

黄土高原丘陵区退耕还林地油松 人工林碳储量及分配特征研究

申家朋^{1,2}, 张文辉², 李彦华³, 尤健健^{1,2}, 余碧云^{1,2}, 杨小舟^{1,2}, 何景峰^{1,2*}

(1 西北农林科技大学 林学院, 陕西杨陵 712100; 2 西北农林科技大学 西部环境与生态教育部重点实验室, 陕西杨陵 712100; 3 青岛农业大学 园林与林学院, 山东青岛 266109)

摘 要:以黄土高原丘陵区主要退耕还林树种油松为研究对象,对甘肃省庆阳市合水县采用样地调查与生物量实测方法,分析不同坡向(阳坡、阴坡)及退耕年限(退耕 6 年、9 年和 12 年)油松人工林的乔木不同器官、灌草层、枯落物层和土壤层的碳含量,以及油松人工林乔木层、灌草层、枯落物层和土壤层碳储量及其分配特征,探讨甘肃黄土高原丘陵区生态林的固碳作用。结果表明:(1)油松不同器官碳含量为 48.15%~53.90%,各器官碳含量大小为树干>叶>细枝>粗枝>根桩>粗根>树皮>大根>中根>小根>细根>球果;灌木层碳含量为茎>叶>根;草本层碳含量为地上部分>地下部分。(2)油松人工林的枯落物层碳含量为未分解层大于半分解层。(3)0~100 cm 土壤层的碳含量随退耕年限增加而增大,随土壤深度的增加而下降;0~10 cm、10~20 cm 土壤层不同坡向间碳含量差异显著。(4)阳坡和阴坡退耕 6 年、9 年和 12 年油松林总碳储量分别为 42.90、50.50、59.22 t·hm⁻²和 45.08、53.77、65.70 t·hm⁻²。研究认为,黄土高原丘陵区阳坡和阴坡均适宜油松林发挥固碳效益,且阴坡要优于阳坡,是甘肃黄土高原丘陵区的理想树种。

关键词:退耕还林;油松人工林;碳储量;碳分配

中图分类号:Q948.1 **文献标志码:**A

Characteristics of Carbon Storage and Sequestration of *Pinus tabulaeformis* Forest Land Converted by Farmland in Loess Hilly Area

SHEN Jiapeng^{1,2}, ZHANG Wenhui², LI Yanhua³, YOU Jianjian^{1,2},
YU Biyun^{1,2}, YANG Xiaozhou^{1,2}, HE Jingfeng^{1,2*}

(1 College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2 Key Laboratory of Environment and Ecology of Education Ministry in West China, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3 College of Landscape Architecture and Forestry, Qingdao Agricultural University, Qindao, Shandong 266109, China)

Abstract: In order to understand the carbon sequestration of ecological forests in Loess Plateau of Gansu Province, we took the different slopes (sunny and shady slope) and restoration duration (conversion of 6 years, 9 years and 12 years) of *Pinus tabulaeformis* plantations as test objects and by the methods of plot investigation and biomass measurement. We studied the carbon content in different plant organs, shrub layers, grass layers, litter layers and soil layers and the carbon storage and its allocation in tree layer, shrub layer, grass layer, litter layer and soil layer. For the test plantations, the carbon storage content in different *P. tabulaeformis* organs ranged from 48.15%~53.90%, which in the order as follows: stem>leaf>fine-branch>thick-branch>stump>thick-root>bark>large-root>medium-root>small-root>fine-root>cone; in shrub layer was stem>leaf>root; in grass layer was aboveground>underground; in litter layer was

收稿日期: 2013-08-01; 修改稿收到日期: 2013-10-10

基金项目: 中国科学院战略先导科技专项(XDA05060300)

作者简介: 申家朋(1987—), 男, 硕士, 主要从事森林培育研究。E-mail: shenjiapeng503@126.com

* 通信作者: 何景峰, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事森林培育研究。E-mail: hji163@163.com

fresh>decomposing. The carbon storage in the soil profiles(0~100 cm) increased with plantation age but decreased with soil depth. There are significant different of difference slope positions in 0~10 cm and 10~20 cm. The total carbon storage in sunny and shady slopes of the 6-,9-and 12-year plantations was 42.90, 50.50,59.22 t·hm⁻² and 45.08,53.77 and 65.70 t·hm⁻². It was considered that *P. tabulaeformis* had a good carbon sequestration function in sunny slope and shady slope. The shady slope was better than sunny slope and being able to be an ideal tree species in Loess Plateau of Gansu Province.

