

DOI: 10.5846/stxb201401200151

杨丽丽, 王彦辉, 文仕知, 刘延惠, 杜敏, 郝佳, 李振华. 六盘山四种森林生态系统的碳氮储量、组成及分布特征. 生态学报, 2015, 35(15): 5215-5227.

Yang L L, Wang Y H, Wen S Z, Liu Y H, Du M, Hao J, Li Z H. Carbon and nitrogen storage and distribution in four forest ecosystems in Liupan Mountains, northwestern China. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(15): 5215-5227.

六盘山四种森林生态系统的碳氮储量、组成及分布特征

杨丽丽^{1,2}, 王彦辉^{1,*}, 文仕知², 刘延惠¹, 杜敏^{1,2}, 郝佳¹, 李振华¹

1 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 国家林业局森林生态环境与保护重点实验室, 北京 100091

2 中南林业科技大学林学院, 长沙 410004

摘要: 碳和氮是森林生态系统的重要组成元素, 其含量有很大时空差异, 并和立地及森林特征关系很大, 需做大量的积累性调查才能得到其变化规律, 尤其是加强在过去较少研究的西北地区的调查。在宁夏六盘山区选择华北落叶松 (*Larix principis-rupprechtii*) 人工林、华山松 (*Pinus armandii*) 次生林、桦木 (*Betula platyphylla*) 次生林和野李子 (*Prunus salicina*) 灌丛 4 种典型森林, 测定了乔木层 (分不同器官)、灌木层、草本层、枯落物层、根系层 (0—100 cm 土壤) 的碳、氮含量, 分析了生态系统的碳、氮储量及成分组成和层次分布特征。结果表明, 碳含量在不同乔木树种及其不同器官之间的差异不明显; 但氮含量存在显著的树种差别和器官差异, 以树叶的最高、树干的最低。灌木层和草本层的碳氮含量均表现为地上部分 > 地下部分。各森林样地的乔木层、灌木层、草本层的碳含量依次降低, 但氮含量依次增高; 枯落物层的碳含量低于各植被层, 但氮含量高于各植被层; 根系层土壤的碳、氮含量则随土层加深而递减。包括活植被层、枯落物层和根系层土壤在内的华北落叶松人工林、华山松次生林、桦木次生林、野李子灌丛的生态系统碳储量依次为 364.56、450.98、640.02、196.55 t/hm², 氮储量依次为 27.86、36.19、47.02、15.99 t/hm²。所有 4 种森林生态系统的根系层土壤的碳氮储量均占整个生态系统总储量的绝大部分, 其比例对碳储量为 84.69%—93.92%, 氮储量为 98.09%—98.64%。从乔木层、灌木层、草本层、枯落物层到根系层 (土壤), 呈现出 C/N 比依次减小的趋势; 根系层土壤和整个生态系统的 C/N 比分别为华北落叶松林的 11.84 和 13.12、华山松林的 10.76 和 12.56、桦木林的 12.48 和 13.52、野李子灌丛的 11.70 和 12.29。

关键词: 碳; 氮; 含量; 储量; 分配格局; 森林生态系统; 六盘山

Carbon and nitrogen storage and distribution in four forest ecosystems in Liupan Mountains, northwestern China

YANG Lili^{1,2}, WANG Yanhui^{1,*}, WEN Shizhi², LIU Yanhui¹, DU Min^{1,2}, HAO Jia¹, LI Zhenhua¹

1 Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

2 College of Forestry, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China

Abstract: Carbon (C) and nitrogen (N) are important elements of forest ecosystems, and quantifying C and N storage and distribution is a critical step for better understanding of C and N cycles in forest ecosystems. C and N pools in forests vary greatly, depending on the forest type, forest growth stage, and site quality. The mechanisms controlling the spatial and temporal variation of C and N accumulation in forest ecosystems, especially in the northwestern China, have been sporadically investigated in the past. In this paper, the content, storage and distribution of C and N were investigated in four

基金项目: 国家林业局林业公益性行业科研专项 (200904056); 国家自然科学基金项目 (41230852, 41390461); 科技部国家“十二五”农村领域科技计划 (2012BAD22B030102); 中挪合作项目 (209696/E10); 国家林业局宁夏六盘山森林生态站

收稿日期: 2014-01-20; **网络出版日期:** 2014-11-03

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wangyh@caf.ac.cn

typical forests at the Liupan Mountains in Ningxia, northwestern China. The four forest types included *Larix principis-rupprechtii* plantation, *Pinus armandii* secondary forest, *Betula platyphylla* secondary forest, and *Prunus salicina* shrubs. The concentrations of C and N were measured in different organs of the trees, and the contents of C and N in the vegetation layers of trees, shrubs, grasses, and layers of humus, and soil (0—100 cm depth) were estimated. Storage, composition, and distribution of C and N in these ecosystems were examined. The results showed that the concentrations of C did not significantly differ among the different organs and tree species, but the concentration of N varied. The highest N concentration was found in the leaves and the lowest in the trunk. The contents of C and N were higher in the above-ground biomass than in the below-ground biomass for both shrubs and grasses. The C contents decreased in the order of tree layer > shrub layer > grass layer, but N contents increased in the order of tree layer < shrub layer < grass layer in the studied forests. The C content was lower in the humus layer than in each of the vegetation layers, but the situation was opposite for the N content. The contents of both C and N decreased with increasing soil depth. The total C storage in the four forest ecosystems was in the following order: *B. platyphylla* secondary forest (640.02 t/hm²) > *P. armandii* secondary forest (450.98 t/hm²) > *L. principis-rupprechtii* plantation (364.56 t/hm²) > *P. salicina* shrub (196.55 t/hm²). The total N storage decreased from 47.02 t/hm² in *B. platyphylla* secondary forest to 36.19 t/hm² in *P. armandii* secondary forest, 27.86 t/hm² in *L. principis-rupprechtii* plantation and 15.99 t/hm² in *P. salicina* shrub ecosystems in the study sites. The amount of C and N in the soil (0—100 cm depth) accounted for the major proportion of the total C and N storage in the studied forest ecosystems, with the range of 84.7%—93.9% for C and 98.1%—98.6% for N for the four forest types. On average, the C/N ratio in the soil and in the entire ecosystem was 12.48 and 13.52 in *B. platyphylla* secondary forest, 11.84 and 13.12 in *L. principis-rupprechtii* plantation, 11.70 and 12.29 in *P. salicina* shrub, and 10.76 and 12.56 in *P. armandii* secondary forest, respectively. In addition, the C/N ratio decreased gradually from the tree layer to shrub layer, grass layer, humus layer, and mineral soil layer. Our study demonstrated that various forest types had different ability for the sequestration and accumulation of C and N in the studied area.

