋,张文辉 (2746)
景观、区域和全球生态	
南亚热带森林演替过程中小气候的改变及对气候变化的响应.....	刘效东,周国逸,陈修治,等 (2755)
黄淮海平原典型站点冬小麦生育阶段的干旱特征及气候趋势的影响.....	徐建文,居 辉,刘 勤,等 (2765)
资源与产业生态	
基于 GIS 的山西省矿产资源规划环境影响评价	刘 伟,杜培军,李永峰 (2775)
基于效益分摊的水电水足迹计算方法——以密云水库为例	赵丹丹,刘俊国,赵 旭 (2787)
学术信息与动态	
全球土地计划第二次开放科学大会 (GLP 2 nd Open Science Meeting) 会议述评	段宝玲,卜玉山 (2796)
期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 348 * zh * P * ¥ 90.00 * 1510 * 36 * 2014-05	



封面图说: 鄱阳湖越冬的白鹤群——白鹤为国家一级保护动物,世界上白鹤东部种群的迁徙路线是从俄罗斯西伯利亚的雅库特,向南迁飞 5100km 到中国长江下游的鄱阳湖越冬,其中途经俄罗斯的雅纳河、印迪吉尔卡河和科雷马河流域,进入中国后主要停歇地有扎龙、林甸、莫莫格以及双台河口、滦河口、黄河三角洲和升金湖等地。多年的监测表明,世界 90% 以上的白鹤种群都在鄱阳湖越冬。越冬初期和末期是白鹤补充能量的关键阶段,因此,研究鄱阳湖国家级自然保护区越冬白鹤种群数量和当地气候变化的相关性具有重要意义。

彩图及图说提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@ 163.com

DOI: 10.5846/stxb201308172097

申家朋, 张文辉. 黄土丘陵区退耕还林地刺槐人工林碳储量及分配规律. 生态学报, 2014, 34(10): 2746-2754.

Shen J P, Zhang W H. Characteristics of carbon storage and sequestration of *Robinia pseudoacacia* forest land converted by farmland in the Hilly Loess Plateau Region. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(10): 2746-2754.

黄土丘陵区退耕还林地刺槐人工林碳储量及分配规律

申家朋, 张文辉*

(西北农林科技大学西部环境与生态教育部重点实验室, 杨凌 712100)

摘要: 采用样地调查与生物量实测方法, 研究了甘肃黄土丘陵区不同坡向(阳坡、阴坡)和退耕年限(退耕 5a、8a 和 11a)刺槐人工林乔木不同器官、灌草层、枯落物层和土壤层的碳含量, 以及刺槐人工林乔木层、灌草层、枯落物层和土壤层碳储量及其分配特征。结果表明: 刺槐不同器官碳含量均值变化范围为 43.02%—50.89%, 从高到低排列顺序为树干>细枝>中枝>粗枝>叶>根桩>大根>粗根>小根>中根>树皮>细根; 灌木层碳含量为 35.76%—42.74%; 草本层碳含量为 35.83%—43.64%; 枯落物层碳含量为 39.55%—41.77%; 土壤层(0—100 cm)碳含量均值变化范围 0.22%—0.99%, 随退耕年限增加而增大, 土壤深度的增加而逐渐下降。刺槐人工林生态系统碳库空间分布序列为土壤层(0—100 cm)>植被层>枯落物层。阳坡和阴坡退耕 5a、8a、11a 刺槐林生态系统碳储量分别为 52.52、58.93、73.72 t/hm² 和 49.95、61.83、79.03 t/hm²。退耕年限和坡向是影响刺槐人工林碳储量增加的主要因素。刺槐人工林具有良好的固碳效益, 是黄土丘陵区的理想树种。

关键词: 黄土丘陵区; 退耕还林; 刺槐人工林; 碳储量; 碳分配

Characteristics of carbon storage and sequestration of *Robinia pseudoacacia* forest land converted by farmland in the Hilly Loess Plateau Region

SHEN Jiapeng, ZHANG Wenhui*

Key Laboratory of Environment and Ecology of Education Ministry in West China, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China

Abstract: The Grain for Green Project have played an important role in preventing soil erosion and restoring the regional ecological environment in the hilly Loess Plateau region, meanwhile it is important to research biomass and carbon pool of forest ecosystems. There is the close relationship between forest biomass and fixed carbon of forest ecosystems. *Robinia pseudoacacia* is a typical tree species for the Grain for Green Project in the hilly Loess Plateau region in Gansu Province. The amount of biomass directly affected the function of fixed carbon of *Robinia pseudoacacia* plantations ecosystems, so the plot investigation and biomass measurement were carried out in the *Robinia pseudoacacia* plantations afforested in three periods (5 years, 8 years and 11 years) and two slopes(sunny and shady slope). In different plot of *Robinia pseudoacacia* plantations, we investigated carbon content, carbon storage and allocation of the different tree organs, shrub layers, grass layers, litter layers and soil layers, respectively. The results showed that the average carbon content in different organs of *Robinia pseudoacacia* ranged from 43.02% to 50.89% and decreased in the order stem>fine—branch>medium—branch>thick—branch>leaf>stump>large—root>thick—root>small—root>medium—root>bark>fine—root. The average carbon content ranged from 35.76% to 42.74%, ranged from 35.83% to 43.64%, ranged from 39.55% to 41.77% in shrub, grass and litter layers, respectively. The average carbon in the soil layer (0—100cm) ranged from 0.22% to 0.99% and increased with conversion years but gradually decreased with the increase of soil depth. Carbon stocks in the different components of

基金项目: 中国科学院战略先导科技专项资助(XDA05060300)

收稿日期: 2013-08-17; 网络出版日期: 2014-02-20

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zwhckh@163.com

the studied forest ecosystems were in an order as: soil>vegetation>litter. Carbon storage on the sunny and shady slope of 5—, 8—and 11—year plantations followed as: the ecosystem was 52.52 t/hm², 58.93 t/hm², 73.72 t/hm² and 49.95 t/hm², 61.83 t/hm², 79.03 t/hm². And the soil layer (0—100cm depth) was the largest carbon storage compont, which stored 39.5 t/hm², 42.08 t/hm², 49.68 t/hm² and 35.61 t/hm², 44.31 t/hm², 52.64 t/hm². And the vegetation layer component stored 12.88 t/hm², 17.29 t/hm², 24.69 t/hm² and 14.72 t/hm², 18.10 t/hm², 27.30 t/hm². And the tree layer stored 12.56 t/hm², 16.85 t/hm², 24.04 t/hm² and 14.34 t/hm², 17.52 t/hm², 26.39 t/hm². Of the tree layer, the stem was the highest carbon storage organ. The annual net primary productivity of sunny and shady slope were estimated to be 5.21 t·hm⁻²·a⁻¹ and 6.57 t·hm⁻²·a⁻¹ in the 5 years *Robinia pseudoacacia* plantation, and annual carbon storage were 2.54 t·hm⁻²·a⁻¹ and 3.10 t·hm⁻²·a⁻¹. Slop aspect and restoration years were the important factors affecting the carbon stock in *Robinia pseudoacacia* plantations. It was considered that *Robinia pseudoacacia* had a good carbon sequestration function, being able to be an ideal tree species in the hilly Loess Plateau of Gansu Province. And it may contributed to proper selection of *Robinia pseudoacacia* forest efficient management of young forest, offering great potential for future carbon sequestration, especially in the hilly Loess Plateau.