Key words: conversion of cropland to forest; *Pinus tabulaeformis* plantation; carbon storage; carbon allocation

在全球气候变暖形势下^[1],森林作为陆地生态系统主体^[2],在减缓大气 CO₂ 浓度上升、调节碳平衡等方面发挥着重要作用^[3]。通过人工造林实现森林再生,是陆地碳汇形成的主要原因^[4-5]。黄土高原丘陵区退耕还林工程自 1999 年实施以来,效果除了体现植物覆盖提高以及社会、经济和生态效益^[6-7]之外,其固碳效益也引起人们重视。黄土高原退耕地地林分发育究竟发挥了多大固碳增汇效益,是目前研究的热点。油松人工林面积大,研究油松林碳储量及其分布,对综合评价油松林生态效益十分必要。

油松适应性强,是黄土高原丘陵区退耕地上主要造林树种之一。此前,贺亮^[8]研究了陕西黄土沟壑区油松人工林根系与碳储量关系,刘迎春^[9]研究了陕西和山西“三北”防护林建设以来油松碳储量变化,程小琴^[10]研究了山西油松碳储量分布变化规律,孟蕾^[11]研究了子午岭油松碳储量分布特征。甘肃庆阳地区退耕地栽植的油松林其林龄大多 10 年,对其碳汇效益及其分布尚未有研究。黄土高原丘陵沟壑区地理环境复杂,区域间差异性较大,人工林碳汇效益也存在差异。因此研究甘肃省退耕还林固碳效益不仅能阐明区域性油松林碳汇效益,而且对黄土高原退耕还林效益评价也会提供重要依据。

甘肃黄土高原主要范围在陇东高原,本试验以甘肃黄土高原丘陵沟壑区庆阳市合水县 2000 年、2003 年和 2006 年人工油松林为对象,分别在阴坡和阳坡设置样地,调查了退耕 6 年(2006 年)、9 年(2003 年)和 12 年(2000 年)共 3 个退耕年限的油松林地乔灌草地上和地下生物量、枯落物量和土壤特性,测定其碳含量,分析油松林的固碳效益,以期为黄土高原丘陵沟壑区油松林固碳效益提供科学依据。

1 研究区概况与方法

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,从地域、土壤、植被和退耕还林总体规划来看,都具有代表性。因此,我们

选择庆阳市合水县作为研究区域。本区属于典型的黄土高原丘陵沟壑地形,黄土厚度为 50~100 m。海拔高度为 1 100~1 500 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,合水县从 1999 年被列入甘肃退耕还林工程试点县开始到 2010 年每年进行植树造林,林下灌木主要有沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、酸枣(*Ziziphus jujuba* var. *spinosa*)、悬钩子(*Rubus corchorifolius*);草本主要有披针苔草(*Carex lanceolata*)、茼蒿(*Artemisia giraldii*)、铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)等。

1.2 研究方法

该试验于 2012 年 8 月在合水县进行调查,由于油松林为人工林,结合当地退耕植树造林记录和计数样芯的年轮确定样地的油松林龄。选择了退耕 6 年、9 年和 12 年后营造的林地,坡度 15~23°,反坡梯田整地,采用 3 年生苗木,林地株行距为 1.5 m×2 m,造林后无抚育管护,成活率 80%以上,低于 80%的第 2 年进行补植,3 年后保存率在 90%以上。选择退耕 6 年、9 年和 12 年的油松人工林,按照林地立地条件相似的原则,每类退耕地分阴坡和阳坡,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。

1.2.1 油松标准木个体生物量和林分生物量 将标准木伐倒,测量树高、胸径、树冠的直径,采用 Monsic 分层切割法,树干按每段 1 m 进行区分,分段测定其鲜重;树冠分成树叶和树枝,树枝按基部直径大小分为细枝(<1 cm),粗枝(>1 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^[12]。实测其鲜重,并取样(树干每段截取 5 cm 圆盘),带回实验室进行含水量测定

表 1 研究区不同生境及退耕年限油松人工林的林分特征

Table 1 Forest characters of *P. tabulaeformis* plantations in different habietats and restoration years

退耕年限/坡向 Restoration years/slope	海拔 Altitude /m	坡度 Slope /°	平均胸径 Average DBH/cm	平均树高 Average tree height/m	乔木密度 Density /(trees·hm ⁻²)	灌木盖度 Shrub coverage /%	草本盖度 Herb coverage /%	总盖度 Community coverage/%	郁闭度 Canopy density
6 年阳坡 6-year sunny slope	1 362.32±6.53	23±1.43	2.05±0.31	2.01±0.66	2 953±25	13.45±2.43	45.25±3.32	56.42±2.78	0.43±0.04
6 年阴坡 6-year shady slope	1 352.15±11.39	22±1.04	2.83±0.53	2.54±0.49	3 008±33	13.71±3.27	48.92±5.52	59.79±2.47	0.45±0.03
9 年阳坡 9-year sunny slope	1 237.28±33.17	17±0.92	4.17±0.82	3.19±0.69	2 911±56	16.32±4.51	43.28±4.14	58.38±2.48	0.49±0.04
9 年阴坡 9-year shady slope	1 177.22±27.16	19±0.58	4.81±0.55	3.76±0.62	2 985±79	19.57±3.65	48.41±3.19	63.52±3.76	0.54±0.05
12 年阳坡 12-year sunny slope	1 216.21±22.42	16±1.24	5.63±0.48	4.17±0.82	2 883±61	21.73±2.18	49.33±2.07	65.67±3.51	0.55±0.05
12 年阴坡 12-year shady slope	1 054.76±27.84	18±1.93	6.92±0.74	5.21±0.73	2 951±42	22.27±3.88	52.63±4.76	67.97±4.83	0.62±0.06