Key Words: carbon; nitrogen; content; storage; distribution pattern; forest ecosystem; Liupan Mountains

气候变化及其影响越来越成为国际社会关注的全球性环境问题,有关 CO₂ 的吸收、固定和排放也已成为全球变化研究的热点和前沿^[1-3]。森林是陆地生态系统最主要的碳库,其碳储量占陆地生态系统储量的 60%^[4-5],在维持全球碳循环和减缓大气 CO₂ 浓度升高等方面发挥着重要作用。作为影响森林生长及碳库变化的重要元素,氮的储量和循环已得到广泛关注,Townsend 等^[6]认为,氮沉降所增加的碳汇占全球碳“失汇”的 25% 左右。然而,科学界对氮沉降能否增加森林碳储存还存在激烈争论。在北半球温带地区,氮沉降的施肥效应估计每年增加 0.3—0.5 Pg 的碳贮存^[6-7]。但也有研究表明,氮素输入增加不能明显增加生态系统的碳贮存^[8],反而降低其生产力和碳储量^[9-10]。碳、氮元素相互作用对生态系统的生产力、固碳潜力及稳定性都有关键影响^[5],要理解和预测这种影响,需要量化不同地区不同森林的碳、氮储量组成和不同树木器官的含量及利用能力^[11]。国内以往研究多集中在森林碳储量和碳平衡上^[12-14],研究地点集中在亚热带地区^[15-16]。土壤是森林生态系统的重要碳氮储存场所,如王卫霞等^[15]研究发现,南亚热带 3 种人工林 0—100 cm 土层的碳储量分别占生态系统总储量的 55.77%、57.83% 和 62.52%;土壤氮储量更是占绝对优势,其所占比例分别为 92.00%、93.72% 和 95.53%。莫德祥等^[16]研究发现,不同密度的柳杉人工林植被层碳、氮储量仅为土壤层碳储量的 32.35%—56.01% 和 3.14%—6.22%。黄宇等^[17]研究发现,杉木 (*Cunninghamia lanceolata*) 和火力楠 (*Michelia macclurei*) 纯林及其混交林的土壤碳、氮储量均为生态系统总储量的主要部分,其次才为乔木层储量。艾泽民等^[18]在我国黄土丘陵区研究发现,刺槐人工林的土壤碳、氮储量占生态系统总储量的 63.3%—83.3% 和 80.3%—91.4%。由此可见,不同地区和不同森林的土壤碳氮储量和比例差异很大,要想深入理解和定量描述这种差异的原因,进行准确的动态预测和区域评价,就需在不同地区对不同森林进行大量研究,尤其

是较少调查的西北地区。

在我国水土流失和土地退化严重的西北干旱缺水地区,近几十年来一直在大力推动“三北”防护林、退耕还林、天然林保护等林业生态建设工程,森林覆盖率不断上升,因而这个区域可能在我国森林碳汇增加中占据着重要位置。宁夏六盘山位于黄土高原的中心地带,也是西北地区的一个重要山地林区,定量调查这里的森林碳氮储量特征,有着重要的科学价值。目前在宁夏六盘山区已开展了较多森林水文研究,如典型树种的蒸散耗水^[19]、降雨截留^[20]、土壤水文^[21]、径流影响^[22]等,也进行了华北落叶松不同林龄时的土壤碳储量动态变化的初步研究^[23],但一直还未进行典型森林生态系统的碳、氮储量特征和组成规律的研究。

因此,本文选择了4种典型森林生态系统,调查了其碳、氮含量和储量特征及分配格局,期望能为深入理解和定量评价当地及类似地区的森林固碳能力和养分循环提供科学依据,并为区域或国家范围的森林碳、氮储量的精确估算及碳氮循环与平衡的深入研究提供基础数据。

1 研究区域与方法

1.1 研究区域和样地概况

研究地点在六盘山自然保护区的香水河小流域(东经 109°9′—109°30′,北纬 35°15′—35°41′)。六盘山位于黄土高原中西部的宁夏回族自治区南端,属黄河二级支流泾河的源头地区,海拔范围 2060—2931 m,属暖温带大陆性季风气候,年均气温 5.8 ℃,年均降水量 771 mm,多集中于 6—9 月。小流域内植被良好,森林覆盖率高达 72.9%,主要为天然次生林,主要树种包括华山松(*Pinus armandii*)、白桦(*Betula platyphlla*)、红桦(*Betula albosinensis*)、山杨(*Populus davidiana*)等;其中人工林覆盖率为 23.6%,主要为华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)和油松(*Pinus tabulaeformis*)林。山体阳坡分布着较多灌丛;海拔 2700 m 以上分布着亚高山草甸。区内主要有 6 种土壤类型:灰褐土、红土、山地草甸土、新积土、潮土和粗骨土。其中以灰褐土面积最大,占总面积 90%以上。土壤中砾石较多,成土母质为沙质泥岩、页岩、灰岩风化的残积物和坡积物。

为准确估算生物量,在 2009 年和 2011 年选择具代表性的华北落叶松人工林、华山松次生林和桦木次生林,分别建立了 3—4 个 30 m × 30 m 的样地,并建立了 3 个 20 m × 20 m 的野李子(*Prunus salicina*)灌丛样地。乔木林样地均分布于洪沟子流域,野李子灌丛样地分布于草沟子流域。在华北落叶松林样地,林下灌木和草本数量较少,灌木主要有华西箭竹(*Fargesia nitida*)、黄刺玫(*Rosa hugonis*)等,草本主要有华北苔草(*Carex hancokiana*)、蕨(*Pteridium aquilum*)等。在华山松次生林中,混生有少量的白桦和红桦,林下灌木和草本数量较多,主要是忍冬(*Lonicera japonica* Thunb)、榛子(*Corylus heterophylla*)、峨眉蔷薇(*Rosa omeiensis*)、冰草(*Agropyron cristatum*)、苔草(*Carex*)等。桦木林样地由白桦和少量红桦组成,林下灌木和草本较多,主要有三裂绣线菊(*Spiraea trilobata*)、箭竹(*Fargesia spathacea* Franch)、榛子、小叶丁香(*Sytinga microphylla*)、忍冬、蕨、菝葜(*Smilax china* L.)等。野李子灌丛样地的林下草本数量较多,主要由冰草组成。各样地的基本特征见表 1。

1.2 研究方法

1.2.1 群落调查和生物量测算

将待研究森林生态系统分为乔木层、灌木层、草本层、枯落物(腐殖质)层、土壤层(0—100 cm)等不同垂直层次,分层设立样地(或样方)测定相关植被特征、碳氮含量等,其中乔木层、灌木层和草本层包括其地上和地下组分。

对森林样地的乔木层(包括野李子灌丛样地的野李子)进行每木调查,量测并记录种名、胸径、树高、枝下高、冠幅。在平均木胸高处用生长锥取树芯,估算林龄。在灌木样方内,调查灌木的种类、数量、高度、地径、冠幅、覆盖度等。在草本样方内,调查草本的种类、数量、平均高度、多度等。在枯落物样方内,按未分解层、半分解层、已分解层测量各层的厚度和质量。其中,未分解层指落叶外观基本保持原始形态,肉眼看不出分解迹象;半分解层指落叶组织变灰变黑,质地软化,已能明显看出腐烂分解,但仍可辨认出针叶或阔叶的大致形态;