Key Words: hilly Loess Plateau; conversion of cropland to forest; *Robinia pseudoacacia* plantation; carbon storage; carbon allocation

退耕还林效果不仅体现在植物覆盖提高以及其他社会、经济和生态效益^[1-2],还体现在对大气 CO₂ 的固定。黄土丘陵地区 1999 年退耕还林还草工程以来,退耕地究竟发挥了多大的固碳增汇效益,分析主要人工林植被、枯落物及土壤固碳效益,是目前研究的重要问题。刺槐适应性强,是黄土丘陵区主要的退耕还林树种,对于维持水土和生态防护,发挥了重要的作用。研究刺槐林碳储量及其分布,对综合评价刺槐林生态效益十分必要。

目前有关刺槐人工林生态系统碳储量的研究较多^[3-6]。但黄土沟壑区地理环境复杂,区域间差异性较大,专门研究退耕还林还草工程以来不同退耕年限和不同坡向刺槐林的碳储量相对地少,而退耕还林生态系统的碳储量是评价退耕还林还草工程综合效益的重要指标之一。

甘肃黄土高原主要范围在陇东高原,该区域退耕还林任务主要完成于 2001—2007 年。本文以甘肃黄土丘陵区庆阳市合水县退耕 5a(2007 年造林)、8a(2004 年造林)和 11a(2001 年造林)的人工刺槐林为对象,在阴坡和阳坡分别设置标准样地,研究其生物量和碳含量,分析刺槐林的碳储量及其分配规律。为准确估算甘肃省黄土丘陵区刺槐林碳效益提供基础数据,同时也为综合评价退耕还林还草工程总体效益提供科学依据。

1 研究区域概况与方法

1.1 区域自然概况

甘肃省庆阳市合水县位于东经 107°51′—108°42′,北纬 35°38′—36°26′之间,本区属于典型的黄土丘陵沟壑地形,黄土厚度为 50—100 m。海拔高度为 1100—1500 m,年平均温度为 7.4℃,年降水量 587.6 mm,属于暖温带半干旱气候,土壤为黄绵土。

甘肃省从 1999 年开展退耕还林到 2010 年基本结束,该试验于 2012 年 8 月在合水县进行。刺槐林为人工林,结合当地退耕植树造林记录和计数样芯的年轮确定标准地刺槐林龄,选择退耕 5a、8a 和 11a 营造的林地,3 种退耕年限的刺槐人工林造林前均是坡耕地,并采用相同的造林方式,采用 1 年生实生苗木,林地株行距为 1.5 m×2 m,造林成活率 80%以上。林下灌木主要有达乌里胡枝子(*Lespedeza dahurica*)、酸枣(*Crataegus hupehensis*)、悬钩子(*Rubus corchorifolius*);草本主要有艾蒿(*Artemisia argyi*)、茭蒿(*Artemisia giraldii*)、铁杆蒿(*Artemisia gemlinii*)、长芒草(*Stipa bungeana*)、披针苔草(*Carex lanceolata*)、铁线莲(*Clematis fruticosa*)等。

1.2 研究方法

在选择退耕 5a、8a 和 11a 的刺槐人工林中,按照林地立地条件相似的原则,每个退耕年限在阴坡和阳坡分别设置 3 个标准样地(20 m×20 m),共设

置 18 个标准地,各样地林分特征见表 1。对标准地内林分进行每木检尺,测定胸径,确定标准木,共选

择 18 株标准木。

表 1 不同生境及退耕年限刺槐人工林的林分特征

Table 1 Forest characters of *Robinia pseudoacacia* plantations in different habitats and restoration years (Mean $\pm$ Standard Deviation)

项目 Items	海拔 Altitude/m	平均胸径 Average DBH/cm	平均树高 Average tree Height/m	乔木密度 Density/ (株/hm ²)	郁闭度 Canopy density Restoration years/slope
5a 阳坡 5-year sunny slope	1132.43 $\pm$ 9.10	5.12 $\pm$ 0.21	5.23 $\pm$ 0.24	2947 $\pm$ 21	0.62 $\pm$ 0.03
5a 阴坡 5-year shady slope	1235.73 $\pm$ 20.42	5.33 $\pm$ 0.19	6.33 $\pm$ 0.54	2898 $\pm$ 53	0.65 $\pm$ 0.06
8a 阳坡 8-year sunny slope	1249.17 $\pm$ 16.50	5.48 $\pm$ 0.36	8.07 $\pm$ 1.09	2775 $\pm$ 75	0.73 $\pm$ 0.04
8a 阴坡 8-year shady slope	1174.20 $\pm$ 24.29	6.07 $\pm$ 0.14	8.16 $\pm$ 0.29	2607 $\pm$ 90	0.77 $\pm$ 0.05
11a 阳坡 11-year sunny slope	1236.10 $\pm$ 26.31	7.41 $\pm$ 0.17	10.03 $\pm$ 0.15	2511 $\pm$ 46	0.81 $\pm$ 0.04
11a 阴坡 11-year shady slope	1235.13 $\pm$ 32.68	8.24 $\pm$ 1.30	10.59 $\pm$ 0.63	2603 $\pm$ 23	0.83 $\pm$ 0.06

1.2.1 刺槐标准木个体生物量测定

将标准木伐倒,测量树高、胸径、树冠的直径,采用 Monsie 分层切割法,树干按每段 1m 进行区分,分段测定鲜重质量;树冠被分成树叶和树枝,分别测定树叶和树种的鲜重,树枝按基部直径大小分为细枝(<1 cm),中枝(1—2 cm),粗枝(>2 cm);地下根系部分采用全挖法,将不同根系分为细根(根径<0.2 cm)、小根(根径 0.2—0.5 cm)、中根(根径 0.5—1.0 cm)、大根(根径 1.0—2.0 cm)、粗根(根径>2.0 cm)和根桩 6 类^[7],实测鲜重量。将所有实测鲜重质量样品取样(树干每段截取 5 cm 圆盘),带回实验室进行含水量测定并计算干质量。

1.2.2 灌木、草本及枯落物生物量

在每个样地沿对角线方向设置 3 个 5 m $\times$ 5 m 的样方,记录小样方内所有灌木的多度、盖度、高度、根径;在标准地设置 5 个 1 m $\times$ 1 m 样方,记录草本多度、高度、盖度。林下灌草采用全挖法,灌木分叶、茎和根 3 部分称量鲜重,草本分地上鲜重和地下鲜重,灌木和草本分别取样。枯落物量的测定采用全部收获法,设置 5 个 1 m $\times$ 1 m 样方,将每个枯落物样方内的枯落物全部收集,称鲜重并取样带回实验室。所有取样样品置于 85 $^{\circ}$ C 烘箱中至恒重,测定各部分鲜重含水量。

1.2.3 样品采集及含碳量的测定

测定生物量的同时,采集乔木不同器官、灌木、草本和枯落物样品,经烘干、粉碎、过筛,测定其有机碳含量。

在每个样地中,沿对角线方向设置 5 个土壤采样点,沿土壤剖面按 0—10 cm, 10—20 cm, 20—

30 cm, 30—50 cm, 50—100 cm 分 5 层采集土壤样品,把同样地同一层次土壤样品按质量比混合,带回实验室自然风干,粉碎过筛并测定有机碳含量。用环刀(100 cm³) 在每层取土,测定土壤容重。

所有植物和土壤样品均采用元素分析仪 LiquiTOC II (德国生产) 分析测定有机碳含量。

1.2.4 刺槐人工林碳储量和年净固碳量的计算

根据乔木、灌木、草本、枯落物单位面积干物质(生物量) 分别乘以每部分不同器官碳含量而得到不同组分碳储量^[8]。土壤碳储量计算参考程先富^[9] 的方法,略作修改:

$$T = 0.1 \times \sum C_i \times B_i \times D_i \quad (1)$$

式中, T 为土壤有机碳密度(t/hm²); i 为土层数, B_i 为土壤容重(g/cm³); C_i 为不同土层土壤有机碳的含量(g/kg); D_i 为不同土层的厚度(cm)。

