

黄土丘陵区刺槐、辽东栎林碳氮密度及其分配特征

宋变兰^{1,3}, 关晋宏^{1,3}, 杜盛^{1,2}

(1. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:选取黄土丘陵区刺槐人工林和辽东栎天然次生林2个典型森林群落为研究对象,比较分析了各组分的有机碳和全氮含量与储量及分配特征。结果表明:刺槐和辽东栎林植被层的碳含量总体上呈现沿垂直方向的递减趋势,即乔木层>灌木层>草本层>凋落物层;不同器官部位的碳含量呈现为:叶、干>枝>根,草本层地上部碳含量高于地下部。氮含量变化趋势不显著。辽东栎林生态系统碳密度为165.86 t/hm²,高于刺槐林生态系统(138.93 t/hm²),而两者的氮密度差异不大。两生态系统碳氮密度的各部分排序为土壤>乔木层>凋落物层>林下植被层,土壤层(0—100 cm)的碳密度占生态系统碳库总量的51.1%~53.6%,而氮密度占71.4%~84.4%,表明控制水土流失对维持研究区的生态环境及土壤固碳潜力至关重要。

关键词:碳氮含量;碳氮密度;刺槐;辽东栎;生态系统;黄土丘陵区

中图分类号:S718.5

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2016)04-0055-05

Carbon and Nitrogen Densities and Their Allocation Characteristics in A Black Locust Plantation and An Oak Forest in the Loess Hilly Region

SONG Bianlan^{1,3}, GUAN Jinhong^{1,3}, DU Sheng^{1,2}

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water

Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F

University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: We examined the contents and distribution characteristics of organic carbon and total nitrogen in a black locust plantation and a natural oak forest in the semiarid loess hilly region. The results showed that: carbon contents in vegetation layers declined vertically in the order: arbor layer>shrub and herb layer>litter layer; leaf and stem>branch>root in arbor and shrub layers, whereas aboveground components>underground components in the herb layer. The ecosystem carbon density was higher in the oak forest (165.86 t/hm²) than that of the locust plantation (138.93 t/hm²). The ecosystem nitrogen density showed no significant differences between the two communities. The distribution of carbon and nitrogen densities ranked in the order: soil layer>arbor layer>litter layer>shrub and herb layers. The soil carbon density accounted for 51.1%~53.6% of the total ecosystem carbon density. The soil nitrogen density accounted for 71.4%~84.4% of the total ecosystem nitrogen density. The results suggest that controlling soil and water loss is important to maintain the ecological environment and soil carbon sequestration potential in this area.

Keywords: carbon and nitrogen contents; carbon and nitrogen densities; Black locust plantation; Oak forest; Loess hilly region

黄土丘陵区是我国典型生态脆弱区,其生态环境的变化一直以来都倍受关注。近年来,随着退耕还林还草工程的持续开展,黄土高原丘陵区生态环境得到较大程度改善,但是水土流失、土地退化和沙化问题

依然严重^[1]。

森林是陆地生态系统的主体,不仅在涵养水源、保持水土、净化空气、保护生物多样性等维持森林生态系统生态服务功能方面发挥着重要的作用,而且在

生长过程中从大气吸收并贮存大量的 CO₂，在全球碳循环中起着举足轻重的作用，是陆地生态系统中最大的碳库^[2-4]。我国森林生态系统的总碳库约为 28.12 Gt C，其中，植被碳库和凋落物层分别占 22.2% 和 3.2%，土壤碳库占 74.6%，平均碳密度为 258.83 Mg C/hm²^[5]。在陆地生态系统中，碳和氮的耦合协同决定着生态系统的结构和功能^[6]，二者相互作用对森林生态系统的生产力、固碳潜力及稳定性都有关键影响^[7-8]。因此，准确掌握森林生态系统植被碳氮库动态，对于陆地增汇及缓解温室效应具有重要意义。森林生态系统的人工重建(人工造林)和天然修复(天然次生)是黄土丘陵区生态恢复的重要途径，人工林和天然次生林不仅会改善生态环境，同时也能有效发挥其增汇功能，进而影响全球碳氮循环。在全球变化背景下，研究黄土高原半干旱区森林生态系统的生物量、碳氮素及其密度的分配特征，对于黄土区植被恢复与生态环境保护政策制定，以及我国乃至全球碳平衡和人类活动对全球气候变化的影响研究均具积极的辅助支持作用。