已分解层指枯落物已完全分解,不能辨认其原始形态,呈黑褐色碎屑状。

表 1 研究样地的立地和植被基本特征
Table 1 The site condition and vegetation characters in sample plots

样地编号 Plot No.	森林类型 Forest type	海拔 Elevation/ m	坡向 Slope aspect	坡度 Slope gradient/ (°)	坡位 Slope position	林龄 Stand age/a	林冠 郁闭度 Canopy density	林分密度 Stand density/ (株/hm ²)	乔木平 均胸径 Mean tree DBH/cm	乔木平 均树高 Mean tree height/m	灌木 层盖度 Shrub coverage/%	草本层 盖度 Herb coverage/%
1	华北落叶松人工林	2320	东南	30	坡下	23	0.8	1125	15.60	13.90	5	40
2	<i>Larix principis-</i>	2320	东南	30	坡下	23	0.8	825	15.77	13.35	5	40
3	<i>rupprechtii</i> plantation	2510	西南	35	坡上	20	0.6	825	12.71	11.43	40	15
4		2240	全向	0	沟底	22	0.8	1300	12.52	14.22	10	70
5	华山松次生林	2280	北	35	坡下	43	0.6	675	12.14	6.81	60	15
6	<i>Pinus armandii</i>	2241	东南	45	坡中	42	0.6	800	14.54	10.54	20	10
7	secondary forest	2252	北	34	坡中	48	0.6	900	12.53	10.13	50	15
8	桦木次生林	2380	北	30	坡中	45	0.6	725	18.30	9.34	65	10
9	<i>Betula platyphylla</i>	2320	北	42	坡下	53	0.4	675	11.24	6.41	80	15
10	secondary forest	2436	西北	40	坡中	56	0.6	725	16.62	11.34	50	10
11	野李子灌丛	2230	西	39	坡中	20	—	—	2.57	1.96	50	70
12	<i>Prunus salicina</i>	2427	西南	40	坡中	25	—	—	2.93	3.27	55	70
13	shrub	2379	西南	30	坡下	25	—	—	2.81	3.27	60	75

乔木的起测胸径为 5 cm;野李子灌丛样地的“乔木平均胸径”和“乔木平均树高”栏目实为野李子灌丛的“地径”和“高度”

因研究地点地处自然保护区,砍伐解析木数量受限,本研究采用了之前在本研究流域相同地点取得的各树种单株器官生物量及野李子灌丛生物量的计算模型^[24]。

为计算乔木层下灌木层、草本层、枯落物层生物量,2011 年 8—9 月在各样地内的代表性样点设置生长着灌木或草本的灌木层样方(2 m×2 m)和草本层样方(1 m×1 m)各 3 块,以及枯落物层小样方(1 m×1 m) 3 块,均采用“样方收获法测定生物量^[25]”。灌木层和草本层植物均按地上器官和地下根系分别取样并称鲜重,枯落物层分未分解、半分解、已分解层分别称鲜重并取样,带回实验室在 80℃ 烘箱烘干至恒重,计算含水量,用于估计干生物量。

各样地和样方的生物量(t/hm²,生长季,含叶子)计算采用下式:

乔木层生物量 = (∑_{i=1}ⁿ ∑_{j=1}^m W_乔) / (1000 × S) (1)

灌木层生物量 = ∑_{i=1}ⁿ ∑_{j=1}^m W_灌 / (1000 × S_灌) × C_灌 (2)

草本层生物量 = W_草 / (1000 × S_草) × C_草 (3)

枯落物层生物量 = W_枯 / 1000 × S_枯 (4)

式中, W_乔 和 W_灌 分别为样地乔木层和灌木样方第 i 株第 j 种器官生物量(kg); W_草 为草本样方总生物量(包括地上和地下生物量)(kg); W_枯 为枯落物样方总生物量(kg); S、S_灌、S_草、S_枯 分别为林分样地、灌木样方、草本样方和枯落物样方的面积(hm²); C_灌 和 C_草 分别为样地内灌木和草本的盖度(%); 1000 为生物量单位转换系数。

将各样地内不同植被层次的所有样方的生物量测定值平均,得到该样地的各层生物量。整个样地的生物量则为各层生物量之和,即:

样地生物量 = (乔木层 + 灌木层 + 草本层 + 枯落物层) 生物量 (5)

1.2.2 碳氮含量分析样品的采集

2011 年 8—9 月,在华北落叶松人工林、华山松次生林和桦木次生林各样地附近,分别采集乔木层不同器官(叶、枝、干、皮和根)的样品,并在测定灌木层、草本层和枯落物层(分未分解层、半分解层、已分解层)生物

量时分别采集各层样品;在野李子灌丛样地附近,采集灌木的树叶、枝干(因灌木无主干,将枝、干、皮合并)、根的样品。所有植物样品均在 80 ℃ 下烘干、粉碎、过 2 mm 筛,以备测定碳氮含量。本文中给出的枯落物层的碳氮含量为未分解层、半分解层、已分解层的重量加权平均值。

在各样地内,按梅花形布设 5 个土壤采样点,挖土壤剖面,按 0—10、10—20、20—40、40—60、60—80、80—100 cm 分层,采集土壤样品;把同一样地的相同层次土壤样品混匀,得到混合样品,带回实验室自然风干后粉碎,过 2 mm 筛,以备测定有机碳、全氮含量。在采集土壤剖面样品时,用 100 cm³ 环刀取样,在 105 ℃ 下烘至恒重,测定土壤容重。

1.2.3 碳氮含量测定

所有植物和土壤样品的有机碳、全氮含量,均分别采用重铬酸钾—水合加热法、凯氏法测定^[26]。

1.2.4 各层碳氮含量和储量计算

在乔木层、灌木层、草本层,其平均碳氮含量是相应生物量组分的加权平均值;对于土壤层,则是各深度层的土壤质量加权平均值。计算公式为:

$$C = \sum_{i=1}^n C_i \cdot W_i / \sum_{i=1}^n W_i \quad (6)$$

式中, C 为乔木层、灌木层、草本层、土壤层平均碳氮含量; C_i 为乔木层各器官、灌木层地上和地下部分、草本层地上和地下部分、土壤各层的碳氮含量; W_i 为对应的各种生物量或土壤各层的质量, n 为组分数。

不同植被层(包括乔木层、灌木层、草本层和凋落物层)的碳、氮储量为各植被层生物量与其碳、氮含量的积^[27]。

土壤层(0—100 cm)的碳、氮储量计算公式为:

$$S = \sum_{i=1}^n (C_i \times \theta_i \times D_i) \quad (7)$$

式中, S 为计算土层的土壤碳或氮储量(t/hm²), n 为土层数, C_i 、 θ_i 、 D_i 分别为第 i 层土壤的碳或氮含量(%)、土壤容重(g/cm³)和土层厚度(m)。