和计算干重。各部分的生物量通过各部分鲜重质量乘以对应的干重比求出,林分的生物量通过林分调查和所建立的异速生长方程计算。

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×5 m 的灌木样方,记录小样方内所有灌木的多度、盖度、高度、基径;同时在标准地设置 5 个 1 m×1 m 草本样方,记录草本多度、高度、盖度。林下灌草采用收获法,灌木分叶、枝和根 3 部分称量鲜重,草本分地上鲜重和地下鲜重,灌木和草本都分别取样。枯落物量的测定采用全部收获法,设置 5 个 1 m×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 ℃烘箱中至恒重,测定各部分鲜重含水量,计算干重。

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(叶、细枝、粗枝、树干、树皮、球果、细根、小根、中根、大根、粗根、根桩)、灌木(叶、茎、根)、草本(地上部分和地下部分)和枯落物样品,经烘干、粉碎、过筛,测定其有机碳含量。

在不同退耕年限的每个样地中,沿对角线方向设置 5 个土壤采样点,沿土壤剖面按 0~10、10~20、20~30、30~50、50~100 cm 分 5 层采集土壤样品,把相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 Liq-
uiTOC II (德国生产)分析测定有机碳含量。

1.2.4 油松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^[13]。土壤碳储量计算参考程先富^[14]的方法,为统一计量单位,略作修改:

$$T=0.1\sum C_i\times B_i\times D_i$$

式中, T 为土壤有机碳密度(t/hm²); i 为土层数, D_i 为不同土层的厚度(cm); 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)。

本文采用年平均净生产量作为生产力估测指标^[15],油松林分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。结合实际调查,建立油松各组分生物量与胸径、树高的生长方程,方程的形式为^[16-18]: $\ln W=a+b\ln(D^2H)$

式中, W 为各组分生物量(kg); D 为胸径(cm); a 、 b 为系数(表 2)。

表 2 油松各器官生物量(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 *P. tabulaeformis*

器官 Organ	生长方程 Allometric equation	R^2
树根 Root	$\ln W=-0.985+0.322\ln(D^2H)$	0.962
树皮 Bark	$\ln W=-3.140+0.55\ln(D^2H)$	0.987
球果 Cone	$\ln W=-4.059+0.579\ln(D^2H)$	0.975
树干 Stem	$\ln W=-0.173+0.309\ln(D^2H)$	0.982
树枝 Branch	$\ln W=-0.078+0.199\ln(D^2H)$	0.964
树叶 Leaf	$\ln W=-1.954+0.351\ln(D^2H)$	0.994

1.3 数据处理

所有数据经过 Excel 软件处理后,用 SPSS 13.0 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($P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 油松人工林不同退耕年限乔木层、灌木层、草本层、枯落物层及土壤层碳含量

不同退耕年限不同坡向油松林乔木各器官碳含

量为 48.15%~53.90%,退耕年限和坡向对油松林器官碳含量无显著影响。不同器官碳含量平均值存在显著差异(表 3),按碳含量高低排列顺序为树干>叶>细枝>粗枝>根桩>粗根>树皮>大根>中根>小根>细根>球果。

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:枯落物层未分解和半分解为 43.79%、38.83%;草本层地上部分和地下部分为 43.04%、39.78%;灌木层叶、枝、根分别为 43.93%、45.62%、42.38%。灌木层

表 3 不同退耕年限油松人工林各器官碳含量

Table 3 Carbon contents of different organs of *P. tabulaeformis* with different restoration year/%

器官 Organ	退耕 6 年 6-year restoration		退耕 9 年 9-year restoration		退耕 12 年 12-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	53.31±0.51	53.29±0.07	53.62±0.54	53.63±0.62	53.90±0.58	53.52±0.45	53.54±0.47a
细枝 Fine-branch	52.01±0.63	51.29±0.17	51.92±0.61	52.03±0.57	52.30±0.45	51.71±0.76	51.87±0.57 b
粗枝 Thick-branch	51.22±0.76	50.77±0.47	52.01±0.52	52.23±1.04	51.75±0.68	52.03±0.23	51.66±0.77c
叶 Leaf	52.35±0.82	52.42±1.21	53.08±0.23	53.74±0.45	53.61±0.58	53.39±0.51	53.09±0.84a
细根 Fine-root	49.23±0.37	49.29±0.59	49.84±0.73	48.42±0.85	48.15±0.81	48.41±0.97	49.05±0.81gh
小根 Small-root	49.63±0.64	49.26±0.49	48.74±0.75	48.92±0.60	49.53±0.82	49.19±0.88	49.21±0.67g
中根 Medium-root	50.60±0.59	49.68±0.56	50.56±0.48	50.26±0.32	50.10±0.28	49.41±0.89	50.10±0.64f
大根 Large-root	50.80±0.88	50.55±0.74	50.82±0.44	50.62±0.57	50.09±0.65	50.04±0.27	50.52±0.62ef
粗根 Thick-root	51.56±1.30	50.58±0.58	51.44±0.42	51.29±0.88	50.75±0.52	49.69±0.58	50.88±0.92de
根桩 Stump	50.62±0.58	51.39±1.01	51.29±1.00	52.15±0.90	50.62±0.57	50.79±0.49	51.18±0.84cd
树皮 Bark	50.56±0.44	50.62±0.95	50.41±0.58	50.84±0.92	50.88±0.57	51.77±0.69	50.84±0.75de
球果 Cone	48.26±1.03	49.01±0.85	48.53±0.59	48.57±0.47	49.14±0.30	48.00±0.95	48.58±0.74h

注:不同小写字母表示各器官碳含量差异显著($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters represented significant difference among the carbon contents in different organs at 0.05 level.