人工刺槐林和天然辽东栎次生林是黄土高原半干旱区的典型森林生态系统^[9-10]，对该地区生态环境的恢复至关重要。本文选择黄土高原半干旱区的刺槐林和辽东栎林为研究对象，对比分析两森林生态系统碳氮含量、密度及其分配特征，旨在为定量评价当地及类似地区乃至全国的森林固碳和养分循环研究提供基础数据，对该区植被恢复具有一定的现实指导意义。

1 试验材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于陕西省延安市南郊公路山林区，中心地理坐标为 109°31.53'E, 36°25.40'N，海拔约 1 245 ~ 1 395 m。该区地貌属于黄土高原丘陵沟壑区，地形

复杂，沟壑纵横；气候属温带半干旱气候区，冬春寒冷干旱，夏秋温暖多雨。该地区年平均降水量为 515.8 mm，其中 6—9 月份降水量约占全年降水量的 71.8%，年平均气温为 10.3℃(1981—2010)。土壤类型以黄绵土为主，长期水土流失作用下地带性土壤黑垆土仅零散分布，土壤保水保肥能力较差，缺乏有机质和矿物养分。该区属温带落叶阔叶林区向温带草原区的过渡地带。植物区域组成有典型的北温带性质，并呈现华北特征。

森林类型以栎类为主，其次为松、柏、杨以及桦林。目前区内天然植被破坏较为严重，现存天然植被中辽东栎(*Quercus liaotungensis* Koidz.)次生林分布最为广泛，为该区顶级森林群落。人工林则多数营造于 20 世纪七、八十年代，主要造林树种有刺槐(*Robinia pseudoacacia* L.)、小叶杨、油松等，刺槐林种植面积最大。林下灌木包括小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla* Lam.)、水栒子(*Cotoneaster multiflorus* Bunge.)、紫丁香(*Syringa oblata* Lindl.)、黄蔷薇(*Rosa hugonis* Hemsl.)等。草本植物主要有白羊草(*Bothriochloa ischcemum* (L.) Keng)、铁杆蒿(*Artemisia sacrorum* Ledeb.)等。

1.2 样地设置与调查

选择研究区典型森林生态系统刺槐林和辽东栎林为研究对象，按立地条件一致的原则，于 2013 年 8 月在研究地内设置 6 个面积为 20 m×40 m 的样地，刺槐和辽东栎各 3 个。样地间距至少在 0.5~1.0 km 以上，样地基本概况详见表 1。每个样地内沿对角线设置 3 个 2 m×2 m 的灌木样方、3 个 1 m×1 m 的草本和凋落物样方。调查内容包括海拔、经纬度、地形、土壤类型以及乔木层、灌木层、草本层和凋落物的生物量。同时在每个样地内各选一个坡面稳定并能代表样地内最大面积坡面特征的样点挖 0—100 cm 土壤剖面。

表 1 研究区样地特征

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

注：表中胸径和树高数值表示为：平均值±标准差；密度和树干基面积按投影面积计算。

1.3 样品采集与处理

1.3.1 样品采集 对乔木样方内所有胸径(DBH)≥5 cm 立木进行每木检尺，记录树高和 DBH，按大、

中、小径级选择 3~5 株样木，分叶、枝、干、根 4 个器官取样，同器官混合成一个样品，各器官分别取样(约 300 g)。灌木样方内所有灌木(DBH<5 cm，高度>50 cm