各林分生态系统的总碳、氮储量,则是乔木层、灌木层、草本层、枯落物层和土壤层的碳、氮储量之和。

用 Excel 及 SPSS 软件对实验数据进行整理分析。

2 结果与分析

2.1 各林分样地的分层生物量组成

由表 2 可知:华北落叶松林和华山松林样地的器官生物量排序为树干>树枝>树根>树皮>树叶,桦木林为树干>树根>树枝>树皮>树叶,野李子灌丛为树干>树根>树叶。乔木层生物量中,以树干所占比例最大,达 49.02% 以上;树叶所占比例最小,变化在 1.98%—5.92%。华北落叶松林、华山松林和桦木林的乔木层生物量占总植被层的 64.19%、75.86% 和 60.38%,林下活植被层(包括灌木层和草本层)的生物量占总植被层的 8.68%、5.62% 和 18.86%,枯落物层生物量占总植被层的 27.13%、18.52% 和 20.77%。对野李子灌丛,灌木层、草本层和枯落物层的生物量分别占总植被层的 72.75%、4.94% 和 22.31%。桦木林下植被较多,所占生物量比例也较高。华北落叶松林、华山松林、桦木林、野李子灌丛的总植被层生物量分别为 84.14、133.50、124.57、26.72 t/hm²。

2.2 各林分样地的分层碳、氮含量

2.2.1 各植被层的碳、氮含量

如表 3 所示,华北落叶松所有器官的碳、氮含量平均为 54.42% (51.32%—55.12%) 和 0.28% (0.06%—2.39%)。华山松所有器官的碳、氮含量平均为 55.93% (52.86%—57.02%) 和 0.32% (0.05%—2.43%)。桦木所有器官碳、氮含量平均为 55.59% (53.31%—56.52%) 和 0.27% (0.07%—2.68%)。野李子所有器官的碳、氮含量平均为 48.93% (46.45%—49.30%) 和 0.54% (0.39%—2.37%)。综合来看,碳含量在不同树种及各树

表 2 不同树种林分的植被生物量(t/hm^2)Table 2 The biomass in different vegetation layers of stands studied (mean $\pm$ SE)

组分 Components	华北落叶松人工林 <i>Larix principis-rupprechtii</i> plantation	华山松次生林 <i>Pinus armandii</i> secondary forest	桦木次生林 <i>Betula platyphylla</i> secondary forest	野李子灌丛 <i>Prunus salicina</i> shrub
乔木层 Tree layer				
树叶 Leaf	1.07 $\pm$ 0.06a	4.36 $\pm$ 0.53b	1.41 $\pm$ 0.42c	1.15 $\pm$ 0.40a
树枝 Branch	13.40 $\pm$ 1.31ab	26.37 $\pm$ 3.49b	11.48 $\pm$ 3.18a	13.61 $\pm$ 5.99d
树干 Trunk	27.03 $\pm$ 2.66a	49.64 $\pm$ 6.92b	45.42 $\pm$ 14.2ab	
树皮 Bark	5.22 $\pm$ 0.49b	6.01 $\pm$ 0.72c	2.25 $\pm$ 0.61a	
树根 Root	7.29 $\pm$ 0.54a	14.89 $\pm$ 2.67b	14.65 $\pm$ 4.55b	4.68 $\pm$ 1.40c
乔木层合计 Total	54.01 $\pm$ 5.06a	101.27 $\pm$ 14.33b	75.21 $\pm$ 22.96ab	19.44 $\pm$ 7.79c
林下灌木层 Shrub layer				
地上部分 Aboveground	1.90 $\pm$ 0.82a	3.14 $\pm$ 0.28b	10.35 $\pm$ 2.52c	
地下部分 Underground	0.89 $\pm$ 0.26a	1.97 $\pm$ 0.08b	6.91 $\pm$ 1.15c	
灌木层合计 Total	2.79 $\pm$ 1.08a	5.11 $\pm$ 0.36b	17.26 $\pm$ 3.67c	
林下草本层 Herb layer				
地上部分 Aboveground	2.50 $\pm$ 0.10a	0.85 $\pm$ 0.06b	2.56 $\pm$ 0.01a	0.83 $\pm$ 0.09b
地下部分 Underground	2.01 $\pm$ 0.06a	1.54 $\pm$ 0.06b	3.67 $\pm$ 0.02c	0.49 $\pm$ 0.03d
草本层合计 Total	4.51 $\pm$ 0.16ab	2.39 $\pm$ 0.12a	6.23 $\pm$ 0.03b	1.32 $\pm$ 0.12c
林下植被合计 Understory vegetation	7.30 $\pm$ 1.24a	7.50 $\pm$ 0.48a	23.49 $\pm$ 3.7b	1.32 $\pm$ 0.26c
活植被层合计 Living vegetation	61.31 $\pm$ 6.30a	108.77 $\pm$ 14.81b	98.70 $\pm$ 26.66c	20.76 $\pm$ 8.05d
枯落物层 Humuls layer	22.83 $\pm$ 0.72a	24.73 $\pm$ 0.68ab	25.87 $\pm$ 0.41b	5.96 $\pm$ 0.26c
总植被层 Total vegetation layer	84.14 $\pm$ 7.02a	133.50 $\pm$ 15.49b	124.57 $\pm$ 27.07c	26.72 $\pm$ 8.31d

野李子灌丛的乔木层栏目数据实为灌丛数据;不同小写字母表示同一组分不同林分间差异显著 ($P<0.05$)

表 3 不同树种林分植被层各器官的碳、氮含量(t/hm^2)Table 3 The content of C and N in organs of vegetation layers under different stands (mean $\pm$ SE)