表 4 不同退耕年限油松人工林枯落物层、草本层、灌木层及土壤层碳含量

Table 4 Carbon contents of litter layer, herb layer, shrub layer and soil layer of *P. tabulaeformis* with different restoration years/%

层次 Layer	组分 Component	退耕 6 年 6-year restoration		退耕 9 年 9-year restoration		退耕 12 年 12-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	未分解 Fresh	43.56±0.53	43.64±0.55	43.24±0.11	44.17±0.51	44.21±0.75	43.94±0.61
	半分解 Decomposing	39.31±0.52	38.14±1.00	38.56±0.05	39.63±0.68	39.09±0.65	38.28±0.98
草本层 Herb layer	地上部分 Aboveground	42.47±0.47	43.16±0.21	42.94±0.51	43.17±0.27	43.45±0.87	43.06±0.58
	地下部分 Underground	39.28±0.54	39.84±0.41	40.23±1.04	39.92±0.66	40.46±1.16	39.93±0.43
灌木层 Shrub layer	叶 Leaf	43.43±1.08	44.07±0.79	43.65±0.33	44.72±0.93	43.54±1.03	44.20±0.58
	茎 Stem	44.94±0.59	44.32±0.22	45.38±0.75	46.56±0.86	46.52±1.08	46.02±0.55
	根 Root	42.53±0.56	42.36±0.83	42.43±0.70	42.14±0.29	42.66±0.64	42.17±1.03
土壤层 Soil layer	0~10 cm	6.17±0.06Fa	6.23±0.08Ea	7.82±0.03Da	8.19±0.04Ca	9.09±0.03Ba	9.50±0.06Aa
	10~20 cm	4.72±0.04Fb	4.94±0.03Eb	5.08±0.03Db	5.11±0.04Cb	5.23±0.04Bb	5.41±0.04Ab
	20~30 cm	2.34±0.04Cc	2.31±0.03Cc	2.35±0.02Cc	2.44±0.05Bc	2.39±0.02Bc	2.49±0.01Ac
	30~50 cm	2.23±0.04Cd	2.27±0.02Bcd	2.26±0.03Bd	2.32±0.04Bd	2.43±0.02Ac	2.45±0.03Ac
	50~100 cm	2.24±0.03Bd	2.25±0.02Bd	2.26±0.02Bd	2.28±0.03Bd	2.32±0.10Bc	2.43±0.02Ac

注:不同大写字母表示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($P<0.05$)。

Note: Different capital letters meant significant different among different aspect at 0.05 level, and different small letters meant significant difference among different soil layers in the same restoration year at 0.05 level.

平均碳含量高于草本层,且均为地上部分高于地下部分。表现为:灌木枝>灌木叶>枯落物层未分解>草本地上>灌木根>草本地下>枯落物层半分解。

相同退耕年限的阴坡和阳坡,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明显。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 1.75%~49.09%,且 0~10 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 7.45%~54.28%,并以 0~10 cm 增加最明显。相同土壤层次,阴坡碳含量增加幅度大于阳坡增加幅度。

