

黄土丘陵区刺槐、辽东栎林生态系统碳汇功能特征

孙美美¹, 宋变兰², 时伟宇³, 山中典和⁴, 李国庆², 杜盛²

(1.西北农林科技大学 林学院, 陕西 杨凌 712100;

2.中国科学院 水利部 水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100;

3.西南大学 地理科学学院, 重庆 400715; 4.日本鸟取大学 干燥地研究中心, 日本 鸟取 680—0001)

摘 要:保护自然植被和营造人工植被是黄土高原植被恢复的重要措施,为定量阐明该区域典型植被类型的生态服务功能,合理评估不同恢复植被措施的生态效益,选取了两种典型森林生态系统(刺槐人工林和辽东栎天然次生林),基于多年连续调查数据分析了其碳汇功能特征。采用以胸径和树高为基础变量的生物量方程估算了乔木层生物量;采用样方收获法测算了灌木、草本和凋落物现存量;依据两次样地调查的数据(间隔 9 年)和连续多年凋落物收集的数据,估算了两种森林生态系统的净初级生产力和固碳速率;再结合对两种林地土壤 CO₂ 排放的监测与分析结果进一步估算了两种生态系统的碳汇功能。结果表明:刺槐林的生物量碳密度(67.63 t C/hm²)略低于辽东栎林(76.85 t C/hm²),林分内各组分碳密度仅在乔木叶部分差异显著。研究期间刺槐林和辽东栎林的生物量年均增长量分别为 15.20、18.21 t/(hm²·a);植被层年均固碳量分别为 7.57、8.91 t C/(hm²·a)。因刺槐林地的土壤异养呼吸速率低于辽东栎林地,故其碳汇功能相对较高。

关键词:黄土丘陵区;净初级生产力;固碳速率;碳汇功能

中图分类号:S718.5

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)02-0055-07

Characteristics of Carbon Sink in Black Locust Plantation and Oak Natural Secondary Forest in Loess Hilly Region

SUN Meimei¹, SONG Bianlan², SHI Weiyu³, YAMANAKA Norikazu⁴, LI Guoqing², DU Sheng²

(1.College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and

Water Conservation, CAS & MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3.School of Geographical Science, Southwest

University, Chongqing 400715, China; 4.Arid Land Research Center, Tottori University, Tottori 680—0001, Japan)

Abstract: Protecting natural vegetation and establishing artificial vegetation are important measures for vegetation restoration in the Loess Plateau. To quantitatively evaluate the ecological services and benefits of different vegetation restoration measures in this area, we investigated the characteristics of carbon sink in two typical forest ecosystems, a plantation of black locust (*Robinia pseudoacacia*) and a natural secondary oak (*Quercus liaotungensis*) forest. The status of biomass carbon and its annually balance in the two forest ecosystems were estimated based on successive survey data for multiple years. Tree biomass including stems, branches, leaves, and roots was estimated by using the allometric biomass equations previously constructed based on diameter at breast height and tree height. Biomass of shrubs, herbs, and litter was estimated by harvesting small subplots. Biomass carbon sequestration rate and net primary productivity were calculated according to the data of twice plot surveys of nine-year interval and litter collections of successive years. In addition to the measurements and the projected results for soil CO₂ emissions, the carbon sink functions of the two ecosystems were evaluated. The results showed that the biomass carbon density in black locust plantation (67.63 t C/hm²) was slightly lower than that in oak forest (76.85 t C/hm²), and the differences in carbon density of corresponding components between the two forest types were not statistically significant except for that in the tree leaves; the annual increments of biomass in black locust plantation and oak forest

收稿日期:2019-04-22

修回日期:2019-06-02

资助项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0504601);国家自然科学基金(41411140035,41171419)

第一作者:孙美美(1991—),女,河南洛阳人,博士研究生,研究方向为森林生态、流域生态与管理。E-mail:sunmeimei2014@126.com

通信作者:杜盛(1965—),男,内蒙古鄂尔多斯人,博士,研究员,主要从事森林生态、流域生态与管理研究。E-mail:shengdu@ms.iswc.ac.cn

were 15.20 and 18.21 t/(hm² · a), respectively, and the annual carbon sequestration rates in the vegetation layer were about 7.57 and 8.91 t C/(hm² · a), respectively; meanwhile, as soil heterotrophic respiration rate in black locust plantation was lower than that in oak forest, the carbon sink function of black locust plantation was relatively higher.