植被)全部收获后分叶、枝、根称鲜重并记录,将 3 个样方内枝、叶、根分别混合均匀后取样(约 300 g)称鲜重记录。草本样方内所有草本全部收获后,分地上部分和地下部分称重并记录,并分别均匀取样(约 300 g)称鲜重记录。样方内的所有凋落物收集并称重记录。

土壤调查采用剖面法和土钻法。在调查样地内选择代表性地段挖取土壤剖面,按照 0—10,10—20,20—30,30—50,50—70,70—100 cm 分层进行环刀取样以测容重;在样地内,使用内径 6cm 的土钻,在每个草本样方附近按 0—10,10—20,20—30,30—50,50—70,70—100 cm 随机钻取 6 钻土,将同一层土样按质量比例混合后带回实验室经处理后以测土壤有机碳和全氮含量,取样时尽量保持每个小土体的完整性。

1.3.2 样品处理 对采集的植物样品及凋落物,105℃ 杀青后置于 80℃ 的恒温箱中烘至恒重,采用 3 次粉碎法并过 0.25 mm 筛,测定其碳氮含量。土壤样品自然风干后剔除杂物,采用四分法,研磨并过 0.25 mm 筛,装袋用于测定土壤有机碳和全氮含量。

所有植物及土壤样品有机碳于 2013 年 10 月采用重铬酸钾—硫酸氧化法(GB7857—87)测定,全氮采用凯氏法(GB7173—87)应用 FOSS 8400 全自动定氮仪测定。

1.4 数据处理与分析

1.4.1 生物量计算 刺槐和辽东栎林乔木生物量估算分别采用这一地区已建立的生物量回归方程(表 2)^[11-12]。所选方程符合研究区刺槐和辽东栎的生长特点,可较准确的估算其乔木生物量。单株乔木生物量为基于胸径和树高求得的单株乔木各组分(干、枝、叶和根)生物量之和,样地乔木生物量则由样地内所有乔木生物量求和所得。

林下植被层和凋落物生物量计算过程为:先由所取样品干重计算出灌木和草本不同组分及凋落物层的含水率,再由含水量乘以相应的鲜重得出灌木层、草本层和凋落物单位面积的生物量。

生态系统的生物量为乔木层、灌木层、草本层和凋落物层 4 部分生物量之和。

1.4.2 碳氮密度计算 植被层及凋落物层碳氮库密度为各组分生物量和相应碳氮含量的乘积。乔木层的碳氮密度按叶、枝、干、根 4 个组分的碳氮密度累加,灌木层的碳氮密度按叶、枝及根的累加,草本层的按地上部分和地下部分累加而成,凋落物层的按样方凋落物生物总量与及其碳氮含量的乘积估算。土壤层碳氮密度按每层土壤碳氮含量的累加,单层土壤碳氮密度为容重、对应剖面深度及其有机碳/氮含量的三者乘积。乔木层、灌木层、草本层、现有凋落物以及

土壤碳氮密度的总和为生态系统的碳氮密度。生态系统碳氮密度计算公式如下:

$$C_T=C_i+C_b+C_h+C_l+C_s$$

式中: C_T 为生态系统碳氮密度(t/hm^2); C_i 为乔木碳氮密度(t/hm^2); C_b 为灌木碳氮密度(t/hm^2); C_h 为草本碳氮密度(t/hm^2); C_l 为现有凋落物碳氮密度(t/hm^2); C_s 为土壤碳氮密度(t/hm^2)。

表 2 主要优势树种生物量回归方程^[11-12]