2.2 油松人工林不同退耕年限乔木层、灌木层、草本层、枯落物层和土壤层碳储量及其分配

油松林各部分碳储量存在明显的退耕年限变化,随着退耕年限的增加,阳坡和阴坡均呈现增大的

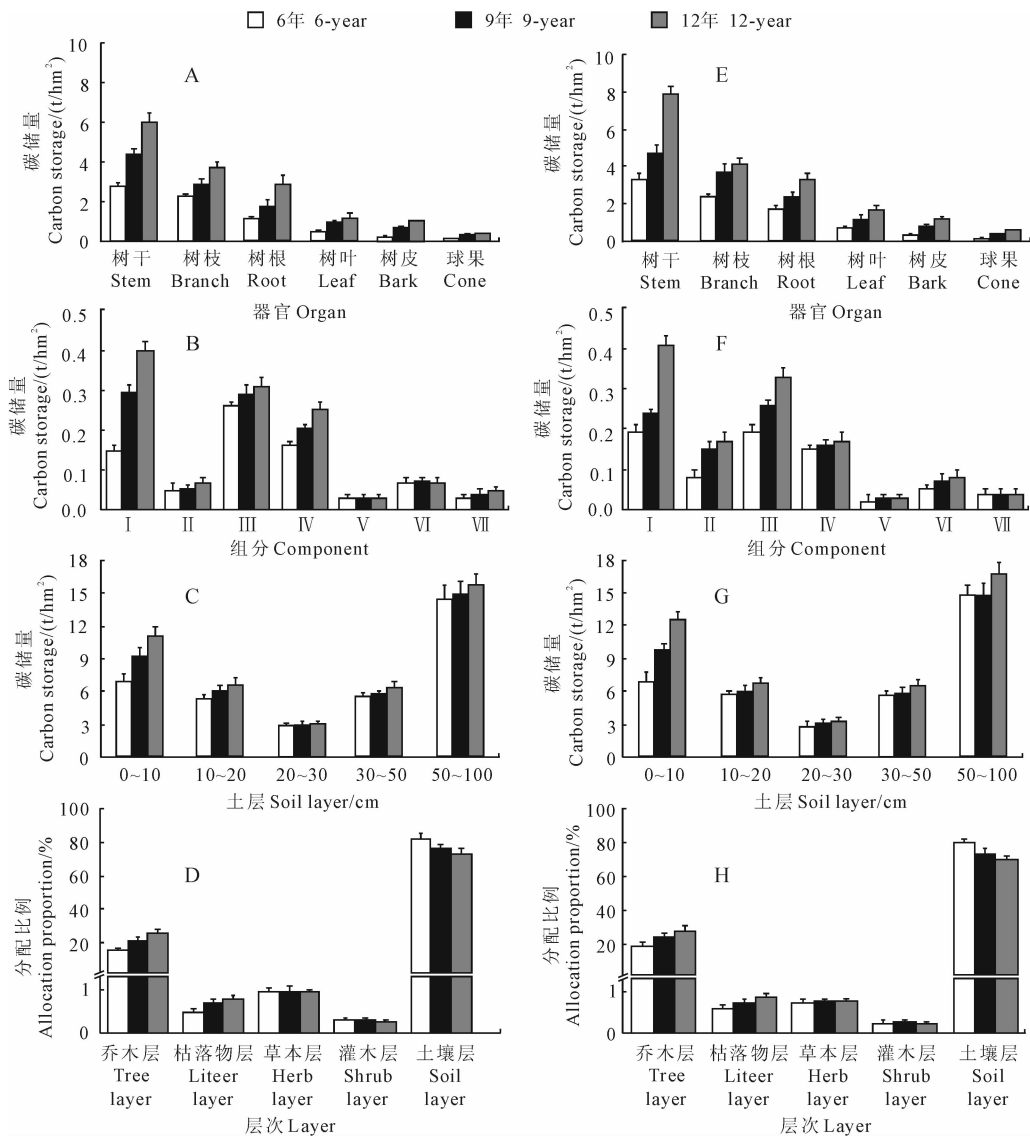


图 1 油松林乔木层、灌木层、草本层、枯落物层和土壤碳储量及其分配比例

A~D. 阳坡;E~H. 阴坡; I . 枯落物未分解; II . 枯落物分解; III . 草本层地上部;
IV . 草本层地下部; V . 灌木层叶; VI . 灌木层干; VII . 灌木层根

Fig.1 Carbon storage and its allocation proportion in tree layer,shrub layer,herb layer,
litter layer and soil layer in *P. tabulaeformis* plantations

A~D. Sunny slope;E~H. Shady slope; I . Fresh litter; II . Decomposing litter; III . Aboveground herb layer;
IV . Underground herb layer; V . Leaf of shrub layer; VI . Stem of shrub layer; VII . Root of shrub layer

趋势。

阳坡表现为:退耕 6 年、9 年和 12 年油松林乔木层碳储量分别为 6.84、10.79 和 15.09 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 随着退耕年限的增加呈现增大的趋势。各器官中, 树干的碳储量最高, 各退耕年限分别占整个乔木层的 39.774%、40.50 和 39.83% (图 1, A); 枯落物层、草本层、灌木层碳储量较小, 分别为乔木层的 2.92%~3.23%、3.71%~6.14%、0.99%~1.90% (图 1, B)。油松林 0~100 cm 土壤各退耕年限的碳储量分别为 35.31、38.72 和 42.95 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 并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 19.62%、23.47%、25.72% 和 41.23%、38.40%、36.51% (图 1, C)。退耕 6 年、9 年和 12 年油松林生态系统总碳储量分别为 42.90、50.50 和 59.22 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 分配格局为土壤层>乔木层>草本层>枯落物层>灌木层。其中, 土壤层占整个人工林总碳库的比例分别为 82.31%、76.67% 和 72.53%, 乔木层为 15.94%、21.37% 和 25.48%, 枯落物层为 0.47%、0.69% 和 0.79%, 草本层为 0.98%、0.98% 和 0.95%, 灌木层为 0.30%、0.29% 和 0.25% (图 1, D)。

阴坡表现为:退耕 6 年、9 年和 12 年油松林乔木层碳储量分别为 8.48、13.12 和 18.69 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 随着退耕年限的增加呈现增大的趋势。各器官中, 树干的碳储量最高, 各退耕年限分别占整个乔木层的 39.15%、36.13% 和 42.11% (图 1, E)。枯落物层、草本层、灌木层碳储量较小, 分别为乔木层的

2.97%~3.18%、2.68%~4.01%、0.80%~1.29% (图 1, F)。油松林 0~100 cm 土壤的碳储量分别为 35.88、39.70 和 45.78 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 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 19.25%、24.58%、27.30% 和 41.11%、37.41%、36.44% (图 1, G)。退耕 6 年、9 年和 12 年油松林总碳储量分别为 45.08、53.77 和 65.70 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 退耕 6 年和 9 年分配格局为土壤层>乔木层>草本层>枯落物层>灌木层, 退耕 12 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 79.59%、73.83% 和 69.68%, 乔木层为 18.81%、24.40% 和 28.45%, 枯落物层为 0.60%、0.73% 和 0.88%, 草本层为 0.75%、0.78% 和 0.76%, 灌木层为 0.24%、0.26% 和 0.23% (图 1, H)。