Keywords: loess hilly region; net primary productivity; carbon sequestration rate; carbon sink

黄土丘陵区是典型的生态脆弱区,其生态环境的动态变化历来受到广泛关注。近年来,随着多项大型生态工程的实施,原有的自然植被大幅度恢复,同时新建了多种人工植被,生态环境得到了较大程度的改善。这些植被在发挥水土保持功能的同时,也产生了固碳释氧等生态效益。在全球气候变化背景下,森林生态系统在调节陆地碳平衡方面的作用越来越突出^[1-2]。黄土丘陵区不断恢复的人工林和天然次生林不仅在改善地区生态环境方面发挥着重要作用,而且也是该地区陆地生态系统碳库的重要组成部分^[3]。

近年来,我国学者对森林植被碳储量及其分配、固碳速率和碳汇能力的研究已有广泛报道^[4-5]。森林作为陆地生态系统的主体,其碳汇能力为 163.4 Tg C/a,对陆地生态系统的贡献率高达 80%^[6]。我国的天然林保护工程在 1998—2002 年期间平均固碳速率为 1.41 t C/(hm² · a)^[7]。许多学者也通过不同的方法对不同地区和不同植被的生产力进行了研究,其中谢宝妮^[8]、王钊^[9]等通过 MOD17A3 模型分别模拟分析了黄土高原和陕西省一段时期内的植被生产力状况;杨凤萍等^[10]利用树木年轮宽度方法推算了秦岭地区油松和华山松在 1973—2011 年的平均年净生产力分别为 4.18、3.2 t/(hm² · a);杜虎等^[11]采用样木回归分析法(乔木)和样方收获法(林下植被)分析了中国南方 3 种主要人工林(杉木、马尾松、桉树)在 5 个不同林龄阶段的生产力动态特征,认为 3 种人工林的生产力均较高,分别为 12.37、8.98、21.10 Mg/(hm² · a)。本文定量研究黄土丘陵区两种典型森林生态系统(刺槐人工林和辽东栎天然次生林)的固碳速率、碳汇功能和生产力特征,有利于准确了解森林生态系统植被碳库动态,能够为该地区植被恢复和环保政策的制定以及遥感模型的发展应用提供基础数据。

目前,对森林生态系统固碳速率和生产力特征的研究较多采用空间代替时间法^[12]、限制因子法^[13]和情景分析模型模拟法^[10,14],采用长期连续监测固定样地方法的较少。本研究以黄土丘陵区刺槐(*Robinia pseudoacacia*)人工林和辽东栎(*Quercus liaotungensis*)天然次生林为对象,通过对长期连续监测数据进行分析,估算生态系统的碳库特征和固碳速率,并探讨这两种森林类型的成熟林是否仍然持续发挥碳汇

功能等问题,以期为该地区人工林和天然林的经营管理提供基础理论参考。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

本研究区域位于陕西省延安市南郊公路山林区(109°31.53'E, 36°25.40'N),海拔高度为 1 245 ~ 1 395 m,属于森林—森林草原过渡带,地貌类型属于黄土丘陵沟壑区,主要土壤类型为黄绵土,气候属于温带半干旱气候区。延安市气象台的统计资料(1981—2010 年)显示,平均年降水量 515.8 mm,年均气温 10.3℃。辽东栎林是该区典型的天然植被,林内伴生种有山杏(*Ameniaca sibirica*)、大果榆(*Ulmus macrocarpa*)等,林下灌木主要有水栒子(*Cotoneaster multiflorus*)、小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)、黄蔷薇(*Rosa hugonis*)、紫丁香(*Syringa oblata*)等。而刺槐林为该区域内主要的人工林植被,林下灌草稀疏杂生。刺槐人工林和辽东栎天然次生林两种林型均无人工管理。

1.2 研究方法

1.2.1 调查样地设置 选择研究区内典型的刺槐人工林和辽东栎天然林为研究对象,设置立地条件和密度具有一定代表性的样地各 3 块,样地间距约为 0.5~1.5 km,其中两种林地各有 1 个样地(R₁和 Q₁)为 2002 年设置的长期固定监测样地,样地规格为 20 m×20 m;其他样地为 2013 年调查时设置,规格为 20 m×40 m。样地基本信息见表 1。

1.2.2 野外调查及样品采集

(1) 乔木的调查与采样。样地设置时,对样地内所有胸径大于 5 cm 的乔木进行每木检尺,并在胸径测定处做永久标记,以后于每年的生长季结束后(10 月底)进行一次胸径和树高的测定。在 2013 年生长季内,在各样地附近按大、中、小径级分别选择 3~5 株样木,分叶、枝、干、根 4 个器官取样,将相同器官的样品混合,再取各器官不少于 200 g 重量的混合样带回实验室作为测定碳含量样品待处理分析。