组分 Components	华北落叶松人工林 <i>Larix principis-rupprechtii</i> plantation		华山松次生林 <i>Pinus armandii</i> secondary forest		桦木次生林 <i>Betula platyphylla</i> secondary forest		野李子灌丛 <i>Prunus salicina</i> shrub	
	C/%	N/%	C/%	N/%	C/%	N/%	C/%	N/%
乔木层 tree layer								
树叶 Leaf	51.32 $\pm$ 0.89Aa	2.39 $\pm$ 0.32Aa	52.86 $\pm$ 1.42Aa	2.43 $\pm$ 0.03Aa	54.12 $\pm$ 1.32Aa	2.68 $\pm$ 0.34Ba	46.45 $\pm$ 2.35Ca	2.37 $\pm$ 0.21Aa
树枝 Branch	54.35 $\pm$ 0.15Ab	0.42 $\pm$ 0.07Ab	55.47 $\pm$ 1.55Ab	0.37 $\pm$ 0.09Bb	55.24 $\pm$ 0.50Ab	0.41 $\pm$ 0.14Ab	49.30 $\pm$ 3.21Cb	0.44 $\pm$ 0.06Cb
树干 Trunk	55.03 $\pm$ 1.16Ab	0.06 $\pm$ 0.01Ac	57.02 $\pm$ 2.12Ab	0.05 $\pm$ 0.01Ac	56.52 $\pm$ 1.12Ab	0.07 $\pm$ 0.01Ac		
树皮 Bark	55.12 $\pm$ 1.02Ab	0.36 $\pm$ 0.06Ad	55.19 $\pm$ 1.45Ab	0.38 $\pm$ 0.03Ab	54.46 $\pm$ 0.98Aa	0.41 $\pm$ 0.07Bb		
树根 Root	52.21 $\pm$ 1.51Aa	0.49 $\pm$ 0.02Ae	54.32 $\pm$ 2.50Ab	0.46 $\pm$ 0.12Ac	53.31 $\pm$ 2.58Aa	0.54 $\pm$ 0.10Ac	48.47 $\pm$ 2.13Bb	0.39 $\pm$ 0.08Cb
乔木层平均 Mean	54.42A	0.28A	55.93A	0.32B	55.59A	0.27A	48.93B	0.54C
灌木层 Shrub layer								
地上部分 Aboveground	50.93 $\pm$ 0.38Aa	1.07 $\pm$ 0.07Af	49.45 $\pm$ 4.36Ac	0.91 $\pm$ 0.17Bd	51.36 $\pm$ 0.16Ac	0.93 $\pm$ 0.15Bd		
地下部分 Underground	47.59 $\pm$ 1.23Ac	0.58 $\pm$ 0.05Ae	48.19 $\pm$ 2.32Ac	0.56 $\pm$ 0.01Ae	50.42 $\pm$ 1.98Ac	0.55 $\pm$ 0.06Ac		
灌木层平均 Mean	49.86A	0.91A	48.96A	0.78B	50.98A	0.78B		
草本层 Herb layer								
地上部分 Aboveground	45.22 $\pm$ 2.36Ad	1.53 $\pm$ 0.04Ag	45.25 $\pm$ 1.78Ad	1.60 $\pm$ 0.16Af	45.44 $\pm$ 2.13Ad	1.56 $\pm$ 0.23Af	45.12 $\pm$ 0.67Aa	1.95 $\pm$ 0.16Cc
地下部分 Underground	33.32 $\pm$ 3.12Ae	1.24 $\pm$ 0.06Afg	36.33 $\pm$ 2.25Ae	1.14 $\pm$ 0.09Bg	36.18 $\pm$ 3.21Ae	1.23 $\pm$ 0.14Ag	35.32 $\pm$ 1.36Ac	1.16 $\pm$ 0.04Bd
草本层平均 Mean	39.92A	1.40A	39.50A	1.30A	39.99A	1.37A	41.48A	1.66B
枯落物层 Humus layer	35.50 $\pm$ 3.22Af	1.17 $\pm$ 0.12Ah	36.17 $\pm$ 4.13Ae	1.21 $\pm$ 0.14Ag	36.73 $\pm$ 2.23Ae	1.33 $\pm$ 0.18Ag	31.78 $\pm$ 1.09Bd	1.52 $\pm$ 0.08Be

不同大写字母表示同一组分不同林分间差异显著,不同小写字母表示同一林分不同组分间差异显著 ($P<0.05$)

种不同器官间的差异不大且规律不明显,但氮含量存在较明显的器官差异和树种差别。氮含量在各器官之间为树叶最高,树干最低;不同树种的氮含量表现为野李子>华山松>华北落叶松>桦木;说明氮含量与器官及树种的生理特性关系较明显^[28]。差异显著性分析表明,不同乔木树种(除野李子外)的相同器官的碳、氮含量差异绝大多数未达显著水平($P>0.05$)。

灌木(各林下灌木层及野李子灌丛)的碳、氮平均含量变化在 48.93%—50.98%、0.54%—0.91%;草本层的碳、氮平均含量变化在 39.50%—39.99%、1.30%—1.66%;现存枯落物层的碳、氮含量变化在 31.78%—36.73%、1.17%—1.52%。各树种林分不同植被层的碳含量表现为:乔木层>灌木层>草本层>枯落物层;氮含量表现为草本层>枯落物层>灌木层>乔木层。灌木层和草本层的碳氮含量均表现为地上部分>地下部分。

在不同林分之间,枯落物层的碳含量(%)表现为:桦木林(36.73)>华山松林(36.17)>华北落叶松林(35.50)>野李子灌丛(31.78);氮含量(%)表现为:野李子灌丛(1.52)>桦木林(1.33)>华山松林(1.21)>华北落叶松林(1.17)。

差异显著性分析表明:不同乔木林分(不包括野李子灌丛)的灌木层、草本层、枯落物层的碳、氮含量差异绝大多数未达显著水平($P>0.05$)。

2.2.2 土壤层的碳、氮含量

从表 4 可看出,不同林地土壤层(0—100 cm)的碳、氮含量均呈随土层增深而递减的趋势。不同树种林分 0—100 cm 土层的平均土壤碳含量(%)排序为:桦木林(5.35)>华山松林(4.48)>华北落叶松林(2.78)>野李子灌丛(1.84);氮含量排序相同,为:桦木林(0.43)>华山松林(0.42)>华北落叶松林(0.23)>野李子灌丛(0.16)。几乎所有土层(除 20—40 cm 土层外)的有机碳含量和氮含量均表现为 4 种林分间有显著差异($P<0.05$)。分析表明,4 种林分的土壤全氮含量和有机碳含量之间存在显著的线性正相关关系($R^2=0.97$)。

表 4 不同土壤层的碳、氮含量

Table 4 The content of C and N in different soil layers (mean±SE)

土壤层/cm Soil layer	华北落叶松人工林 <i>Larix principis-rupprechtii</i> plantation		华山松次生林 <i>Pinus armandii</i> secondary forest		桦木次生林 <i>Betula platyphylla</i> secondary forest		野李子灌丛 <i>Prunus salicina</i> shrub	
	C/%	N/%	C/%	N/%	C/%	N/%	C/%	N/%
0—10	3.88±0.35Aa	0.29±0.03 Aa	7.92±0.38Ba	0.68±0.08Ba	8.54±0.55Ca	0.64±0.01Ba	2.62±0.10Da	0.22±0.01Aa
10—20	3.45±0.23Aa	0.26±0.04Ab	6.78±0.34Bb	0.61±0.03Bb	7.97±0.12Cb	0.62±0.02Bb	2.20±0.23Db	0.20±0.01Db
20—40	2.97±0.17Ab	0.25±0.02Ab	6.67±0.25Bb	0.61±0.03Bb	6.92±0.24Bc	0.55±0.07Cc	2.02±0.13Db	0.18±0.01Db
40—60	2.83±0.37Ab	0.25±0.02Ab	3.76±0.05Bc	0.36±0.01Bc	5.28±0.26Cd	0.44±0.04Cc	1.95±0.26Db	0.15±0.01Dc
60—80	2.79±0.09Ab	0.24±0.01Ab	3.18±0.19Bc	0.33±0.04Bc	4.85±0.18Ce	0.39±0.05Bc	1.80±0.09Db	0.11±0.01Dd
80—100	2.02±0.18Ac	0.18±0.01Ac	2.79±0.27Bd	0.26±0.01Bd	3.40±0.32Cf	0.27±0.01Bd	1.11±0.11Dfc	0.10±0.01Dd
平均 Mean	2.78A	0.23A	4.48B	0.42B	5.35C	0.43C	1.84D	0.16D