树种	分量	生物量回归方程	相关系数	精度(%)
刺槐	干	$W=0.02583(D^2H)^{0.95405}$	0.98987	97.8
	枝	$W=0.00464(D^2H)^{3.21307}$	0.97819	90.6
	叶	$W=0.02340(D^2H)^{1.92768}$	0.95459	92.0
	根	$W=0.01779(D^2H)^{2.64480}$	0.93965	88.8
辽东栎	干	$W=0.49300(D^2H)^{0.85136}$	0.98438	99.4
	枝	$W=0.00492(D^2H)^{3.09503}$	0.90348	95.0
	叶	$W=0.01850(D^2H)^{2.17397}$	0.89759	91.1
	根	$W=0.14489(D^2H)^{1.79711}$	0.89578	97.8

注: W 为生物量(g); D 为胸径(cm); H 为树高(cm)。

1.4.3 数据处理分析 所有测算数据采用 SPSS 16.0 进行单因素方差分析(One-way ANOVA)和最小显著差数法(LSD)比较($p<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 刺槐林和辽东栎林碳氮含量分配

刺槐林和辽东栎林生态系统各植被层的平均碳分配具有相似特征,即总体上碳含量的大小顺序是乔木层>灌木层>草本层>凋落物层(表 3)。与碳含量分配不同,刺槐林生态系统中各乔木层、灌木层、草本层及凋落物层的平均氮含量比较接近,变化范围是 1.39%~1.81%;而辽东栎林生态系统中平均氮含量的大小顺序为乔木层>林下植被层(草本层、灌木层)>凋落物层,变化范围是 0.81%~1.33%。

在同一植被层下各器官的碳含量总体上具体沿垂直方向呈减少的趋势。例如,刺槐林和辽东栎林乔木层、灌木层的碳含量都呈现叶>干>枝>根,而两生态系统草本层地上部的碳氮含量显著高于地下部。就氮含量而言,在同一植被层下也呈现叶明显高于其他器官的现象。这与植物生理生长的特性吻合,即就对碳和氮素的同化能力而言,植物的地上器官相对强于地下器官。

研究区植被层不同组分碳含量的均值总体上呈现沿垂直方向的递减趋势,即乔木层>灌木层>草本层>凋落物层。氮含量这一趋势不明显。灌木层各组成碳氮含量明显低于乔木相对应的各组分含量,这可能是植被层碳氮含量除了与林下植被种类有关外,

还与林下环境条件密切相关。乔木层叶片处于林冠上部,有较长的日照时间和充足的光能,从而可以截获较多太阳能,有利于植物的光合作用,合成、积累较多的有机质,因而碳氮含量较高;而灌木层叶片处于

荫蔽生境,光照不仅在强度上减弱,而且在光质成分上也与林冠层不同,最重要的区别是林下光照中生理辐射光显著减少,因此,光合强度低弱,有机物合成、积累少,碳含量低^[13-14]。

表 3 两典型林分乔木层各组分碳含量

林分类型	组分	刺槐人工林		辽东栎天然次生林	
		碳含量/%	氮含量/%	碳含量/%	氮含量/%
乔木层	叶	46.04±0.16	2.85±0.02	49.24±0.49	2.18±0.02
	枝	42.91±0.40	1.66±0.02	45.71±0.44	0.67±0.01
	干	49.33±0.58	1.52±0.01	46.12±0.41	0.65±0.01
	根	38.11±0.68	2.12±0.01	37.64±0.70	0.70±0.01
	平均	45.36	1.74	44.36	0.81
灌木层	叶	43.78±3.80	2.25±0.32	44.39±2.20	1.86±0.17
	枝	44.05±0.90	1.21±0.23	46.07±2.31	0.89±0.15
	根	38.47±1.24	1.418±0.44	37.34±1.60	1.03±0.24
	平均	42.50	1.39	42.74	1.01
草本层	地上部分	40.66±7.44	2.72±0.21	43.32±0.46	1.51±0.04
	地下部分	25.37±2.60	1.44±0.10	26.55±3.31	0.80±0.00
	平均	29.78	1.81	34.93	0.84
凋落物层		24.82±6.49	1.49±0.25	25.53±7.04	1.33±0.40