(2) 灌木、草本和凋落物现存量的调查与采样。固定样地 R₁和 Q₁的灌木调查是在样地边缘选取与样地内植被状况一致的 3 块 2 m×2 m 的样方,而

在其他4个样地内则是沿对角线设置3个灌木样方(2 m×2 m),调查样方内灌木种类,全部收获后分叶、枝、根称鲜重,将3个小样方内枝、叶、根分别混合均匀后各取不少于300 g的混合样;在每个灌木样方内设置一个1 m×1 m草本样方,分地上与地下部

分收获后称鲜重并取样;凋落物现存量的调查是将1 m×1 m样方内的凋落物全部收获后称鲜重并取重量不少于300 g的样品。将灌木、草本和凋落物的样品称鲜重后带回实验室进行含水量和碳含量的分析测定。

表 1 样地基本信息

树种	样地 编号	样地 面积/m ²	坡度/ (°)	坡向	林分密度/ (株·hm ⁻²)	平均 胸径/cm	平均 树高/m	树干基面积/ (m ² ·hm ⁻²)	最大 树龄/a
刺槐	R ₁	400	24.5	SE	3572	10.2±3.0	7.9±2.2	31.5	38
	R ₂	800	13.5	SE	2494	11.2±3.7	8.7±2.2	26.8	38
	R ₃	800	26	SWW	1697	10.9±3.6	8.4±2.1	17.5	38
辽东栎	Q ₁	400	22	NEN	1429	13.3±5.2	6.1±2.2	22.9	66
	Q ₂	800	20	SWW	1383	13.4±5.6	8.3±2.2	22.9	73
	Q ₃	800	10	NEE	914	13.9±8.2	9.0±2.6	20.2	77

注:表中胸径和树高数值表示为平均值±标准差;密度和基干面积按投影面积计算,数据为2013年调查数据。

(3) 凋落物的收集。本文凋落物生产量数据采用从2002年8月—2012年10月10年间的观测数据。分别在R₁和Q₁两个固定样地内均匀布设10个50 cm×50 cm的凋落物收集框,离地高度约50 cm。每月月底采集一次凋落物,带回实验室置于65℃下烘干至恒重,称重。

(4) 细根采样调查。采用土钻法,在样地的上、中、下部位分别设置若干个采样点,采集0—20 cm, 20—40 cm的土芯10个,将采集的样品尽快带回实验室,用流动水浸泡、漂洗,挑出直径<2 mm的细根。根据外形、颜色和弹性区分死根和活根,风干后称重,并取一定质量的样品在65℃烘箱中烘干至恒重,得干重率,换算出单位面积细根的生物量。

1.2.3 室内样品处理与分析测定 将野外采集的乔

木各组分、灌木各组分、草本及凋落物样品置于65℃烘箱烘至恒重测得含水量。用于植物有机碳含量测定的烘干样品需磨碎过0.25 mm筛。每个样地的待测样品均包括以下10部分:乔木的叶、枝、干、根,灌木的叶、枝、根,草本的地上、地下部分以及凋落物。植物样品有机碳含量测定采用重铬酸钾—硫酸氧化外加热法。

1.2.4 各指标的计算

(1) 乔木层各组分生物量。根据针对两种森林生态系统已有的相关研究成果等文献资料,选择临近本研究区域的生物量回归方程。其中刺槐和辽东栎乔木生物量估算分别采用张柏林等^[15-16]在这一地区建立的生物量回归方程(表2)。由胸径和树高求得单株乔木各组分(干、枝、叶、根)的生物量,进而求得整株的生物量以及全样地乔木生物量。

表 2 刺槐与辽东栎生物量回归方程

树种	组分	生物量回归方程	相关系数	精度/%	胸径幅度/cm	树高幅度/m
刺槐 ^[15]	干	$W=0.02583(D^2 \cdot H)^{0.95405}$	0.98987	97.8	4.0~16.0	6.4~14.2
	枝	$W=0.00464(D^2 \cdot H)^{3.21307}$	0.97819	90.6		
	叶	$W=0.02340(D^2 \cdot H)^{1.92768}$	0.95459	92.0		
	根	$W=0.01779(D^2 \cdot H)^{2.64480}$	0.93965	88.8		
辽东栎 ^[16]	干	$\ln W=0.85136\ln(D^2 \cdot H)-3.00984$	0.98438	99.4	4.0~16.0	2.8~12.0
	枝	$\ln W=3.09503\ln(D^2 \cdot H)-5.31497$	0.90348	95.0		
	叶	$\ln W=2.17397\ln(D^2 \cdot H)-3.98976$	0.89759	91.1		
	根	$\ln W=1.79711\ln(D^2 \cdot H)-1.93175$	0.89578	97.8		