不同大写字母表示同一土层不同林分间差异显著,不同小写字母表示同一林分不同土层间差异显著($P<0.05$)

2.3 各林分样地的碳、氮储量及层次分配

2.3.1 各林分样地的碳、氮储量

从表 5 可看出,华北落叶松人工林、华山松次生林、桦木次生林、野李子灌丛 4 种林分生态系统的植被层碳储量分别为 40.68、69.03、62.60、11.95 t/hm²;氮储量分别为 0.51、0.69、0.77、0.22 t/hm²。

各树种林分的植被碳、氮储量的植被层次分配格局有所不同。在 4 种林分中,作为乔木林主要组分的乔木层(及野李子灌丛的枝干)的碳储量占总植被层相应储量的 66.79%—82.05%;其中乔木林树干占乔木层碳储量的 49.97%—61.40%,野李子灌丛枝干的碳储量占总灌木层碳储量的 70.56%。对于氮储量,4 种林分的乔木层(或野李子灌丛的枝干)储量占总植被层储量的 25.97%—46.38%,变幅较大,且在不同器官中的分配不像碳储量那么集中,而是比较分散,表现为树冠(树枝+树叶)氮储量占乔木层氮储量比例较大,如华北落叶松林为 60.00%、华山松林为 65.63%、桦木林为 45.00%,野李子灌丛更是占到了 90.00%;树根的氮储量占乔木

层的比例也较高(20.00%—40.00%)。桦木林的根系氮储量占乔木层总量比例最高(40.00%),是因桦木根系有较好的氮固定能力。分析表明,植被层的碳、氮储量在4种林分间相互差异显著($P<0.05$)。

表5 不同树种林分的植被和凋落物层碳氮储量(t/hm^2)

Table 5 The storage of C and N in different vegetation layers (mean $\pm$ SE)

组分 Component	华北落叶松人工林 <i>Larix principis-rupprechtii</i> plantation		华山松次生林 <i>Pinus armandii</i> secondary forest		桦木次生林 <i>Betula platyphylla</i> secondary forest		野李子灌丛 <i>Prunus salicina</i> shrub	
	碳储量 C storage	氮储量 N storage	碳储量 C storage	氮储量 N storage	碳储量 C storage	氮储量 N storage	碳储量 C storage	氮储量 N storage
乔木层 Tree layer								
树叶 Leaf	0.55 $\pm$ 0.03	0.03 $\pm$ 0.001	2.30 $\pm$ 0.30	0.11 $\pm$ 0.01	0.76 $\pm$ 0.23	0.04 $\pm$ 0.01	0.53 $\pm$ 0.19	0.03 $\pm$ 0.01
树枝 Branch	7.28 $\pm$ 0.71	0.06 $\pm$ 0.01	14.63 $\pm$ 1.94	0.10 $\pm$ 0.01	6.34 $\pm$ 1.66	0.05 $\pm$ 0.01	6.71 $\pm$ 2.95	0.06 $\pm$ 0.03
树干 Trunk	14.87 $\pm$ 1.46	0.02 $\pm$ 0.002	28.30 $\pm$ 3.95	0.03 $\pm$ 0.004	25.67 $\pm$ 7.03	0.03 $\pm$ 0.01		
树皮 Bark	2.88 $\pm$ 0.27	0.02 $\pm$ 0.001	3.32 $\pm$ 0.40	0.02 $\pm$ 0.003	1.23 $\pm$ 0.32	0.01 $\pm$ 0.003		
树根 Root	3.81 $\pm$ 0.28	0.04 $\pm$ 0.003	8.09 $\pm$ 1.45	0.07 $\pm$ 0.01	7.81 $\pm$ 2.29	0.08 $\pm$ 0.02	2.27 $\pm$ 0.68	0.02 $\pm$ 0.01
乔木层合计 Total	29.39 $\pm$ 2.76	0.15 $\pm$ 0.01	56.64 $\pm$ 8.03	0.32 $\pm$ 0.04	41.80 $\pm$ 11.53	0.20 $\pm$ 0.06	9.51 $\pm$ 3.82	0.10 $\pm$ 0.04
灌木层 Shrub layer								
地上部分 Aboveground	0.97 $\pm$ 0.42	0.02 $\pm$ 0.01	1.55 $\pm$ 0.14	0.03 $\pm$ 0.002	5.32 $\pm$ 1.29	0.10 $\pm$ 0.02		
地下部分 Underground	0.42 $\pm$ 0.12	0.01 $\pm$ 0.0004	0.95 $\pm$ 0.04	0.01 $\pm$ 0.0004	3.48 $\pm$ 0.58	0.04 $\pm$ 0.01		
灌木层合计 Total	1.39 $\pm$ 0.54	0.025 $\pm$ 0.01	2.50 $\pm$ 0.18	0.03 $\pm$ 0.002	8.80 $\pm$ 1.87	0.13 $\pm$ 0.03		
草本层 Herb layer								
地上部分 Aboveground	1.13 $\pm$ 0.05	0.04 $\pm$ 0.003	0.38 $\pm$ 0.03	0.01 $\pm$ 0.001	1.16 $\pm$ 0.001	0.04 $\pm$ 0.0002	0.37 $\pm$ 0.04	0.02 $\pm$ 0.002
地下部分 Underground	0.67 $\pm$ 0.02	0.02 $\pm$ 0.001	0.56 $\pm$ 0.02	0.02 $\pm$ 0.001	1.33 $\pm$ 0.01	0.05 $\pm$ 0.0002	0.17 $\pm$ 0.01	0.01 $\pm$ 0.0003
草本层合计 Total	1.80 $\pm$ 0.07	0.06 $\pm$ 0.003	0.94 $\pm$ 0.05	0.03 $\pm$ 0.001	2.49 $\pm$ 0.01	0.09 $\pm$ 0.0004	0.55 $\pm$ 0.05	0.02 $\pm$ 0.002
林下植被合计 Understory vegetation	3.19 $\pm$ 0.61	0.09 $\pm$ 0.01	3.45 $\pm$ 0.23	0.07 $\pm$ 0.004	11.29 $\pm$ 1.89	0.22 $\pm$ 0.03	0.55 $\pm$ 0.08	0.02 $\pm$ 0.004
活植被层合计 Living vegetation	32.58 $\pm$ 3.37	0.24 $\pm$ 0.03	60.09 $\pm$ 8.26	0.39 $\pm$ 0.04	53.10 $\pm$ 13.42	0.42 $\pm$ 0.09	10.06 $\pm$ 3.9	0.13 $\pm$ 0.04
枯落物层 Humus layer	8.10 $\pm$ 0.28	0.27 $\pm$ 0.01	8.94 $\pm$ 0.30	0.30 $\pm$ 0.01	9.50 $\pm$ 0.15	0.34 $\pm$ 0.01	1.89 $\pm$ 0.08	0.09 $\pm$ 0.004
总植被层 Total vegetation	40.68 $\pm$ 3.65	0.51 $\pm$ 0.04	69.03 $\pm$ 8.56	0.69 $\pm$ 0.05	62.60 $\pm$ 13.57	0.77 $\pm$ 0.10	11.95 $\pm$ 3.98	0.22 $\pm$ 0.04