总体看来, 相同退耕年限下, 乔木层、枯落物层、草本层、灌草层和土壤层碳储量表现出阴坡>阳坡。无论阴坡还是阳坡, 乔木层和土壤层是油松林的主要碳库, 退耕 6 年、9 年和 12 年油松林乔木层、枯落物层、草本层、灌木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, 乔木层次之, 灌木层最小, 随着退耕年限增加, 油松林各部分和总体碳储量均呈现增加趋势, 且退耕 12 年>9 年>6 年。

由表 5、表 6 可以看出, 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 12 年最高, 分别为 2.46、1.25 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 3.02、1.57 $\text{t} \cdot$

表 5 阳坡油松人工林年净固碳量

Table 5 Annual net carbon sequestration in *P. tabulaeformis* plantations in sunny slope/($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)

组分 Component	退耕 6 年 6-year restoration		退耕 9 年 9-year restoration		退耕 12 年 12-year restoration	
	年净生产力 Annual net productivity	年净固碳量 Annual net carbon storage	年净生产力 Annual net productivity	年净固碳量 Annual net carbon storage	年净生产力 Annual net productivity	年净固碳量 Annual net carbon storage
乔木层 Tree layer	2.07±0.26	1.08±0.32	2.34±0.19	1.22±0.37	2.35±0.28	1.21±0.18
枯落物层 Litter layer	0.11±0.03	0.05±0.03	0.10±0.03	0.04±0.01	0.11±0.02	0.04±0.01
合计 Sum	2.18±0.29	1.13±0.34	2.44±0.21	1.26±0.36	2.46±0.29	1.25±0.19

表 6 阴坡油松人工林年净固碳量估算

Table 6 Annual net carbon sequestration in *P. tabulaeformis* plantations in shady slope/($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)

组分 Component	退耕 6 年 6-year restoration		退耕 9 年 9-year restoration		退耕 12 年 12-year restoration	
	年净生产力 Annual net productivity	年净固碳量 Annual net carbon storage	年净生产力 Annual net productivity	年净固碳量 Annual net carbon storage	年净生产力 Annual net productivity	年净固碳量 Annual net carbon storage
乔木层 Tree layer	2.65±0.33	1.38±0.26	2.74±0.41	1.43±0.24	2.91±0.35	1.52±0.26
枯落物层 Litter layer	0.11±0.03	0.05±0.01	0.10±0.03	0.04±0.01	0.11±0.02	0.05±0.01
合计 Sum	2.76±0.35	1.43±0.27	2.84±0.43	1.47±0.25	3.02±0.36	1.57±0.26

hm^{-2} ,表明在退耕 12 年时年净固碳量最大。阳坡年净生产力和年净固碳量均小于阴坡,说明阴坡更适合油松林碳固定。

3 讨 论

3.1 不同退耕年限及坡向对油松人工林植被碳含量及碳储量的影响

本研究中,退耕 6 年、9 年和 12 年油松林乔木层各器官碳含量在不同退耕年限及不同坡向均没有差异,说明退耕年限及坡向没有影响油松林乔木碳含量,且各器官碳含量在 48.15%~53.90%之间变化,平均碳含量为 50.88%。在国内外研究中常用 0.45^[19-20]作为乔木碳含量,如果以此作为油松林碳储量研究,可能导致乔木层碳储量偏小。与杉木^[21]不同器官碳含量具有相似性。林下植被各组分碳含量低于乔木层;相对于各组分含量,灌木层和草本层均以地上部分碳含量高于地下部分,这可能与植被接受光照时间及强度有关,进而影响植物光合作用和有机质的形成;枯落物未分解状态的碳含量明显高于半分解状态,这可能与枯落物中的部分有机物被分解有关。

随着退耕年限的增加,油松林乔木层碳储量增大,且阴坡大于阳坡。其中,阳坡与阴坡退耕 12 年乔木层碳储量分别为 15.09 和 18.69 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$,低于贺亮^[8] (24.20 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)、孟蕾^[11] (30.37 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)和呈小琴^[10] (62.08 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)的油松碳储量密度,高于刘迎春^[9]油松碳储量密度 (10.23 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$),这与林龄及密度等有很大的关系。贺亮和孟蕾采取乔木不同器官样品并实测其碳含量,而刘迎春采用通用系数 0.5 作为乔木不同器官碳含量,且研究地域存在立地条件差异,都可能导致碳储量存在差异。本研究中,阴坡碳储量大于阳坡,这可能

与阴坡水分、光照、温度等环境因素有关,尤其在干旱环境下,水分对于植物的生长及其重要。不管阳坡和阴坡,退耕 12 年油松人工林仍低于贺亮、孟蕾的研究结果和中国森林碳储量平均水平 (57.07 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)^[22],说明该地区油松人工林在适宜的条件下仍有较大的增长空间,将发挥巨大的固碳潜力。