注:W为生物量;D为胸径;H为树高。

(2) 灌木、草本及凋落物生物量。将所采样品带回实验室后置于65℃烘箱中,烘干至恒重,称重后计算样品的含水率,进而推算出样地内单位面积(hm²)灌木各器官(叶、枝、根)、草本地上和地下部分的生物量及凋落物量。

(3) 植被层各部分碳密度。两个森林生态系统中植被层各部分(乔木的干、枝、叶、根,灌木的叶、枝、

根,草本的地上、地下部分和凋落物)碳密度的计算采用各组分的生物量与其相对应碳含量的乘积。

(4) 净初级生产力。净初级生产力表示植被的净碳吸收,即为总初级生产力减去自养呼吸碳消耗的净碳积累部分。本研究基于样地2004年和2013年的两次调查数据来计算单位面积上乔木、灌木的干、枝、根各部分生物量增量,然后除以两次调查的间隔

年限,得到两个森林生态系统中乔、灌的年净增长量。乔木和灌木均为落叶阔叶树种,其叶的年增长量为现存量,由连续收集的凋落物算得。本地草本植物以一年生为主,可用当年的现存量作为年生产量,因此草本的年净增长量为生长高峰期的生物量。

(5) 固碳速率。后一次调查的生态系统总碳密度减去前一次调查的生态系统总碳密度,然后再除以两次调查相隔的年限,即为生态系统在这一段时间内的平均固碳速率。

(6) 土壤异养呼吸。土壤年异养呼吸速率采用本课题组在本研究固定样地内(R_1 和 Q_1) 逐月测定的相关数据(已发表)。通过对两固定样地 2010 年各月份土壤总呼吸和异养呼吸速率^[17] 进行回归分析并建立二者的回归方程,再结合两样地土壤总呼吸的年均排放量^[18] 计算获得两种林地土壤异养呼吸的年均排放总量。关于土壤呼吸的详细测定及计算方法见 Shi 等^[17-18]。

(7) 生态系统碳平衡。本文采用生态系统碳平衡来表述生态系统中碳的收支情况,本文指的是净初级生产力减去异养呼吸之后的部分,单位为 $t\ C/(hm^2 \cdot a)$ 。

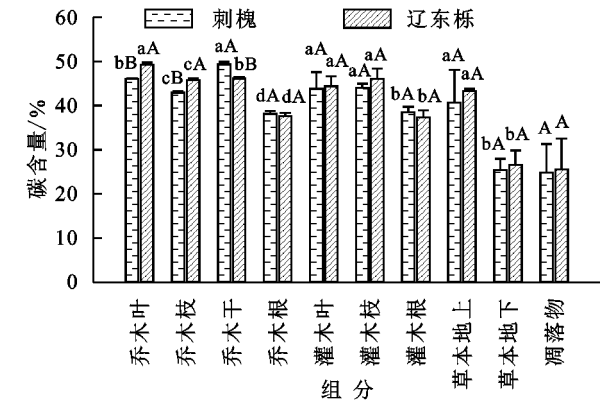
1.2.5 数据处理与分析 野外调查所得数据经 Excel 2010 简单整理之后,用 SPSS 20.0 进行分析,采用 SigmaPlot 12.5 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 黄土丘陵区刺槐人工林、辽东栎天然林植被层各组分碳含量

黄土丘陵区刺槐人工林乔木各器官的碳含量为 38.11%~49.33%,辽东栎天然林乔木各器官的碳含量范围为 37.64%~49.24%,二者的范围基本一致(图 1)。刺槐乔木各器官的碳含量表现为干>叶>枝>根,而辽东栎林为叶>干>枝>根。刺槐人工林的乔木各器官碳含量之间的差异均达到显著性水平,而辽东栎天然林中,乔木干和枝之间不存在显著性差异,它们分别与其他器官以及其他器官之间均存在显著差异。两个树种之间,乔木相对应的器官之间除根以外均有显著差异。