从表5还可看出,华北落叶松林、华山松林、桦木林和野李子灌丛的林下植被层(野李子灌丛不包括灌木层)碳储量分别为3.19、3.45、11.29、0.55 t/hm^2 ,枯落物层的碳储量分别为8.10、8.94、9.50、1.89 t/hm^2 。林下植被层的氮储量分别为0.09、0.07、0.22、0.02 t/hm^2 ,枯落物层的氮储量分别为0.27、0.30、0.34、0.09 t/hm^2 。综合来看,4种林分的林下灌草的碳、氮储量占总植被层储量的比例分别变化在4.60%—18.04%和9.09%—28.57%。这个比例大小同时与各器官的生物量和碳氮含量比例有关。

2.3.2 各林分样地的土壤层碳、氮储量

表6为4种林分土壤层(0—100 cm)的碳、氮储量,存在林分间显著差异($P<0.05$),依次分别为:桦木林(577.42,46.26 t/hm^2)>华山松林(381.95,35.50 t/hm^2)>华北落叶松林(323.88,27.35 t/hm^2)>野李子灌丛(184.60,15.78 t/hm^2)。

对同一林分,虽然存在各土层碳、氮储量随土层深度增加而降低的基本趋势,但不同土层间的差异并不显著,这是元素含量和土壤容重两个因素共同作用的结果,土壤容重随土层加深而增大的作用抵消了元素含量随土层加深而降低的影响。

2.4 各森林生态系统的碳氮储量及分配格局

由表7可见,华北落叶松林、华山松林、桦木林、野李子灌丛4种林分的生态系统总碳储量分别为:364.56、450.98、640.02、196.55 t/hm^2 ;总氮储量分别为:27.86、36.19、47.02、15.99 t/hm^2 。

表 6 不同土壤层的碳氮储量(t/hm^2)Table 6 The storage of C and N in different soil layers (mean $\pm$ SE)

土层/cm Soil layers	华北落叶松人工林 <i>Larix principis-rupprechtii</i> plantation		华山松次生林 <i>Pinus armandii</i> secondary forest		桦木次生林 <i>Betula platyphylla</i> secondary forest		野李子灌丛 <i>Prunus salicina</i> shrub	
	碳储量 C storage	氮储量 N storage	碳储量 C storage	氮储量 N storage	碳储量 C storage	氮储量 N storage	碳储量 C storage	氮储量 N storage
0—10	34.17 $\pm$ 3.08a	2.59 $\pm$ 0.26a	55.05 $\pm$ 2.64b	4.75 $\pm$ 0.56b	58.93 $\pm$ 3.8b	4.43 $\pm$ 0.07b	25.65 $\pm$ 0.98d	2.13 $\pm$ 0.10c
10—20	34.53 $\pm$ 2.30a	2.63 $\pm$ 0.40a	50.20 $\pm$ 2.52b	4.55 $\pm$ 0.22b	59.80 $\pm$ 0.90c	4.66 $\pm$ 0.15b	23.51 $\pm$ 2.46d	2.09 $\pm$ 0.11d
20—40	60.68 $\pm$ 3.47a	5.13 $\pm$ 0.41a	96.77 $\pm$ 3.63b	8.82 $\pm$ 0.44b	119.00 $\pm$ 4.13c	9.49 $\pm$ 1.20b	41.25 $\pm$ 2.65d	3.61 $\pm$ 0.14c
40—60	62.73 $\pm$ 8.21a	5.53 $\pm$ 0.44a	58.67 $\pm$ 0.78b	5.58 $\pm$ 0.12a	123.54 $\pm$ 6.08c	10.29 $\pm$ 0.94b	46.13 $\pm$ 6.14d	3.50 $\pm$ 0.21c
60—80	73.22 $\pm$ 2.36a	6.32 $\pm$ 0.24a	59.55 $\pm$ 3.56b	6.13 $\pm$ 0.75a	120.26 $\pm$ 4.46c	9.72 $\pm$ 1.24b	21.36 $\pm$ 1.73d	2.03 $\pm$ 0.19c
80—100	58.55 $\pm$ 5.22a	5.16 $\pm$ 0.29a	61.72 $\pm$ 5.97b	5.67 $\pm$ 0.22a	95.89 $\pm$ 9.02c	7.68 $\pm$ 0.17b	26.70 $\pm$ 2.64d	2.41 $\pm$ 0.14c
合计 Total	323.88 $\pm$ 26.82a	27.35 $\pm$ 2.33a	381.95 $\pm$ 21.33b	35.50 $\pm$ 2.56b	577.42 $\pm$ 30.24c	46.26 $\pm$ 3.24c	184.60 $\pm$ 16.16d	15.78 $\pm$ 1.08d

不同小写字母表示同一土层不同林分间差异显著($P<0.05$)

表 7 不同树种林分的生态系统碳氮储量及分配格局

Table 7 The C and N storage and distribution pattern in different forest ecosystems

组分 Components	华北落叶松人工林 <i>Larix principis-rupprechtii</i> plantation				华山松次生林 <i>Pinus armandii</i> secondary forest				桦木次生林 <i>Betula platyphylla</i> secondary forest				野李子灌丛 <i>Prunus salicina</i> Shrub			
	碳储量 C storage		氮储量 N storage		碳储量 C storage		氮储量 N storage		碳储量 C storage		氮储量 N storage		碳储量 C storage		氮储量 N storage	
	$/(t/hm^2)$	/%	$/(t/hm^2)$	/%	$/(t/hm^2)$	/%	$/(t/hm^2)$	/%	$/(t/hm^2)$	/%	$/(t/hm^2)$	/%	$/(t/hm^2)$	/%	$/(t/hm^2)$	/%
乔木层 Tree layer	29.39	8.06	0.15	0.52	56.64	12.56	0.32	0.88	41.81	6.53	0.20	0.42	9.51	4.84	0.10	0.66
林下植被层 Understory vegetation	3.19	0.88	0.09	0.32	3.45	0.76	0.07	0.19	11.29	1.76	0.22	0.47	0.55	0.28	0.02	0.14
枯落物层 Humus layer	8.10	2.22	0.27	0.97	8.94	1.98	0.30	0.83	9.50	1.48	0.34	0.72	1.89	0.96	0.09	0.57
土壤层 Soil layer	323.88	88.64	27.35	98.18	381.95	84.69	35.50	98.09	577.42	90.22	46.26	98.39	184.60	93.92	15.78	98.64
总计 Total	364.56	100	27.86	100	450.98	100	36.19	100	640.02	100	47.02	100	196.55	100	15.99	100