本文采用年平均净生产量作为生产力估测指标^[10],刺槐林年净固碳量由各组分年平均生物量及相应的碳含量乘积计算得到。结合实际作业,采用建立刺槐各组分生物量与胸径、树高的生长方程(表 2),方程的形式为^[11-13]:

$$\lg W = a + b \times \lg(D^2 H) \quad (2)$$

式中, W 为各组分生物量(kg); D 为胸径(cm); H 为树高(m); a 、 b 为系数。

1.3 数据处理

所有数据经过 Excel 软件处理后,用 SPSS13.0 软件进行统计分析,采用单因素方差分析(one-way ANOVA)、双因素方差分析(two-way ANOVA) 和 Duncan 检验比较参数间差异($P < 0.05$)

表 2 刺槐各器官生物量(*W*)与胸径(*D*)、树高(*H*)的相对生长方程
Table 2 Organ biomass (*W*) allometric equations of diameter at breast height (*D*) and height (*H*) of *Robinia pseudoacacia*

组分 Component	生长方程 Allometric equation	<i>R</i> ²
树干 Stem	$\lg W = -0.269 + 0.406 \lg(D^2 H)$	0.982
树枝 Branch	$\lg W = -0.187 + 0.285 \lg(D^2 H)$	0.838
树叶 Leaf	$\lg W = -1.370 + 0.478 \lg(D^2 H)$	0.837
树根 Root	$\lg W = -0.637 + 0.472 \lg(D^2 H)$	0.889
树皮 Bark	$\lg W = -1.908 + 0.687 \lg(D^2 H)$	0.986

W:生物量(kg); *D*:胸径(cm); *H*:树高(m)

2 结果与分析

2.1 不同退耕年限林分各层碳含量

2.1.1 刺槐林乔木层各器官碳含量

通过对不同退耕年限不同坡向刺槐林乔木各器官碳含量分析,不同退耕年限和坡向刺槐各器官碳含量在 43.02%—50.89%,退耕年限和坡向对刺槐林

器官碳含量无显著影响。阳坡刺槐林各器官碳含量表现为:退耕 5a、8a 和 11a 分别为 46.24%、46.32%、46.75%;阴坡刺槐林各器官碳含量表现为:46.29%、46.76%、46.93%,不同器官碳含量平均值存在显著差异,按碳含量高低排列顺序为树干>细枝>中枝>粗枝>叶>根桩>大根>粗根>小根>中根>树皮>细根(表 3)。

2.1.2 林下植被和枯落物层

退耕年限和坡向对枯落物、草本和灌木碳含量均无显著影响(表 4),其平均碳含量分别为:枯落物层 40.74%;草本层地上部分和地下部分为 40.05%、36.93%;灌木层叶、枝和根分别为 41.18%、38.96%和 38.64%。灌木层平均碳含量高于草本层,且均为地上部分高于地下部分。枯落物层和灌草层之间碳含量平均含量存在差异($P<0.05$),灌木叶>枯落物层>草地上>灌木茎>灌木根>草地下。

表 3 不同退耕年限刺槐人工林各器官碳含量

Table 3 Carbon contents of different organs of <i>Robinia pseudoacacia</i> with different restoration years(%, Mean $\pm$ Standard Deviation, $n=3$)							
组分 Component	退耕 5a 5-year restoration		退耕 8a 8-year restoration		退耕 11a 11-year restoration		平均 Mean
	阳坡 Sunny	阴坡 Shady	阳坡 Sunny	阴坡 Shady	阳坡 Sunny	阴坡 Shady	
树干 Stem	49.41 $\pm$ 0.78	48.71 $\pm$ 1.23	48.67 $\pm$ 1.62	48.74 $\pm$ 0.62	50.14 $\pm$ 0.83	49.26 $\pm$ 0.89	49.15 $\pm$ 1.03a
细枝 Fine-Branch	47.18 $\pm$ 1.10	47.42 $\pm$ 1.56	47.17 $\pm$ 1.75	47.58 $\pm$ 1.40	48.87 $\pm$ 1.61	48.67 $\pm$ 1.57	47.82 $\pm$ 1.46b
中枝 Medium-Branch	46.82 $\pm$ 1.45	46.88 $\pm$ 1.74	48.39 $\pm$ 1.59	48.80 $\pm$ 1.50	48.01 $\pm$ 1.10	47.73 $\pm$ 2.26	47.77 $\pm$ 1.57b
粗枝 Thick-Branch	46.28 $\pm$ 1.20	46.47 $\pm$ 1.38	47.31 $\pm$ 1.01	47.37 $\pm$ 1.57	45.70 $\pm$ 1.26	49.06 $\pm$ 1.07	47.03 $\pm$ 1.53c
叶 Leaf	46.06 $\pm$ 1.16	46.35 $\pm$ 1.50	45.13 $\pm$ 1.74	46.68 $\pm$ 1.35	46.90 $\pm$ 0.97	46.06 $\pm$ 2.04	46.20 $\pm$ 1.39d
细根 Fine-root	45.20 $\pm$ 0.77	45.20 $\pm$ 0.81	45.05 $\pm$ 1.05	45.65 $\pm$ 1.19	45.58 $\pm$ 0.99	46.31 $\pm$ 0.56	45.50 $\pm$ 0.89d
小根 Small-root	45.92 $\pm$ 0.72	45.63 $\pm$ 0.53	45.43 $\pm$ 0.35	46.12 $\pm$ 0.06	46.30 $\pm$ 0.44	45.68 $\pm$ 0.60	45.85 $\pm$ 0.52d
中根 Medium-root	44.46 $\pm$ 1.56	45.68 $\pm$ 1.50	45.92 $\pm$ 1.00	45.96 $\pm$ 0.80	45.84 $\pm$ 1.47	46.07 $\pm$ 0.79	45.65 $\pm$ 1.18d
大根 Large-root	46.11 $\pm$ 0.28	45.98 $\pm$ 0.93	45.56 $\pm$ 0.27	46.05 $\pm$ 0.11	45.98 $\pm$ 0.09	46.08 $\pm$ 0.21	45.96 $\pm$ 0.40d
粗根 Thick-root	45.87 $\pm$ 0.08	45.67 $\pm$ 0.25	45.77 $\pm$ 0.42	46.16 $\pm$ 0.21	45.64 $\pm$ 1.15	46.37 $\pm$ 0.49	45.91 $\pm$ 0.54d
根桩 Stump	45.98 $\pm$ 0.16	45.92 $\pm$ 1.47	46.10 $\pm$ 0.95	46.74 $\pm$ 0.30	46.34 $\pm$ 0.65	46.10 $\pm$ 1.56	46.20 $\pm$ 0.89d
树皮 Bark	45.57 $\pm$ 0.45	45.62 $\pm$ 0.24	45.32 $\pm$ 0.61	45.12 $\pm$ 0.17	45.79 $\pm$ 0.36	45.81 $\pm$ 0.34	45.54 $\pm$ 0.41d

不同小写字母表示各器官碳含量差异显著($P<0.05$)

2.1.3 土壤层

土壤碳含量均表现为从上层到下层依次降低(表 4),0—10 cm、10—20 cm 土层碳含量明显大于 20—30 cm、30—50 cm 和 50—100 cm,且差异显著;0—10 cm 和 10—20 cm 阴坡土壤碳含量大于阳坡土壤碳含量,20—30 cm、30—50 cm 和 50—100 cm 阴坡土层和阳坡土层碳含量总体差异不显著。不同退

耕年限对土壤碳含量的影响表现为:阳坡各层土壤碳含量随着退耕年限增加而增加,增幅为 9.98%—34.23%,且 0—10 cm、10—20 cm 增加幅度最明显;阴坡各层土壤随退耕年限增加,碳含量增加,增加幅度为 11.8%—58.90%,0—10 cm、10—20 cm 增加幅度最明显。