刺槐人工林和辽东栎天然林林下灌木层各器官的碳含量见图 1,两典型森林生态系统的灌木叶、枝的碳含量均显著高于灌木根,而灌木叶与枝之间的差异没有达到显著性水平。在总体水平上,两个树种之间,灌木相对应的各器官差异不大。两典型森林生态系统草地上部分的碳含量均高于地下部分(图 1),但是其差异在两个林型中均没有达到显著性水平。同样地,凋落物的碳含量在刺槐人工林和辽东栎天然林之间也没有显著差异。



注:小写字母代表同一植被层不同组分之间的差异显著,大写字母代表同一组分两个树种之间的差异显著,下同。

图 1 刺槐人工林与辽东栎天然林生态系统不同组分碳含量

2.2 黄土丘陵区刺槐人工林、辽东栎天然林植被层各组分碳密度

刺槐和辽东栎乔木各器官的碳密度见表 3,两林分中均为干的碳密度最大,分别为 31.4,40.1 t/hm^2 ,各器官的碳密度大小均表现为干>枝>根>叶。两林分乔木相对应各器官之间的差异表现为刺槐人工林叶的碳密度显著低于辽东栎天然林,其他各器官在两个林分之间均无显著差异。

两林分的灌木层不同器官的碳密度见表 3,灌木层各器官在两个林分之间不存在显著性差异,同一森林类型的灌木叶、枝、根之间差异显著。各器官中灌木枝的碳密度均为最大,灌木根次之,叶最小。刺槐人工林和辽东栎天然林灌木层的碳密度分别为 2.32,3.42 t/hm^2 。两种典型林分草本层碳密度之间没有显著差异,而辽东栎林草地上部分碳密度显著高于地下部分,人工刺槐林的草地上部分和地下部分之间差异不显著。两林分的凋落物碳密度之间也不存在显著差异。

表 3 刺槐人工林与辽东栎天然林植被层不同组分碳密度 t/hm^2

植物层	组分	刺槐人工林	辽东栎天然林
乔木层	叶	2.94±0.49cB	4.56±0.37cA
	枝	16.20±4.08bA	16.50±1.86bA
	干	31.40±8.91aA	40.10±9.77aA
	根	11.30±2.72bcA	8.70±0.74bcA
	合计	61.84±13.48A	69.90±8.05A
灌木层	叶	0.24±0.08cA	0.26±0.006cA
	枝	1.47±0.15aA	2.06±0.49aA
	根	0.61±0.03bA	1.10±0.27bA
	合计	2.32±0.17A	3.42±0.52A
草本层	地上部分	0.24±0.18aA	0.06±0.04bA
	地下部分	0.51±0.30aA	0.60±0.26aA
	合计	0.75±0.39A	0.66±0.24A
凋落物层		2.72±0.51A	2.87±0.43A

注:小写字母代表同一植被层不同组分之间的差异显著,大写字母代表同一组分两个树种之间的差异显著。

2.3 黄土丘陵区刺槐、辽东栎林生态系统固碳速率和净初级生产力

黄土丘陵区刺槐人工林、辽东栎天然林生态系统植被层每年生产的生物量平均为 15.20, 18.21 t/(hm² · a) (表 4)。其中, 乔木层年增长量最高为刺槐人工林 10.64 t/(hm² · a) 和辽东栎天然林 12.20 t/(hm² · a), 其后各组分的增量依次为凋落物、灌木层和草本层, 其中草本层所占比例最小, 仅为 2.8% 和 2.3%。刺槐人工林和辽东栎天然林的生态系统植被层的年固碳量为 7.57, 8.91 t C/(hm² · a) (表 4), 其中乔木层最高, 分别占植被层的 63.8%, 65.6%。各组分在两典型森林生态系统中的贡献率一致, 表现为乔木层>凋落物层>草本层>灌木层。对比两森林生态系统得出, 辽东栎天然林生态系统各组分年固碳量除草本层基本一致外, 其他各组分均高于刺槐人工林。