注:不同层间各组分碳氮含量表示为:平均值±标准差;各层间平均值为按各部分生物量权重的加权平均。

2.2 刺槐林和辽东栎林不同器官碳氮密度差异

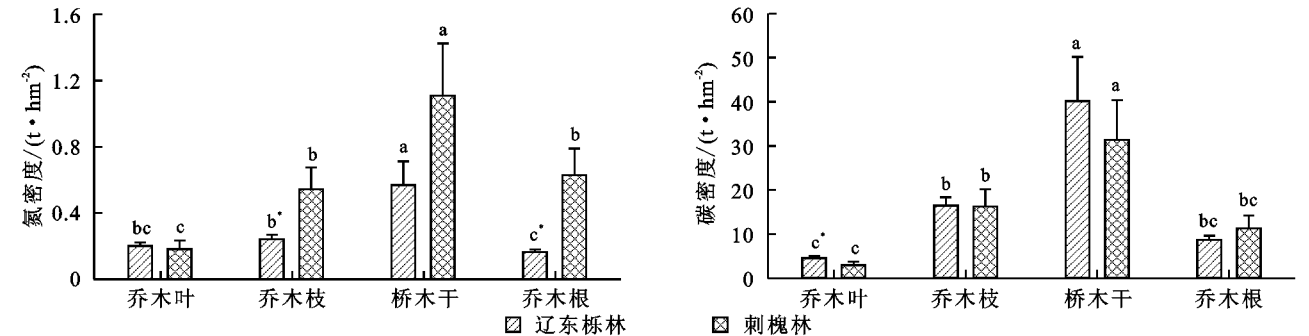
图 1—3 显示了研究区刺槐林和辽东栎林不同器官部位的碳氮密度特征。图 1 表明刺槐林和辽东栎林的乔木层以树干的碳氮密度最大,乔木枝和根的居中,乔木叶片的最小。因树种差异,同一器官部位的碳氮密度有差异。辽东栎树干的碳密度均显著高于刺槐树干的,但两种乔木枝、叶及根的碳密度差异不大。辽东栎树干、枝干及根的氮密度皆显著小于刺槐的,但两种乔木叶片的氮密度差异不大。

灌木层同一器官(枝、根和叶)的碳氮密度在刺槐和辽东栎林间无显著差异,但其大小顺序相同,均为:枝>根>叶(图 2)。

刺槐林和辽东栎林草本层地下部的碳氮密度皆显著高于地上部的。另外,辽东栎林草本层地上部的碳氮密度以及地下部的碳密度皆大于刺槐林的,但其草本层地下部的氮密度小于刺槐林的(图 3)。

2.3 刺槐林和辽东栎林生态系统碳氮密度比对

研究区域辽东栎林和刺槐林生态系统碳氮密度具有一定差异(表 4)。辽东栎林生态系统碳密度为 165.86 t/hm²,高于刺槐林生态系统的(138.93 t/hm²),但两者的氮密度差异不大。两生态系统中碳氮密度在各分层的大小排序为:土壤>乔木层>凋落物层>林下植被层(灌草层)。其中,辽东栎林土壤层的碳、氮密度占碳氮库总量的 53.6%,84.4%,而刺槐林土壤层的碳、氮密度占碳氮库总量的 51.1%,71.4%。土壤层的碳密度占生态系统碳库总量的 51.1%~53.6%。土壤层碳密度高于其他层次,主要由于上层生物归还量大,有机物多积累在土层。以前研究也显示,生态系统中土壤碳库是植被碳密度的 2.52 倍,我国森林土壤平均碳密度为 193.55 t/hm²,约是植被碳密度的 3.4 倍^[15-17],说明林地土壤是碳的一个极重要的贮存库。