表 4 不同退耕年限刺槐人工林林下植被层、枯落物层及土壤层碳含量

Table 4 Carbon contents of litter layer, herb layer, shrub layer and soil layer of *Robinia pseudoacacia* with different restoration years (Mean $\pm$ Standard Deviation, $n=3$)

层次 Layer	组分 Component	退耕 5a 5-year restoration		退耕 8a 8-year restoration		退耕 11a 11-year restoration	
		阳坡 Sunny	阴坡 Shady	阳坡 Sunny	阴坡 Shady	阳坡 Sunny	阴坡 Shady
枯落物层 litter/%		41.77 $\pm$ 1.10	41.41 $\pm$ 1.02	39.55 $\pm$ 1.19	41.15 $\pm$ 1.87	39.61 $\pm$ 1.09	40.95 $\pm$ 0.98
草本层/%	地上部分 Aboveground	43.64 $\pm$ 0.79	40.75 $\pm$ 1.48	38.44 $\pm$ 0.73	39.37 $\pm$ 1.38	39.06 $\pm$ 1.00	39.04 $\pm$ 0.83
Herb Layer	地下部分 Underground	35.83 $\pm$ 0.88	36.37 $\pm$ 0.97	36.02 $\pm$ 2.57	38.36 $\pm$ 0.61	38.82 $\pm$ 1.93	39.21 $\pm$ 0.93
灌木层/%	叶 Leaf	42.74 $\pm$ 0.91	42.08 $\pm$ 0.22	38.08 $\pm$ 0.82	42.35 $\pm$ 0.63	41.88 $\pm$ 0.86	39.98 $\pm$ 0.80
Shrub Layer	茎 Stem	36.59 $\pm$ 0.55	39.18 $\pm$ 0.22	41.49 $\pm$ 1.39	38.39 $\pm$ 1.62	39.08 $\pm$ 0.60	39.05 $\pm$ 1.50
	根 Root	35.76 $\pm$ 0.63	36.90 $\pm$ 1.12	38.53 $\pm$ 0.70	41.38 $\pm$ 0.96	40.05 $\pm$ 0.75	39.19 $\pm$ 1.22
土壤层/%	0—10cm	0.66 $\pm$ 0.01Aa	0.70 $\pm$ 0.01Ba	0.88 $\pm$ 0.02Aa	0.92 $\pm$ 0.01Ba	0.89 $\pm$ 0.02Aa	0.99 $\pm$ 0.02Ba
Soil Layer	10—20 cm	0.36 $\pm$ 0.02Ab	0.36 $\pm$ 0.01Ab	0.40 $\pm$ 0.02Ab	0.53 $\pm$ 0.02Bb	0.45 $\pm$ 0.01Ab	0.58 $\pm$ 0.02Bb
	20—30 cm	0.23 $\pm$ 0.01Ac	0.24 $\pm$ 0.02Ac	0.26 $\pm$ 0.01Ac	0.27 $\pm$ 0.01Ac	0.27 $\pm$ 0.02Ac	0.29 $\pm$ 0.01Bc
	30—50 cm	0.22 $\pm$ 0.02Ad	0.23 $\pm$ 0.02Ad	0.23 $\pm$ 0.01Ad	0.24 $\pm$ 0.02Ad	0.25 $\pm$ 0.02Ad	0.25 $\pm$ 0.01Ad
	50—100 cm	0.22 $\pm$ 0.01Ad	0.22 $\pm$ 0.01Ad	0.23 $\pm$ 0.01Ad	0.23 $\pm$ 0.01Ad	0.24 $\pm$ 0.01Ad	0.25 $\pm$ 0.01Ad

不同大写字母表示同一退耕年限不同坡向间差异显著,不同小写字母表示同一退耕年限不同组分间差异显著 ($P<0.05$)

2.2 不同退耕年限刺槐人工林林分各层碳储量及其分配规律

2.2.1 植被层

阳坡退耕 5a、8a 和 11a 刺槐林乔木层碳储量分别为 12.56、16.85 t/hm^2 和 24.04 t/hm^2 , 其中, 树干的碳储量最高, 分别占整个乔木层的 42.83%、41.24 和 39.72%。林下植被中, 草本层碳储量为 0.25、0.33、0.42 t/hm^2 ; 灌木层碳储量为 0.07、0.11、0.23 t/hm^2 , 林下灌草以退耕 11a 最大。阴坡退耕 5a、8a 和 11a 刺槐林乔木层碳储量分别为 14.34、17.52 和 26.39 t/hm^2 , 其中树干的碳储量最高, 分别占整个乔木层的 42.81%、45.20% 和 43.01%。林下植被中, 草本层碳储量为 0.28、0.40、0.54 t/hm^2 ; 灌木层碳储量为 0.10、0.18、0.37 t/hm^2 , 林下灌草以退耕 11 年最大。(图 1, 图 2)

2.2.2 枯落物层和土壤层

阳坡退耕 5a、8a 和 11a 刺槐林枯落物碳储量分别为 0.19、0.26、0.49 t/hm^2 。刺槐林 0—100 cm 土壤的碳储量分别为 39.45、41.38 t/hm^2 和 48.54 t/hm^2 , 随着退耕年限的增大而增大, 其中 0—10 cm 和 50—100 cm 土壤碳储量明显高于其他土层, 分别占整个土壤碳库的 21.54%、27.09%、24.54% 和 41.39%、36.93%、37.97%。阴坡退耕 5a、8a 和 11a 刺槐林枯落物碳储量分别为 0.21、0.28、0.61 t/hm^2 。刺槐林 0—100 cm 土壤的碳储量分别为 35.02、43.45 t/hm^2 和 51.12 t/hm^2 , 随着退耕年限的增大而增大, 其中 0—10 cm 和 50—100 cm 土壤碳储量明显高于其他土层, 分别占整个土壤碳库的 22.04%、26.51%、25.67% 和 40.61%、35.49%、37.05% (图 1, 图 2)。

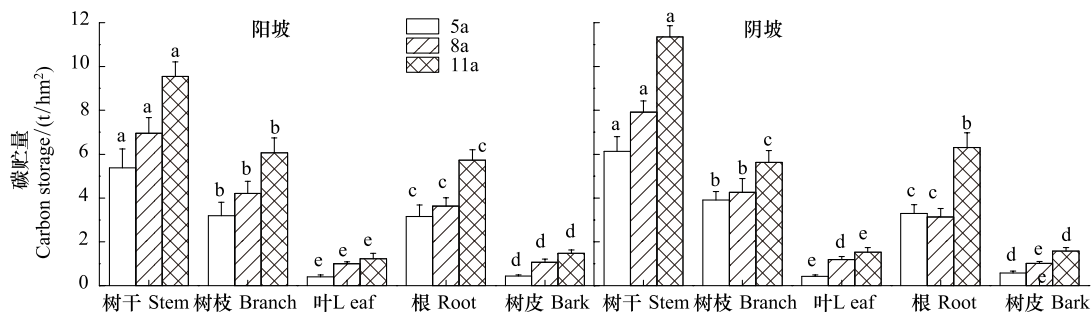


图 1 不同退耕年限刺槐林各器官碳储量

Fig.1 Carbon storage of the main carbon pools in *Robinia pseudoacacia* with different restoration years

数据为平均值 $\pm$ 标准差; 不同字母代表数据在同一退耕年限下不同器官间差异显著 ($P<0.05$)