3.2 不同退耕年限及坡向对油松人工林土壤碳含量及碳储量的影响

随着土壤深度的增加,不同退耕年限的土壤有机碳含量呈现减小趋势,与国内研究结果一致^[23-25]。但是国内研究对土壤碳储量估计的差异较大,例如李克让^[26]研究估算全国平均碳储量为 91.7 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$,而周玉荣等^[22]研究结果为 193.6 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$,因为土壤碳储量与立地环境^[27]、造林树种^[28]、造林模式^[29]、造林年限^[30-32]、地表枯落物^[33]紧密相关,可能造成许多研究结果不一致。本研究结果中,退耕年限和坡向是影响油松林土壤碳储量的主要因素。阳坡与阴坡退耕 6 年、9 年、12 年土壤有机碳储量均呈现增大趋势。

综合分析阳坡、阴坡不同退耕年限油松人工林不同层次的碳含量、碳储量及分配特征后发现,退耕 6 年、9 年和 12 年人工油松林生态系统碳储量分配格局均以土壤层碳储量最大,乔木层次之,灌木层最小,与 Finér 等^[34]研究结果基本一致。且不同坡向间其碳储量存在差异,总体表现为阴坡大于阳坡。从持续发育的角度看,黄土高原阳坡和阴坡均适宜油松林发挥固碳效益,且阴坡要优于阳坡。不同退耕年限中,以退耕 12 年油松林生态系统碳储量最大,高于退耕 6 年和退耕 9 年油松林碳储量,但是低于黄土高原丘陵区油松成熟林碳储量平均水平和中国森林生态系统平均碳储量,表明退耕 12 年后油松人工林仍有增加碳储量的潜力。

参考文献:

- [1] HOUGHTON R A, HACKLER J L, LAWRENCE K T. The U S carbon budget: Contributions from land-use change[J]. *Science*, 1999, 285: 574—577.
- [2] WU D(吴 丹), SHAO Q Q(邵全琴), LIU J Y(刘纪远), et al. Spatiotemporal dynamics of forest carbon storage in Taihe county of Jiangxi Province in 1985—2030[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2011, 22(1): 41—46 (in Chinese).
- [3] MORONI M T. Aspects of forest carbon management in Australia: A discussion paper[J]. *Forest Ecology and Management*, 2012, 275: 111—116.
- [4] FAN S, CLOOR M, MAHLMAN J, et al. A large terrestrial carbon sink in North America implied by atmospheric and oceanic carbon dioxide data and models[J]. *Science*, 1998, 282: 442—446.
- [5] POTTER C S, KLOOSTER S A. North American carbon sink[J]. *Science*, 1999, 283: 1 815.
- [6] URIV T H, LONHMUS K. Biomass production and nutrient accumulation in shortrotation grey alder plantation on abandoned agricultural land[J]. *Forest Ecology and Management*, 2002, 161: 169—179.
- [7] LAI Y F(赖亚飞), ZHU Q K(朱清科). Assessment on the comprehensive benefits of converting farmland to forest project in loess hilly