注:不同小写字母表示同一林型不同组分间差异显著,同一组分不同林型间差异显著($p<0.05$),下同。

图 1 乔木层各组分碳氮密度

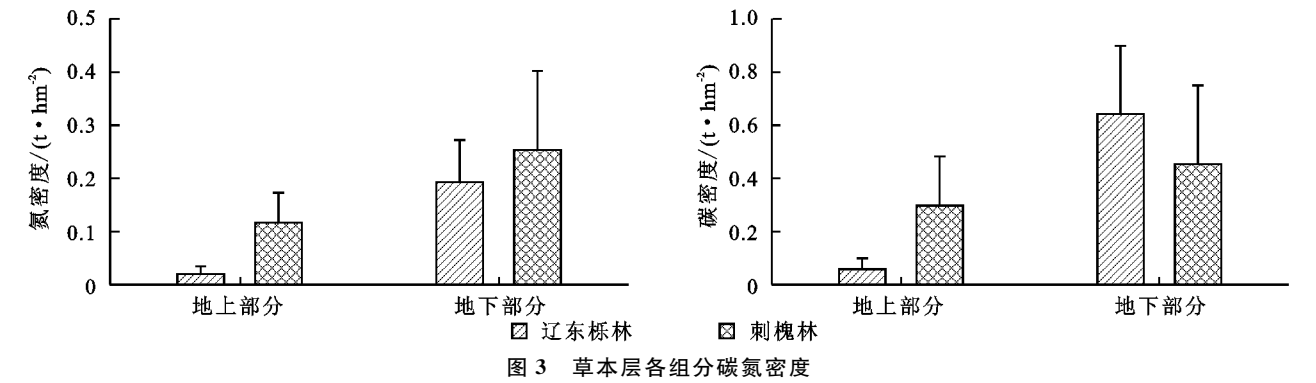
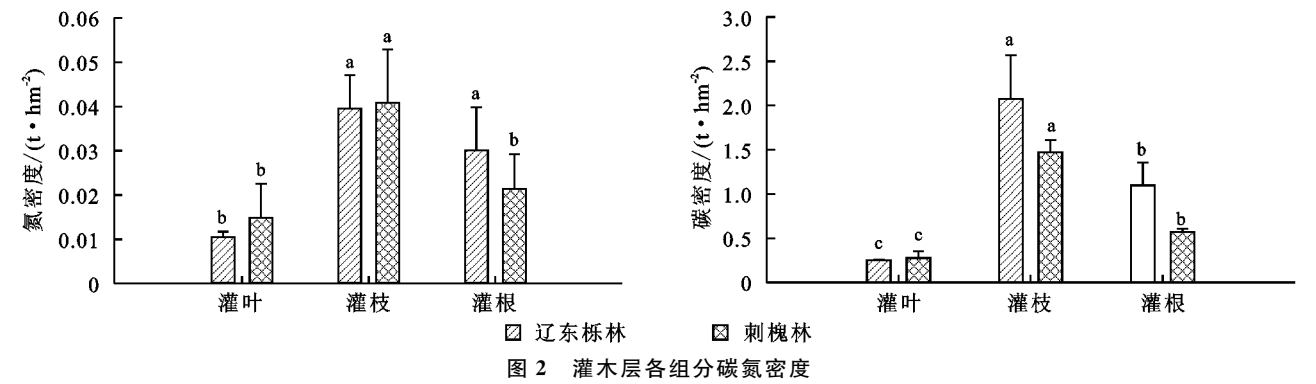


表 4 两种典型生态系统碳氮密度

组分	刺槐人工林		辽东栎天然次生林	
	碳密度/(t·hm ⁻²)	氮密度/(t·hm ⁻²)	碳密度/(t·hm ⁻²)	氮密度/(t·hm ⁻²)
乔木层	61.84±13.48	2.46±0.66	69.90±8.05	1.17±0.12
灌木层	2.32±0.17	0.07±0.01	3.42±0.52	0.08±0.01
草本层	0.75±0.39	0.04±0.01	0.70±0.24	0.02±0.01
凋落物层	2.72±0.51	0.17±0.03	2.87±0.43	0.15±0.03
植被层	67.53	2.74	76.89	1.42
土壤层	71.40	7.03	88.97	8.13
总计	138.93	9.77	165.86	9.55