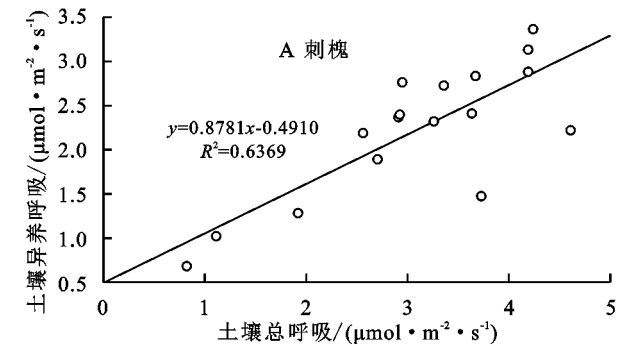


图 2 刺槐人工林与辽东栎天然林土壤呼吸特征

由表 5 可知, 刺槐人工林生态系统年净固碳量为 1.814 t C/(hm² · a), 而辽东栎天然林生态系统的年净固碳量为 0.966 t C/(hm² · a)。辽东栎林地的土壤异养呼吸量高于刺槐林地。刺槐人工林的年净固碳量为辽东栎林的 1.88 倍。

表 5 刺槐、辽东栎林生态系统碳平衡

生态系统	生物量	土壤异养	生态系统
	固碳速率	呼吸速率	
刺槐	7.569	5.756	1.814
辽东栎	8.912	7.946	0.966

3 讨论与结论

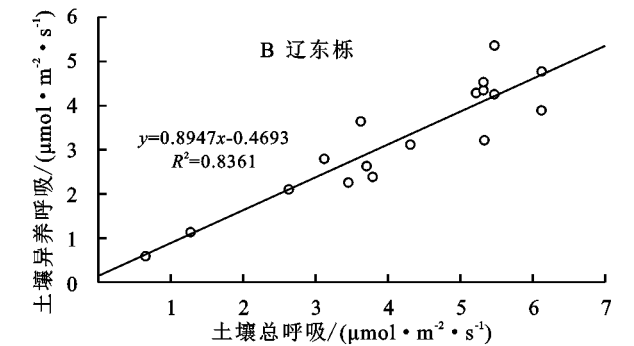
本研究中两典型森林生态系统乔木层相应各器官的碳含量之间均存在显著差异。刺槐人工林乔木层各器官的碳含量与之前的研究结果基本一致^[19]。而辽东栎林的林下灌木层、草本层的平均碳含量均高于刺槐林, 这可能与两林分不同的冠层结构及光合生态特性有关^[20]。另外, 两森林生态系统中垂直层次

表 4 刺槐、辽东栎林生态系统净初级生产力和固碳速率
t C/(hm² · a)

组分	刺槐		辽东栎	
	净初级 生产力	固碳 速率	净初级 生产力	固碳 速率
乔木层	10.64	4.83	12.20	5.85
灌木层	1.11	0.54	1.73	0.65
草本层	0.43	0.75	0.43	0.70
凋落物层	2.99	1.45	3.85	1.72
植被层(总)	15.20	7.57	18.21	8.91

2.4 黄土丘陵区刺槐、辽东栎的生态系统碳平衡

两生态系统中 2010 年逐月的土壤总呼吸与异养呼吸呈显著的线性相关关系($p<0.001$)。根据图 2 中回归分析得到的方程, 结合两树种样地内土壤总呼吸年平均排放量估算出刺槐人工林和辽东栎天然林的土壤异养呼吸年平均排放总量为 5.756, 7.946 t C/(hm² · a)。辽东栎林地的土壤异养呼吸的年总排放量明显高于刺槐林地。



上各器官碳含量依次为乔木层>灌木层>草本层。乔木层叶片位于林冠上层, 能够接受到较长时间日照, 截获更多的能量, 促进植物光合作用积累较多的有机物质, 因而碳含量较高^[21]。从整个植被层来看, 刺槐人工林的碳密度为 67.53 t/hm², 辽东栎天然次生林为 76.89 t/hm², 均高于同一地区立地条件相近的相同林分^[15, 22-23]和中纬度国家森林的平均植被碳储量 57 t/hm²^[24]。本研究结果高于陕西省栎类和硬阔类的碳密度^[25], 可能是由于计算方法以及林龄不同造成的差异。本研究结果明显高于西北地区植被碳密度^[26] (42.82 t/hm²) 和我国的森林植被碳密度^[27] (41.00 t/hm²), 这可能是因为本研究中涉及样地的林龄偏大, 且林分密度较大。

净初级生产力是反映森林生态系统同化 CO₂ 能力的重要指标^[28], 本研究中刺槐林和辽东栎林生态系统植被层每年生产的干物质量分别为 15.20, 18.21 t/(hm² · a), 高于前人的其他研究^[15-16]。辽东栎林的生物量年增长量高于刺槐林, 与张希彪等^[29] 研究报道的刺槐林生物量年增长量高于辽东栎林的结果