- regions—a case study of Wuyi County, Shaanxi Province[J]. *Journal of Northwest Forestry University* (西北林学院学报), 2009, **24**(3): 219–223(in Chinese).
- [8] HE L(贺亮), SU Y Q(苏印泉), JI ZH P(季志平), *et al.* Studies on carbon storage and distributive character of robinia and pinus in Loess Plateau Gull Area[J]. *Journal of Northwest Forestry University* (西北林学院学报), 2007, **22**(4): 49–53(in Chinese).
- [9] LIU Y CH(刘迎春), WANG Q F(王秋凤), YU G R(于贵瑞) *et al.* Ecosystems carbon storage and carbon sequestration potential of two main tree species for the Grain for Green Project on China's hilly Loess Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2011, **31**(15): 4277–4286(in Chinese).
- [10] CHENG X Q(程小琴), HAN H R(韩海荣), KANG F F(康峰峰). Biomass carbon accumulation and its partitioning of a *Pinus tabulaeformis* plantation ecosystem in Shanxi Province China[J]. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2012, **31**(10): 2455–2460(in Chinese).
- [11] MENG L(孟蕾), CHENG J M(程积民), YANG X M(杨晓梅), *et al.* Artificial *Pinus tabulaeformis* carbon storage and density in Ziwlung Forest Area on the Loess Plateau[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation* (水土保持通报), 2010, **30**(2): 133–137(in Chinese).
- [12] QIN W M(秦武明), HE Y B(何瑶斌), WEI SH H(韦善华), *et al.* Study on carbon storage and distribution of *Acacia crassicaarpa* Young Plantation Ecosystem[J]. *Journal of Anhui Agri. Sci.* (安徽农业科学), 2008, **36**(32): 14089–14092(in Chinese).
- [13] LUO J(罗辑), CHENG G W(程根伟), YANG ZH(杨忠), *et al.* Growth dynamis of dominant tree species in dark coniferous Forest on Gongga Mountain[J]. *Journal of Acta Phytoecologica Sinica* (植物生态学报), 2000, **24**(2): 22–26(in Chinese).
- [14] CHENG X F(程先富), SHI X ZH(史学正), YU D SH(于东升), *et al.* Organic carbon pool of forest soil and its relationship to environment factors in Xingguo County of Jiangxi Province[J]. *Journal of Geographical Research* (地理研究), 2004, **23**(2): 211–217(in Chinese).
- [15] YE SH M(叶绍明), ZHENG X X(郑小贤), YANG M(杨梅), *et al.* Biomass and productivity of stratified mixed stands of *Eucalyptus urophylla* and *Acacia mangium*[J]. *Journal of Beijing Forestry University* (北京林业大学学报), 2008, **30**(3): 37–43(in Chinese).
- [16] MA Q Y(马钦彦). Biomass of *Pinus tabulaeformis* in China[J]. *Journal of Beijing Forestry University* (北京林业大学学报), 1999, **4**(11): 1–10(in Chinese).
- [17] TER-MIKAELIAN M T, KORZUKHIN M D. Biomass equations for sixtyfive North American tree species[J]. *Forest Ecology and Management*, 1997, **97**: 1–24.
- [18] BI J(毕君), HUANG Z ZH(黄则舟), WANG ZH L(王振亮). Studies on biomass dynamic of black locust tree[J]. *Journal of Hebei Forestry College* (河北林学院学报), 1993, **8**(4): 278–282(in Chinese).
- [19] FANG J Y(方精云). Forest productivity in China and its response to Global Climate Chang[J]. *Acta Phytoecologica Sinica* (植物生态学报), 2000, **24**(5): 513–517(in Chinese).
- [20] MA Q Y(马钦彦), CHEN X L(陈遐林), WANG J(王娟), *et al.* Carbon content in constructive species of Main Forest Types in Northern China[J]. *Journal of Beijing Forestry University* (北京林业大学学报), 2002, **24**(5): 96–100(in Chinese).
- [21] FANG X(方晰), TIAN D L(田大伦), XIANG W H(项文化). Density, storage and distribution of carbon in Chinese fir plantation at fast growing stage[J]. *Scientia Silvae Sinicae* (林业科学), 2002, **38**(3): 14–19(in Chinese).
- [22] ZHOU Y R(周玉荣), YU ZH L(于振良), ZHAO SH D(赵士洞). Carbon storage and budget of major Chinese forest types[J]. *Acta Phytoecologica Sinica* (植物生态学报), 2000, **24**(5): 518–522(in Chinese).
- [23] YANG J Y(杨金艳), WANG CH K(王传宽). Soil carbon storage and flux of temperate forest ecosystem in Northeastern China[J]. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2005, **25**(11): 2875–2882(in Chinese).
- [24] HE ZH B(何志斌), ZHAO W ZH(赵文智), LIU H(刘鹤), *et al.* Characteristic of *Picea crassifolia* forest soil oranic carbon and relationship with environment factors in the Qilian Mountain[J]. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2006, **26**(8): 2572–2577(in Chinese).
- [25] ZHANG CH(张城), WANG SH Q(王绍强), YU G R(于贵瑞), *et al.* Soil orgnic carbon storage in typical forestland in East China[J]. *Resources Science* (资源科学), 2006, **28**(2): 97–103(in Chinese).
- [26] LI K R(李克让), WANG SH Q(王绍强), CAO M K(曹明奎). Vegetation and soil carbon storage in China[J]. *Science in China* (Series D), 2003, **33**(1): 72–80(in Chinese).
- [27] LI Y H(刘延惠), WANG Y H(王彦辉), YU P T(于彭涛), *et al.* Soil organic carbon contents of *Larix principisrupprechtii* plantations in the Southern Part of Liupan Mountains[J]. *Scientia Silvae Sinicae* (林业科学), 2012, **48**(12): 1–9(in Chinese).
- [28] WANG CH M(王春梅), LIU Y H(刘艳红), SHAO B(邵彬), *et al.* Quantifying the soil carbon changes following the afforestation of former arable land[J]. *Journal of Beijing Forestry University* (北京林业大学学报), 2007, **29**(3): 112–119(in Chinese).
- [29] WU ZH X(吴志祥), XIE G SH(谢贵水), *et al.* Characteristics of soil carbon and tatal nitrogen contents of rubber plantations at different age stages in Danzhou, Hainan Island[J]. *Ecology and Environmental Sciences* (生态环境学报), 2009, **18**(4): 1484–1491(in Chinese).
- [30] PARFITT R L, PERCIVAL H J, DAHLGREN R A, *et al.* Soil and solution chemistry under pasture and radiate pine in New Zealand[J]. *Plant Soi.*, 1997, **191**: 279–290.
- [31] SONG C H, WOODCOCK C E. A regional forest ecosystem carbon budget model: impacts of forest age structure and landuse history[J]. *Ecol. Model.*, 2003, **164**: 33–47.
- [32] ZINN Y L, DIMAS V S, RESCK J E, *et al.* Soil organic carbonas affected by afforestation with *Eucalyptus* and *Pinus* in the Cerrado region of Brazil[J]. *For. Ecol. Man.*, 2002, **166**: 285–294.
- [33] GRIGAL D F, BERGUSON W E. Soil carbon changes associated with short rotation systems[J]. *Biol. Bioeng.*, 1998, **14**(4): 371–377.
- [34] FINÉR L, MANNERKOSKI H, PIIRAINENS, *et al.* Carbon and nitrogen pools in an old-growth Norway spruce mixed forest in eastern Finland and changes associated with clear-cutting[J]. *Forest Ecology and Management*, 2003, **174**(1): 51–63.