3 结论

研究区植被层不同组分碳氮含量总体上呈现沿垂直方向的递减趋势,即碳氮含量依次为乔木层>林下植被层>凋落物层;不同器官部位的碳氮含量也呈现:叶、干>枝>根,草本层碳氮含量也呈现地上部分高于地下部分现象,林下植被各组成碳氮含量明显低于乔木相对应的各组分含量,灌木层碳氮含量大于草本层。

刺槐林和辽东栎林乔木层不同器官碳含量因树种不同而异。刺槐不同器官中碳含量按大小排列顺序为:叶>干>枝>根,辽东栎则为:干>叶>枝>根。从两个树种各器官平均碳素含量来看,辽东栎要高于刺槐。

辽东栎林生态系统碳密度为 165.86 t/hm²,高于刺槐林生态系统(138.93 t/hm²),但两者的氮密度差异不大。两生态系统碳密度的各部分排序为土壤>乔木层>凋落物层>灌木层、草本层。土壤层的碳

密度占生态系统碳库总量的 51.1%~53.6%。土壤碳库是森林生态系统中极为重要碳库。研究区土壤碳密度低于全国平均水平,这主要是由于黄土高原半干旱区水土流失较严重,水土流失造成表层土壤有机碳流失而造成的,可见防止地表的水土流失,可有效保持土壤对固碳潜力。

参考文献:

[1] 刘国彬,李敏,上官周平,等. 西北黄土区水土流失现状与综合治理对策[J]. 中国水土保持科学,2008,6(1):16-21.

[2] Ceulemans R, Janssens I A, Jach M E. Effects of CO₂ enrichment on trees and forests;Lessons to be learned in view of future ecosystem studies[J]. Annals of Botany, 1999,84(5):577-590.

[3] Reich P B, Hobbie S E, Lee T, et al. Nitrogen limitation constrains sustainability of ecosystem response to CO₂[J]. Nature, 2006,440(7086):922-925.

(下转第 65 页)