刚好相反,这可能是由于林龄、立地条件以及计算方法不同造成的,另外植物所处环境及群落格局都会影响其生长,群落结构也是影响森林生态系统生产力的一个因素^[30]。本研究得出刺槐林和辽东栎林植被层的固碳速率分别为 $6.12, 7.19 \text{ t C}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 高于相关研究^[7,31]。地形、海拔和坡度等环境因子是影响阔叶林固碳的重要因素,这些因子不同时其所处位置的水分、养分、光照和土壤条件也不同,从而引起不同地区之间固碳速率存在很大差异^[32]。

净生态系统生产力能够直接度量生态系统和大气之间 CO_2 交换的状况,是表征生态系统碳汇功能的重要指标,能够直观评价生态系统的碳源汇功能^[33]。本研究中刺槐林和辽东栎林的年净固碳量分别为 $1.814, 0.966 \text{ t C}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,辽东栎林的固碳量要高于刺槐林,但是其土壤异养呼吸量也高于刺槐林,使得刺槐林的年净固碳量约为辽东栎林的 1.88 倍。本研究结果低于杨凤萍等^[10]在秦岭火地塘林区内对油松和华山松的估算结果 $[4.18, 3.2 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})]$,这可能是因为火地塘林区内降雨量充沛且温度适宜有利于油松和华山松生长,而在陕北黄土高原地区水、肥因子是各类型生态系统的主要限制因子^[34]。刺槐林的年净固碳量与延安地区植被同一时期内的研究结果基本一致 $[2.0 \sim 3.0 \text{ t C}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})]$ ^[9],而辽东栎林则略低于这些研究结果。说明刺槐成熟林生态系统在本研究区域内仍然表现为重要的碳汇,因此在生态环境脆弱的黄土丘陵地区应加强对刺槐人工林的经营管理,以充分地发挥其生态功能,更好地改善当地生态环境。

目前,我国对森林碳汇的研究工作开展了很多,但是由于计算方法的不同且其受影响的自然和人为因素众多,使得估算结果存在较大差异^[35]。本研究中估算的刺槐人工林和辽东栎天然林着重考虑的是地上生产力和碳汇功能,没有考虑细根生产力的影响,使得本研究结果可能会低估这两种森林类型的生产力和碳汇功能。森林生物量清查法作为传统的估算方法而被人们所普遍接受,为提高估算结果的准确性,应建立起统一的标准规范,在该规范下进行更精细的研究^[36-37]。然而,每一种估算方法都有其不同的侧重和局限性,如何综合应用多种方法降低误差,更准确地估算森林碳汇,为碳循环模型和区域尺度碳平衡的估算提供更可靠的数据支撑是今后研究工作的要点。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Zhang C H, Ju W M, Chen J M, et al. Sustained biomass carbon sequestration by China's forests from 2010 to 2050 [J]. *Forests*, 2018, 9 (11). DOI: 10.3390/f9110689.
- [3] 宋变兰,关晋宏,杜盛.黄土丘陵区刺槐、辽东栎林碳氮密度及其分配特征[J].水土保持研究,2016,23(4):55-59,65.
- [4] Tang X L, Zhao X, Bai Y F, et al. Carbon pools in China's terrestrial ecosystems: New estimates based on an intensive field survey[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115 (16):4021-4026.
- [5] Wang K B, Hu D F, Deng J, et al. Biomass carbon storages and carbon sequestration potentials of the Grain for Green Program-Covered Forests in China[J]. *Ecology and Evolution*, 2018,8(15):7451-7461.
- [6] Fang J Y, Yu G R, Liu L L, et al. Climate change, human impacts, and carbon sequestration in China INTRODUCTION[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115 (16): 4015-4020.
- [7] 胡会峰,刘国华.中国天然林保护工程的固碳能力估算[J].生态学报,2006,26(1):291-296.
- [8] 谢宝妮,秦占飞,王洋,等.黄土高原植被净初级生产力时空变化及其影响因素[J].农业工程学报,2014,30 (11):244-253.
- [9] 王钊,李登科.2000—2015 年陕西植被净初级生产力时空分布特征及其驱动因素[J].应用生态学报,2018,29 (6):1876-1884.
- [10] 杨凤萍,胡兆永,侯琳,等.秦岭火地塘林区油松和华山松林乔木层净生产力与气候因子的关系[J].生态学报,2014,34(22):6489-6500.
- [11] 杜虎,曾馥平,王克林,等.中国南方 3 种主要人工林生物量和生产力的动态变化[J].生态学报,2014,34(10): 2712-2724.
- [12] Shi X Z, Wang H J, Yu D S, et al. Potential for soil carbon sequestration of eroded areas in subtropical China[J]. *Soil & Tillage Research*, 2009,105(2):322-327.
- [13] Zhou G S, Wang Y H, Jiang Y L, et al. Estimating biomass and net primary production from forest inventory data:a case study of China's *Larix* forests[J]. *Forest Ecology and Management*, 2002,169(1/2):149-157.
- [14] 黄玫,侯晶,唐旭利,等.中国成熟林植被和土壤固碳速率对气候变化的响应[J].植物生态学报,2016,40(4): 416-424.
- [15] 张柏林,陈存根.长武县红星林场刺槐人工林的生物量