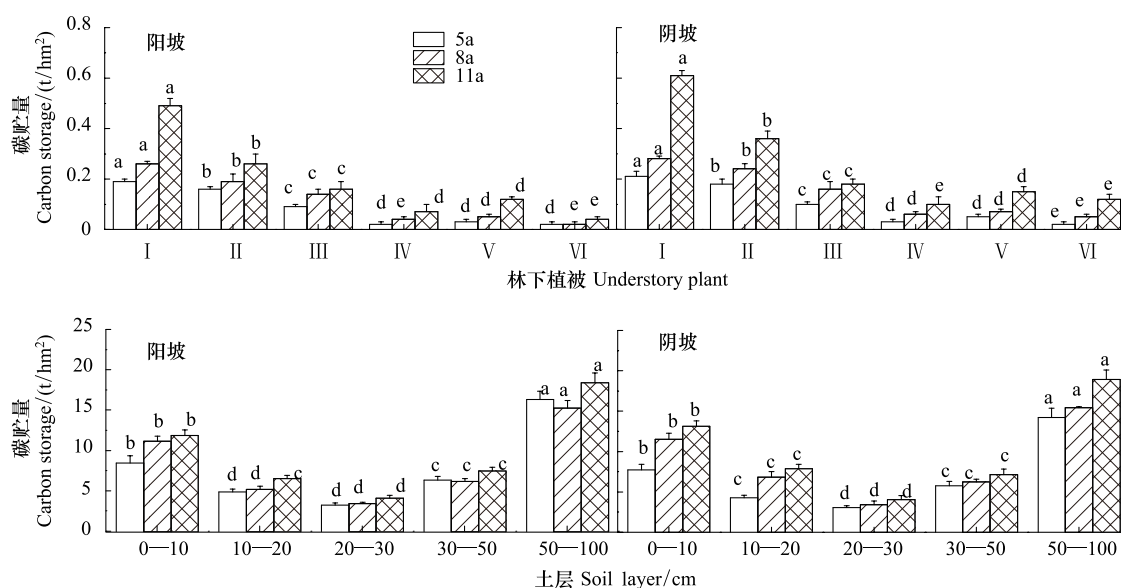


图2 刺槐林林下植被层、枯落物层、土壤碳储量

Fig.2 Carbon storage of understory plants, litter and soil layers in *Robinia pseudoacacia* plantations

数据为平均值±标准差;不同字母代表数据在同一退耕年限下不同层次间差异显著($P<0.05$);I:枯落物层 Shrub layer;II:草本层地上部分 Herb layer aboveground;III:草本层地下部分 Herb layer underground;IV:灌木层叶 Shrub layer leaf;V:灌木层干 Shrub layer stem;VI:灌木层根 Shrub layer root

2.2.3 人工林生态系统

阳坡退耕 5a、8a 和 11a 刺槐林生态系统总碳储量分别为 52.52、58.93 t/hm^2 和 73.72 t/hm^2 ,退耕 5a 和 8a 分配格局为土壤层>乔木层>草本层>枯落物层>灌木层,退耕 11a 分配格局为土壤层>乔木层>枯落物层>草本层>灌木层。其中,土壤层占整个人工林总碳库的比例分别为 75.10%、70.22% 和 65.84%,乔木层为 23.92%、28.59% 和 32.61%,枯落物层为 0.36%、0.44% 和 0.66%,草本层为 0.48%、0.56% 和 0.57%,灌木层为 0.13%、0.19% 和 0.31%。阴坡退

耕 5a、8a 和 11a 刺槐林总碳储量分别为 49.95、61.83 t/hm^2 和 79.03 t/hm^2 ,退耕 5a 和 8a 分配格局为土壤层>乔木层>草本层>枯落物层>灌木层,退耕 11 年分配格局为土壤层>乔木层>枯落物层>草本层>灌木层。其中,土壤层占整个人工林总碳库的比例分别为 70.11%、70.27% 和 64.68%,乔木层为 28.71%、28.34% 和 33.39%,枯落物层为 0.42%、0.45% 和 0.77%,草本层为 0.56%、0.65% 和 0.68%,灌木层为 0.20%、0.29% 和 0.47%(图 3)。

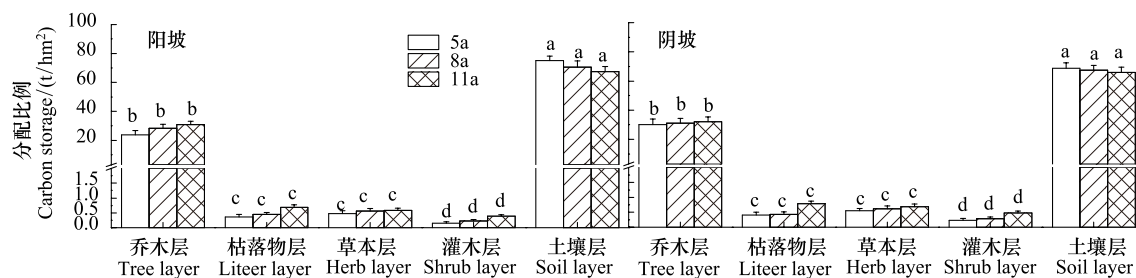


图3 刺槐林各层碳储量分配

Fig.3 Carbon allocation of different layers in *Robinia pseudoacacia* plantations

数据为平均值±标准差;不同字母代表数据在同一退耕年限下不同层次间差异显著($P<0.05$)

总体看来,相同退耕年限下,乔木层、枯落物层、草本层和灌木层碳储量均表现为阴坡>阳坡,土壤层碳储量退耕 5a 阴坡<阳坡,退耕 8a 和 11a 均为阴坡

<阳坡。无论阴坡还是阳坡,植被层和土壤层是刺槐林的主要碳库,且退耕 5a、8a 和 11a 刺槐林植被层、枯落物层和土壤层的碳储量的分配比例基本一致,

都以土壤层最大,植被层次之,枯落物层最小,随着退耕年限增加,刺槐林总体碳储量均呈现增加趋势,且退耕 11a>8a>5a。

2.3 刺槐人工林年净固碳量的初步估算

由不同组分年净生产力及其相应组分的碳含量得到有机碳年净固碳量,如表 5 和表 6 所示,阳坡和

阴坡的年净生产力及年净固碳量变化规律基本一致,均以退耕 5a 最高,分别为 $5.21\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 、 $2.54\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 $6.57\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 、 $3.10\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,表明在退耕 5 年时年净固碳量最大,之后仍保持较高的固碳能力。阳坡年净生产力<阴坡,阳坡年净固碳量<阴坡,说明阴坡刺槐林碳固定能力较高。

表 5 阳坡刺槐人工林年净固碳量

Table 5 Annual net carbon sequestration in *Robinia pseudoacacia* plantations in sunny slope (Mean $\pm$ Standard Deviation, $n=3$)

组分 Component	退耕 5a 5-year restoration		退耕 8a 8-year restoration		退耕 11a 11-year restoration	
	年净生产力 Annual net productivity/ ($\text{t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$)	年净固碳量 Annual net carbon storage/ ($\text{t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$)	年净生产力 Annual net productivity/ ($\text{t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$)	年净固碳量 Annual net carbon storage/ ($\text{t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$)	年净生产力 Annual net productivity/ ($\text{t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$)	年净固碳量 Annual net carbon storage/ ($\text{t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$)
乔木层 Tree layer	5.12 ± 0.48	2.50 ± 0.22	4.37 ± 0.29	2.08 ± 0.14	4.22 ± 0.25	2.03 ± 0.11
年枯落物 Annual litter	0.09 ± 0.02	0.03 ± 0.01	0.08 ± 0.02	0.03 ± 0.01	0.10 ± 0.03	0.04 ± 0.01
合计 Sum	5.21 ± 0.50	2.54 ± 0.22	4.45 ± 0.31	2.12 ± 0.14	4.32 ± 0.28	2.07 ± 0.13

表 6 阴坡刺槐人工林年净固碳量估算

Table 6 Annual net carbon sequestration in *Robinia pseudoacacia* plantations in shady slope (Mean $\pm$ Standard Deviation, $n=3$)