- [5] 赵洋毅,王玉杰,王云琦,等. 渝北水源区水源涵养林构建模式对土壤渗透性的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(15):4162-4172.
- [6] 韩路,王海珍,于军. 塔里木河上游不同植被类型土壤水文特性研究[J]. 水土保持学报, 2013, 27(6):124-129.
- [7] 巍强,张秋良,代海燕,等. 大青山不同林地类型土壤入渗特性及其水源涵养功能[J]. 水土保持学报, 2008, 22(2):111-115.
- [8] 李建兴,何丙辉,梅雪梅,等. 紫色土区坡耕地不同种植模式对土壤渗透性的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(3):725-731.
- [9] 杨永辉,赵世伟,雷廷武,等. 宁南黄土丘陵区不同植被下土壤入渗性能[J]. 应用生态学报, 2008, 19(5):1040-1045.
- [10] 吕刚,顾宇书,魏忠平,等. 白石砬子自然保护区几种主要植被类型土壤入渗特性研究[J]. 生态环境学报, 2013, 22(5):780-786.
- [11] 赵阳,余新晓,吴海龙,等. 华北土石山区典型森林枯落物层和土壤层水文效应[J]. 水土保持学报, 2011, 25(6):148-152.
- [12] Machiwa L D, Jha M K, Mal B C. Modeling infiltration and quantifying spatial soil variability in a wasteland of Kharagpur India[J]. Biosystems Engineering, 2006, 95(4):569-582.
- [13] 柴亚凡,王恩姮,陈祥伟,等. 植被恢复模式对黑土贮水性能及水分入渗特征的影响[J]. 水土保持学报, 2008, 22(1):60-64, 73.
- [14] 赵西宁,吴发启. 土壤水分入渗的研究进展和评述[J]. 西北林学院学报, 2004, 19(1):42-45.
- [15] 吕刚,吴祥云. 土壤入渗特性影响因素研究综述[J]. 中国农学通报, 2008, 24(7):494-499.
- [16] 王意锟,金爱武,方升佐,等. 浙西南不同经营强度下毛竹林土壤渗透性研究[J]. 水土保持研究, 2015, 22(2):41-46.
- [17] 徐敬华,王国梁,陈云明,等. 黄土丘陵区退耕地土壤水分入渗特征及影响因素[J]. 中国水土保持科学, 2008, 6(2):19-25.
- [18] Rachman A, Anderson S H, Gantzer C J, et al. Influence of stiff-stemmed grass hedge systems on infiltration [J]. Soil Science Society of America Journal, 2004, 68(6):2000-2006.
- [19] 许景伟,李传荣,夏江宝,等. 黄河三角洲滩地不同林分类型的土壤水文特征[J]. 水土保持学报, 2009, 23(1):173-176.
- [20] 刘芝芹,郎南军,彭明俊,等. 金沙江流域典型森林土壤水分入渗特征试验研究[J]. 水土保持通报, 2014, 34(2):43-47.
- [21] 林代杰,郑子成,张锡洲,等. 不同土地利用方式下土壤入渗特征及其影响因素[J]. 水土保持学报, 2010, 24(1):33-36.
- [22] 侯秀丽,付登高,阎凯,等. 滇中不同植被恢复策略下土壤入渗性能及其影响因素[J]. 山地学报, 2013, 31(3):273-279.
- [23] 张治伟,朱章雄,王燕,等. 岩溶坡地不同利用类型土壤入渗性能及其影响因素[J]. 农业工程学报, 2010, 26(6):71-76.
- [24] 李建兴,何丙辉,湛芸. 不同护坡草本植物的根系特征及对土壤渗透性的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(5):1535-1544.
- [25] Czames S, Hallett P D, Bengough A G, et al. Root and microbial-derived mucilage's affect soil structure and water transport[J]. European Journal of soil Science, 2000, 51(3):435-443.

(上接第59页)

- [4] Woodwell G M, Whittaker R H, Reiners W A, et al. The biota and the world carbon budget[J]. Science, 1978, 199(4325):141-146.
- [5] 刘华,雷瑞德. 我国森林生态系统碳储量和碳平衡的研究方法及进展[J]. 西北植物学报, 2005, 25(4):835-843.
- [6] 王效科,白艳莹,欧阳志云,等. 全球碳循环中的失汇及其形成原因[J]. 生态学报, 2002, 22(1):94-103.
- [7] 康惠宁,马钦彦. 中国森林C汇功能基本估计[J]. 应用生态学报, 1996, 7(3):230-234.
- [8] 周广胜,王玉辉,蒋延玲,等. 陆地生态系统类型转变与碳循环[J]. 植物生态学报, 2002, 26(2):250-254.
- [9] 朱志诚. 陕北黄土高原森林区植被恢复演替[J]. 西北林学院学报, 1993, 8(1):87-94.
- [10] 张长庆,张文辉. 黄土高原不同立地条件下刺槐人工林种群的无性繁殖与更新[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版, 2009, 37(1):135-144.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 王绍强,周成虎,罗承文. 中国陆地自然植被碳量空间分布特征探讨[J]. 地理科学进展, 1999, 18(3):238-244.
- [14] 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]. 生态学杂志, 2011, 30(11):2400-2404.
- [15] 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[J]. 植物生态学报, 2000, 24(5):518-522.
- [16] 王效科,冯宗炜. 中国森林生态系统中植物固定大气碳的潜力[J]. 生态学杂志, 2000, 19(4):72-74.
- [17] 李意德,方精云. 尖峰岭热带山地雨林群落生产和二氧化碳同化净增量的初步研究[J]. 植物生态学报, 1998, 22(2):127-134.