- 和生产量[J].陕西林业科技,1992(3):13-17.
- [16] 张柏林.子午岭地区辽东栎林生物生产量的研究[J].西北林学院学报,1990,5(1):1-7.
- [17] Shi W Y, Zhang J G, Yan M J, et al. Seasonal and diurnal dynamics of soil respiration fluxes in two typical forests on the semiarid Loess Plateau of China: Temperature sensitivities of autotrophs and heterotrophs and analyses of integrated driving factors[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2012,52:99-107.
- [18] Shi W Y, Yan M J, Zhang J G, et al. Soil CO₂ emissions from five different types of land use on the semiarid Loess Plateau of China, with emphasis on the contribution of winter soil respiration[J]. *Atmospheric Environment*, 2014,88:74-82.
- [19] 艾泽民,陈云明,曹扬.黄土丘陵区不同林龄刺槐人工林碳、氮储量及分配格局[J].应用生态学报,2014,25(2):333-341.
- [20] 宋变兰.黄土丘陵区两典型森林生态系统生物量、碳氮库和碳固存特征研究[D].陕西杨凌:中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心,2015.
- [21] 黄松殿,吴庆标,廖克波,等.观光木人工林生态系统碳储量及其分布格局[J].生态杂志,2011,30(11):2400-2404.
- [22] 韩娟娟,程积民,万惠娥,等.子午岭辽东栎群落碳储量研究[J].西北林学院学报,2010,25(5):18-23,156.
- [23] 贺亮,苏印泉,季志平,等.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[J].西北林学院学报,2007,22(4):49-53.
- [24] Dixon R K, Brown S, Houghton R A, et al. Carbon pools and flux of global forest ecosystems[J]. *Science*, 1994,263(5144):185-190.
- [25] 崔高阳,陈云明,曹扬,等.陕西省森林生态系统碳储量分布格局分析[J].植物生态学报,2015,39(4):333-342.
- [26] 李海奎,雷渊才,曾伟生.基于森林清查资料的中国森林植被碳储量[J].林业科学,2011,47(7):7-12.
- [27] 方精云,郭兆迪,朴世龙,等.1981—2000年中国陆地植被碳汇的估算[J].中国科学 D 辑:地球科学,2007,37(6):804-812.
- [28] 方精云,柯金虎,唐志尧,等.生物生产力的“4P”概念、估算及其相互关系[J].植物生态学报,2001,25(4):414-419.
- [29] 张希彪,上官周平.黄土丘陵区主要林分生物量及营养元素生物循环特征[J].生态学报,2005,25(3):527-537.
- [30] 谭凌照,范春雨,范秀华.吉林蛟河阔叶红松林木本植物物种多样性及群落结构与生产力的关系[J].植物生态学报,2017,41(11):1149-1156.
- [31] 刘迎春,王秋凤,于贵瑞,等.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[J].生态学报,2011,31(15):4277-4286.
- [32] 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.
- [33] Schulze D E, Wirth C, Heimann M. Climate change-managing forests after Kyoto[J]. *Science*, 2000,289(5487):2058-2059.
- [34] 郝文芳,梁宗锁,韩蕊莲,等.黄土高原不同植被类型土壤特性与植被生产力关系研究进展[J].西北植物学报,2002,22(6):1545-1550.
- [35] 关晋宏,杜盛,程积民,等.甘肃省森林碳储量现状与固碳速率[J].植物生态学报,2016,40(4):304-317.
- [36] 毛子军.森林生态系统碳平衡估测方法及其研究进展[J].植物生态学报,2002,26(6):731-738.
- [37] 王兴昌,王传宽.森林生态系统碳循环的基本概念和野外测定方法评述[J].生态学报,2015,35(13):4241-4256.