组分 Component	退耕 5a 5-year restoration		退耕 8a 8-year restoration		退耕 11a 11-year restoration	
	年净生产力 Annual net productivity/ ($\text{t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$)	年净固碳量 Annual net carbon storage/ ($\text{t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$)	年净生产力 Annual net productivity/ ($\text{t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$)	年净固碳量 Annual net carbon storage/ ($\text{t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$)	年净生产力 Annual net productivity/ ($\text{t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$)	年净固碳量 Annual net carbon storage/ ($\text{t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$)
乔木层 Tree layer	6.47 ± 0.39	3.06 ± 0.18	5.15 ± 0.37	2.50 ± 0.16	4.72 ± 0.27	2.26 ± 0.12
年枯落物 Annual litter	0.10 ± 0.02	0.042 ± 0.01	0.07 ± 0.02	0.04 ± 0.01	0.12 ± 0.03	0.06 ± 0.01
合计 Sum	6.57 ± 0.41	3.10 ± 0.19	5.23 ± 0.38	2.54 ± 0.17	4.84 ± 0.30	2.31 ± 0.13

3 讨论

3.1 碳含量

森林生态系统碳含量因森林类型和年龄存在差异^[14],本研究中退耕年限和坡向对植被层碳含量影响不明显,但乔木层不同器官碳含量存在显著差异,变化幅度为 43.02%—50.89%,与陕西黄土高原地区刺槐碳含量基本一致^[4];草本层碳含量在 35.83%—43.64%,灌木层碳含量变化范围在 35.76%—42.74%;植被层平均碳含量大小顺序为乔木>灌木>草本植物,乔木比林下植被能合成和积累更多的有机质^[15]。

枯落物的碳含量受枯落物类型和分解速率影响^[16],刺槐林枯落物平均碳含量低于油松林下枯落物碳含量^[17],主要因为刺槐林枯落有机碳的分解速率较比针叶林枯落物快,碳积累较少^[18]。土壤碳含量受造林年限^[19-20]和地表枯落物^[21]影响,本研究

中,表层土壤 0—20 cm 碳含量受坡向影响显著,且随着退耕年限增加而增幅明显,与前人研究结果一致^[22-23]。土壤 20—100 cm 碳含量受坡向及退耕年限影响不显著,随着土壤深度的增加,碳含量变化差异不显著。

3.2 碳储量和年净固碳量

退耕 8a 阳坡和阴坡乔木层碳储量分别为 16.85 t/hm^2 和 17.52 t/hm^2 ,高于陕西千阳 8 年生刺槐乔木层碳储量 (16.42 t/hm^2)^[4],低于陕西安塞刺槐乔木层碳储量 (25.08 t/hm^2)^[6]。随着退耕年限增加,植被层碳储量依次增加,以退耕 11a 最大,低于我国森林植被平均碳储量 (57.07 t/hm^2)^[16]。森林土壤碳储量是森林生态系统重要组成部分,在平衡温室效应中发挥重要作用^[24]。本研究中,阳坡和阴坡土壤层碳储量随着退耕年限增加而增加,以退耕 11a 刺槐林土壤碳储量最大,分别为 48.54 、 51.12 t/hm^2 ,低于我国森林土壤平均碳储量 (193.55 t/hm^2)^[16]。

阳坡、阴坡刺槐林生态系统碳储量随着退耕年限增加呈增大趋势,以退耕 11a 最大,分别为 73.72、79.03 t/hm^2 , 低于我国森林生态系统平均碳储量 ($258.83 \text{ t}/\text{hm}^2$)^[16]。刺槐林生态系统碳储量主要有植被层、枯落物层和土壤层组成,其碳储量大小排序为:土壤层>植被层>枯落物层。本研究的分配格局与前人研究基本一致^[25-26]。枯落物层碳储量小于土壤层和植被层,但其对供给土壤层碳储量及其重要^[27]。因此,应当加强森林植被的保护,减少地表水土流失,以维持土壤层和生态系统较高的碳储量。

森林生态系统同化 CO_2 的能力是其生产力研究的主要内容之一,阳坡和阴坡的年净生产力及年净固碳量均以退耕 5a 最高,分别为 5.21、2.54 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 6.57、3.10 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 低于福建中亚热带 7 年生杉木林 ($3.70 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)^[28] 和湖南会同 11 年生杉木有机碳年净固碳储量 ($3.49 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)^[29]。表明不同地区和树种人工林年固碳能力存在一定的差异性。

4 结论

(1) 不同退耕年限和不同坡向的刺槐人工林乔木层相同器官碳含量均没有显著差异,说明退耕年限及坡向没有影响刺槐林乔木碳含量。乔木层不同器官碳含量存在显著差异,具体表现为:树干>细枝>中枝>粗枝>叶>根桩>大根>粗根>小根>中根>树皮>细根。刺槐林下植被层中,草本层地上部分碳含量高于地下部分,灌木层以叶碳含量最高。

(2) 0—20 cm 表层土壤碳含量受坡向影响显著,表现为阴坡>阳坡,20—100 cm 土壤层碳含量受坡向影响不显著。0—100 cm 土壤总碳储量退耕 5a 阳坡大于阴坡,退耕 8a 和 11a 阳坡小于阴坡,且随着土壤深度的增加,土壤有机碳含量呈现减小趋势。随着退耕年限的增加,阴坡和阳坡土壤碳含量呈增加趋势,且阴坡增加幅度大于阳坡。退耕年限和坡向是影响刺槐林土壤碳储量的主要因素。

(3) 随着退耕年限的增加,刺槐林乔木层碳储量增大,退耕 11a 为最大,阳坡与阴坡乔木层碳储量分别为 24.04 t/hm^2 和 26.39 t/hm^2 , 且阴坡>阳坡。乔木层中以树干碳储量比例最大。0—100cm 土壤层的碳储量在阳坡和阴坡也随着退耕年限的增加呈增加趋势,以退耕 11a 最大,分别为 49.68 t/hm^2 和 52.64 t/hm^2 。

(4) 退耕 5a、8a 和 11a 人工刺槐林生态系统碳储量分配格局均以土壤层碳储量最大,植被次之,枯落物层层最小。且不同坡向间其碳储量存在差异,总体表现为阴坡>阳坡。从持续发育的角度看,黄土高原阳坡和阴坡均适宜刺槐林发挥固碳效益,阴坡要优于阳坡。

References:

- [1] Uriv K, Tullus H, Lönhus K. Biomass production and nutrient accumulation in short-rotation grey alder (*Alnus incana* (L.) moench) plantation on abandoned agricultural land. *Forest Ecology and Management*, 2002, 161(1/3): 169-179.
- [2] Lai Y F, Zhu Q K. Assessment on the comprehensive benefits of converting farmland to forest project in loess hilly regions—a case study of Wuqi county, Shaanxi Province. *Journal of Northwest Forestry University*, 2009, 24(3): 219-223.
- [3] Zhang J Q, Su Y Q, Kang Y X, XU X M, Qin L. Carbon sequestration of young *Robinia pseudoacacia* plantation in Loess Plateau. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(12): 2911-2916.
- [4] Wang L, Zhang J Q, Wang X F, Su Y Q. Carbon sink in two young plantations in Loess Plateau. *Journal of Northeast Forestry University*, 2010, 38(7): 75-78.
- [5] He L, Su Y Q, Ji Z P, Xin Z L. Studies on the carbon storage and distributive character of Robinia and Pinus in Loess Plateau gull area. *Journal of Northwest Forestry University*, 2007, 22(4): 49-53.
- [6] Liu Y C, Wang Q F, Yu G R, Zhu X J, Zhan X Y, Guo Q, Yang H, Li S G, Hu Z M. Ecosystems carbon storage and carbon sequestration potential of two main tree species for the Grain for Green Project on China's hilly Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(15): 4277-4286.
- [7] Qin W M, He B, Wei S H, Cai S W, Tan Y H. Study on carbon storage and distribution of acacia crassicaarpa young plantation ecosystem. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2008, 36(32): 14089-14092.
- [8] Luo J, Yang Z, Yang Q W. A study on the biomass and production of forest on the Gongga Mountain. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000, 24(2): 22-26.
- [9] Cheng X F, Shi X Z, Yu D S, Fan X Z. Organic carbon pool of forest soil and its relationship to environment factors in Xingguo county of Jiangxi Province. *Geographical Research*, 2004, 23(2): 211-217.
- [10] Ye S M, Zheng X X, Yang M, Xie W D, Zhao L J, Liang H W. Biomass and productivity of stratified mixed stands of *Eucalyptus urophylla* and *Acacia mangium*. *Journal of Beijing Forestry University*, 2008, 30(3): 37-43.
- [11] Niklas K J. Plant Allometry: The Scaling of Form and Process. Chicago, Illinois: University of Chicago Press, 1994: 30-52.
- [12] Ter-Mikaelian M T, Korzukhin M D. Biomass equations for sixty-five North American tree species. *Forest Ecology and Management*, 1997, 97(1): 1-24.
- [13] Bi J, Huang Z Z, Wang Z L. Studies on biomass dynamic of black

- locust tree*. Journal of He bei Forestry College, 1993, 8 (4): 278-282.
- [14] He Y J, Qin L, Li Z Y, Liang X Y, Shao M X, Tan L. Carbon storage capacity of monoculture and mixed-species plantations in subtropical China. Forest Ecology and Management, 2013, 295: 193-198.
- [15] Cleveland C C, Townsend A R, Taylor P, Clare S A, Bustamante M M C, Chuyong G, Dobrowski S Z, Grierson P, Harms K E, Houlton B Z, Marklein A, Parton W, Porder S, Reed S C, Sierra C A, Silver W, Tanner E V J, Wieder W R. Relationships among net primary productivity, nutrients and climate in tropical rain forest: a pan-tropical analysis. Ecology Letters, 2011, 14(9), 1313-1317.
- [16] Zhou Y R, Yu Z L, Zhao S D. Carbon storage and budget of major Chinese forest types. Acta Phytocologica Sinica, 2000, 24(5): 518-522.
- [17] Cheng X Q, Han H R, Kang F F. Biomass, carbon accumulation and its partitioning of a *Pinus tabulaeformis* plantation ecosystem in Shanxi Province, China. Chinese Journal of Ecology, 2012, 31 (10): 2455-2460.
- [18] Huang J X, Huang L H, Lin Z C, Chen G S. Controlling factors of litter decomposition rate in China's forests. Journal of Subtropical Resources and Environment, 2010, 5(3): 56-63.
- [19] Parfitt R L, Percival H J, Dahlgren R A, Hill L F. Soil and solution chemistry under pasture and radiata pine in New Zealand. Plant and Soil, 1997, 191(2): 279-290.
- [20] Zinn Y L, Dimas V S, da Resck J E. Soil organic carbon affected by afforestation with Eucalyptus and Pinus in the Cerrado region of Brazil. Forest Ecology and Management, 2002, 166(1/3): 285-294.
- [21] Grigal D F, Berguson W E. Soil carbon changes associated with short rotation systems. Biomass and Bioenergy, 1998, 14 (4): 371-377.
- [22] Li Y H, Wang Y H, Yu P T, Xiong W, Hao J, Zhang X B, Xu L H. Soil organic carbon contents of *Larix principis-rupprechtii* Plantations in the Southern part of Liupan Mountain. Scientia Silvae Sinicae, 2012, 48(12): 1-9.
- [23] Wu Z X, Xie G S, Tao Z L, Zhou Z D, Wang X. Characteristics of soil carbon and total nitrogen contents of rubber plantations at different age stages in Danzhou, Hainan island. Ecology and Environmental Sciences, 2009, 18(4): 1484-1491.
- [24] Thompson J A, Kolka R K. Soil carbon storage estimation in a forested watershed using quantitative soil-landscape modeling. Soil Science Society of America Journal, 2005, 69(4): 1086-1093.
- [25] Tandel M B, Kukadia M U, Kulambe B N, Jadeja D B. Influence of tree cover on physical properties of soil. Indian Forester, 2009, 135 (3), 420-424.
- [26] Finér L, Mannerkoski H, Piirainen S, Starr M. Carbon and nitrogen pools in an old-growth Norway spruce mixed forest in eastern Finland and changes associated with clear-cutting. Forest Ecology and Management, 2003, 174(1/3): 51-63.
- [27] Wang H, Liu S R, Wang J X, Shi Z M, Lu L H, Zeng J, Ming A G, Tang J X, Yu H L. Effects of tree species mixture on soil organic carbon stocks and greenhouse gas fluxes in subtropical plantations in China. Forest Ecology and Management, 2012, 300: 4-13.
- [28] Wei H D, Ma Q X. Study on the carbon storage and distribution of *Pinus massoniana* Lamb plantation ecosystem at different growing stages. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2007, 35(1): 171-174.
- [29] Fang X, Tian D L, Xiang W H. Density, storage and distribution of carbon in Chinese fir plantation at fast growing stage. Scientia Silvae Sinicae, 2002, 38(3): 14-19.

参考文献:

- [2] 赖亚飞, 朱清科. 黄土高原丘陵区沟壑退耕还林(草)工程实施综合效益评价——以陕西省吴起县为例. 西北林学院学报, 2009, 24(3): 219-223.
- [3] 张景群, 苏印泉, 康永祥, 徐明喜, 秦乐. 黄土高原刺槐人工林幼林生态系统碳吸存. 应用生态学报, 2009, 20(12): 2911-2916.
- [4] 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.
- [5] 贺亮, 苏印泉, 季志平, 辛占良. 黄土高原沟壑区刺槐、油松人工林的碳储量及其分布特征研究. 西北林学院学报, 2007, 22(4): 49-53.
- [6] 刘迎春, 王秋风, 于贵瑞, 朱先进, 展小云, 郭群, 杨浩, 李胜功, 胡中民. 黄土丘陵区两种主要退耕还林树种生态系统碳储量和固碳潜力. 生态学报, 2011, 31(15): 4277-4286.
- [7] 秦武明, 何斌, 韦善华, 蔡树威, 覃永华. 厚荚相思人工幼林生态系统碳贮量及其分布研究. 安徽农业科学, 2008, 36(32): 14089-14092.
- [8] 罗辑, 杨忠, 杨清伟. 贡嘎山森林生物量和生产力的研究. 植物生态学报, 2000, 24(2): 22-26.
- [9] 程先富, 史学正, 于东升, 藩贤章. 兴国县森林土壤有机碳库及其与环境因子的关系. 地理研究, 2004, 23(2): 211-217.
- [10] 叶邵明, 郑小贤, 杨梅, 谢伟东, 招礼军, 梁宏温. 尾叶桉与马占相思人工复层林生物量及生产力研究. 北京林业大学学报, 2008, 30(3): 37-43.
- [13] 毕君, 黄泽舟, 王振亮. 刺槐单株生物量动态研究. 河北林学院学报, 1993, 8(4): 278-282.
- [16] 周玉荣, 于振良, 赵士洞. 我国主要森林生态系统碳贮量和碳平衡. 植物生态学报, 2000, 24(5): 518-522.
- [17] 程小琴, 韩海荣, 康峰峰. 山西油松人工林生态系统生物量、碳积累及其分布. 生态学杂志, 2012, 31(10): 2455-2460.
- [18] 黄锦学, 黄李梅, 林智超, 陈光水. 中国森林凋落物分解速率影响因素分析. 亚热带资源与环境学报, 2010, 5(3): 56-63.
- [22] 刘延慧, 王彦辉, 于彭涛, 熊伟, 郝佳, 张晓蓓, 徐丽宏. 六盘山南部华北落叶松人工林土壤有机碳含量. 林业科学, 2012, 48(12): 1-9.
- [23] 吴志祥, 谢贵水, 陶忠良, 周兆德, 王旭. 海南儋州不同林龄橡胶林土壤碳和全氮特征. 生态环境学报, 2009, 18(4): 1484-1491.
- [28] 尉海东, 马庆祥. 不同发育阶段马尾松人工林生态系统碳贮量研究. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2007, 35(1): 171-174.
- [29] 方晰, 田大伦, 项文化. 速生阶段杉木人工林碳素密度、贮量和分布. 林业科学, 2002, 38(3): 14-19.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.34, No.10 May, 2014 (Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- Landscape sustainability and landscape sustainability science ZHAO Wenwu, FANG Xuening (2453)
- A diagnostic framework of payments for ecosystem services and associated case studies
..... ZHU Wenbo, WANG Yang, LI Shuangcheng (2460)
- Progress in research of iron plaque on root surface of wetland plants
..... LIU Chunying, CHEN Chunli, GONG Xiaofeng, et al (2470)
- Ecological effects of predator chemical cues in aquatic ecosystem QIN Guangqiu, LU Haoliang, TANG Zhenzhu, et al (2481)
- Secondary substances and their ecological effects on seed dispersal in vertebrate-dispersed fleshy fruit plants
..... PAN Yang, LUO Fang, LU Changhu (2490)

Autecology & Fundamentals

- Responses of CH₄ uptake rates to simulated N deposition in a nature forest in mid-subtropical China
..... CHEN Chaoqi, YANG Zhijie, LIU Xiaofei, et al (2498)
- Ecological characteristics of *Phragmites australis* and their relationship to water-salt indicators in dry habitats of the southern
marginal zones of the Tarim Basin, China GONG Lu, ZHU Meiling, TASHPOLAT · Tiyp, et al (2509)
- Threshold effect of soil moisture on photosynthetic and physiological parameters in *Rosa xanthina* L. and its photosynthetic
productivity classification ZHANG Shuyong, XIANG Jiangbao, ZHANG Guangcan, et al (2519)
- Contrasting responses of soil respiration to litter manipulation in subtropical *Mytilaria laosensis* and *Cunninghamia lanceolata*
plantations YU Zaipeng, WAN Xiaohua, HU Zhenhong, et al (2529)
- Potassium application for increased jasmonic acid content and defense enzyme activities of wheat leaves infested by aphids
..... WANG Yi, ZHANG Yueling, SU Janwei, et al (2539)
- Combined effects of elevated O₃ concentration and reduced solar irradiance on photosynthetic activity and energy dissipation
of winter wheat SUN Jian, ZHENG Youfei, et al (2548)
- Colonization dynamics of *Bacillus cereus* B3-7 on wheat roots and control efficiency against sharp eyespot of wheat
..... HUANG Qiubin, ZHANG Ying, LIU Fengying, et al (2559)
- Quantitative study of water consumption characteristics of winter wheat under deficit irrigation
..... ZHANG Xingjuan, XUE Xuzhang, GUO Wenzhong, et al (2567)
- Assessment on the ecological fitness of anti-fungal transgenic rice LI Wei, GUO Jianfu, YUAN Hongxu, et al (2581)
- A proteomic analysis of *Arachis hypogaea* leaf in responses to enhanced ultraviolet-B radiation
..... DU Zhaokui, LI Junmin, ZHONG Zhangcheng, et al (2589)
- Composition of fatty acids from suspended particulate matter in southern South China Sea
..... LIU Huaxue, KE Changliang, LI Chunhou, et al (2599)
- The influence of age, flock size, habitat, and weather on the time budget and the daily rhythm of wintering Siberian Cranes
in Poyang Lake YUAN Fangkai, LI Yankuo, LI Fengshan, et al (2608)
- The energy budget and water metabolism heat regulation of tree sparrows *Passer montanus* of toba compensatory regeneration
..... YANG Zhihong, WU Qingming, YANG Miao, et al (2617)
- The effect of low-dose of pesticide on predation of spider and its preliminary mechanisms LI Rui, LI Na, LIU Jia, et al (2629)
- Response of the alligator weed flea beetle, *Agasicles hygrophila* (Coleoptera: Chrysomelidae) to overwintering protection and
its controlling effect on alligator weed *Alternanthera philoxeroides* (Amaranthaceae: Alternanthera)
..... LIU Yufang, WANG Xiuxiu, LI Fei, et al (2638)

Population, Community and Ecosystem

- The effect of climate change on the population fluctuation of the Siberian crane in Poyang Lake LI Yankuo, QIAN Fawen, SHAN Jihong, et al (2645)
- Characteristics of soil phosphorus fractions in wetlands with various restoration age in caizi lake, Anhui Province LIU Wenjing, ZHANG Pingjiu, DONG Guozheng, et al (2654)
- Multivariate analysis of the relations between phytoplankton assemblages and environmental factors in Chagan Lake Wetland LI Ranran, ZHANG Guangxin, ZHANG Lei (2663)
- Diversity of methanogen communities in tidal freshwater and brackish marsh soil in the Min River estuary ZENG Zhihua, YANG Minhe, SHE Chenxing, et al (2674)
- The influence of environment and phylogenic background on variation in leaf and fine root traits in the Yanhe River catchment, Shaanxi, China ZHENG Ying, WEN Zhongming, SONG Guang, et al (2682)
- Changes of soil properties in re-vegetation stages on sloping-land with purple soils in hengyang of Hunan Province, South-central China YANG Ning, ZOU Dongsheng, YANG Manyuan, et al (2693)
- Vulnerability assessment on the mangrove ecosystems in qinzhou bay under sea level rise LI Shasha, MENG Xianwei, GE Zhenming, et al (2702)
- Dynamics of biomass and productivity of three major plantation types in southern China DU Hu, ZENG Fuping, WANG Kelin, et al (2712)
- Fungal diversity in *Cunninghamia lanceolata* plantation soil HE Yuanhao, ZHOU Guoying, WANG Shenjie, et al (2725)
- Response of sandy vegetation characteristics to precipitation change in Horqin Sandy Land ZHANG Lamei, LIU Xinping, ZHAO Xueyong, et al (2737)
- Characteristics of carbon storage and sequestration of *Robinia pseudoacacia* forest land converted by farmland in the Hilly Loess Plateau Region SHEN Jiapeng, ZHANG Wenhui (2746)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Forest microclimate change along with the succession and response to climate change in south subtropical region LIU Xiaodong, ZHOU Guoyi, CHEN Xiuzhi, et al (2755)
- Drought variations of winter wheat in different growth stages and effects of climate trend in Huang-Huai-Hai Plain, China XU Jianwen, JU Hui, LIU Qin, et al (2765)

Resource and Industrial Ecology

- A method of environment assessment of mineral resources planning for shanxi provinces base on GIS LIU Wei, DU Peijun, LI Yongfeng (2775)
- A new approach to assess the water footprint of hydropower: a case study of the Miyun reservoir in China ZHAO Dandan, LIU Junguo, ZHAO Xu (2787)

《生态学报》2014 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

本期责任副主编 祖元刚

编辑部主任 孔红梅

执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 34 卷 第 10 期 (2014 年 5 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 34 No. 10 (May, 2014)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel: (010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail: journal@ cspg. net	Distributed by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel: (010)64034563 E-mail: journal@ cspg. net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add: P.O.Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元