在 4 种森林生态系统碳储量上,除桦木次生林表现为土壤层>乔木层>林下植被层>枯落物层外,其余 3 种均表现为土壤层>乔木层>枯落物层>林下植被层。土壤碳库占森林生态系统总碳库的比例依次为野李子灌丛(93.92%)、桦木林(90.22%)、华北落叶松林(88.64%)、华山松林(84.69%)。在氮储量方面,各林分的层次大小顺序并一致,表现为华北落叶松林的土壤层>枯落物层>乔木层>林下植被层,桦木林的土壤层>枯落物层>林下植被层>乔木层,华山松林和野李子灌丛皆为土壤层>乔木层>枯落物层>林下植被层;土壤氮库占森林生态系统总氮库的比例依次为野李子灌丛(98.64%)、桦木林(98.39%)、华北落叶松林(98.18%)、华山松林(98.09%)。由此可见,森林生态系统的碳氮储量绝大部分集中在土壤层。

2.5 不同森林生态系统的 C/N 比

由表 3 中 4 种林分及其不同层次及器官的元素含量计算的对应 C/N 比见表 8,叶片 C/N 比为野李子灌丛(19.64)<桦木林(20.19)<华北落叶松林(21.74)<华山松林(21.75),彼此较接近;乔木层的 C/N 比顺序为:野李子灌丛(90.61)<华山松林(174.78)<华北落叶松林(194.76)<桦木林(205.89),乔木林间较接近,但缺少主干的灌丛明显偏低。

在几种林分中,乔木林下灌木层的 C/N 比变化在 54.79—65.36 之间,均低于野李子灌丛的 90.61,这可能与林下灌木层分地上和地下部分采样后混合分析有些关系,但更可能与林下灌木层受遮蔽影响大与野李子灌丛完全接受光照的光环境不同有关。乔木林下草本层的 C/N 比变化在 28.51—30.38 之间,彼此很接近;野李子灌丛下的草本的 C/N 比稍低,为 24.99,这可能与草本种类及光环境差别有关。随着木质部生物量比例的降低和叶子的生物量比例升高,乔木层、灌木层、草本层的 C/N 比依次降低。

表 8 4 种林分生态系统的 C/N 比

Table 8 The C/N ratio in 4 different forest ecosystems

组分 Components	华北落叶松人工林 <i>Larix principis-rupprechtii</i> plantation	华山松次生林 <i>Pinus armandii</i> secondary forest	桦木次生林 <i>Betula platyphylla</i> secondary forest	野李子灌丛 <i>Prunus salicina</i> shrub
乔木层 Tree layer	194.36	174.78	205.89	90.61
树叶 Leaf	21.47	21.75	20.19	19.64
树枝 Branch	129.40	149.92	134.73	112.29
树干 Trunk	917.17	1140.40	807.43	
树皮 Bark	153.11	145.24	132.83	
树根 Root	106.55	118.09	98.72	125.78
灌木层 Shrub layer	54.79	63.17	65.36	
草本层 Herb layer	28.51	30.38	29.19	24.99
活植被层 Living-vegetation	135.54	153.40	125.30	79.30
枯落物层 Humus layer	30.34	29.89	27.62	21.00
总植被层 Total vegetation	85.26	105.20	81.38	54.32
土壤层 Soil layer	11.84	10.76	12.48	11.70
森林生态系统 Forest ecosystem	13.12	12.56	13.52	12.29

4 种林分的活植被层的 C/N 比体现为野李子灌丛(79.30) < 桦木林(125.30) < 华北落叶松林(135.54) < 华山松林(153.40); 地表枯落物层的 C/N 比为野李子灌丛(21.00) < 桦木林(27.62) < 华山松林(29.89) < 华北落叶松林(30.34)。总植被层的 C/N 比为野李子灌丛(54.32) < 桦木林(81.38) < 华北落叶松林(85.26) < 华山松林(105.20)。均表现为灌丛明显低于乔木林; 虽然乔木林间也有树种的差别。

土壤层的 C/N 比为华山松林(10.76) < 野李子灌丛(11.70) < 华北落叶松林(11.84) < 桦木林(12.48), 彼此差别较小; 但 3 种乔木林的大小顺序正好与活植被层及总植被层的大小顺序相反, 说明土壤层的氮储量可能受到植被吸收利用影响。

4 种林分整个森林生态系统的 C/N 比为野李子灌丛(12.29) < 华山松林(12.56) < 华北落叶松林(13.12) < 桦木林(13.52), 与各植被层和总植被层相比, 彼此更加相近。

3 讨论与结论

植物的 C/N 比是能反映其生长状态和生境好坏的重要指标^[29-30]。在宁夏六盘山地区 4 种主要森林的乔木层各器官中, 树叶的 C/N 比最小, 树干的 C/N 比最大, 即老化器官的 C/N 比大于幼嫩器官的 C/N 比, 这与刘增文等^[28]和项文化等^[31]的研究结果基本一致。枯落物层 C/N 比在一定程度上可体现和影响其分解, C/N 比较低时分解较快, 利于释放养分供树木吸收; 反之则分解释放速率降低^[23]。本研究中 4 种森林枯落物层的 C/N 比为野李子灌丛 < 桦木林 < 华山松林 < 华北落叶松林, 这符合枯落物分解速率一般为灌丛快于乔木林、阔叶林快于针叶林的规律^[32]。

土壤层的 C/N 比同时受多种因素影响, 包括凋落物分解形成的有机质的 C/N 比、植物的选择性吸收和释放、立地环境和土壤特性、大气沉降输入等^[29]。我国湿润温带土壤的 C/N 比稳定在 10—12 之间^[33]; 森林土壤约为 13^[34]。根据土壤碳氮储量计算, 全球土壤 C/N 比平均为 13.33^[35], 中国土壤 C/N 比平均在 10—12^[33]。本研究的六盘山地区几种森林的土壤 C/N 比变化在 10.76—12.48, 与前人研究结果一致。

研究表明, 全球植物叶片 C 含量平均为 46.40%^[36], 北京及周边地区植物叶片平均为 45.10%^[37], 大兴安岭不同退化阶段栎林和灌木叶片平均为 45.19%^[38], 即接近全球平均值; 本研究中各森林的叶片 C 含量均高于全球平均值, 除野李子灌丛叶片为稍高外, 其余 3 个乔木树种的叶片高出 4.98%—7.72%。全球植物叶片的 N 含量平均为 2.06%, 中国陆生植物叶片 N 含量平均为 2.02%^[39]; 本研究中各森林叶片的 N 含量变化在

2.37%—2.68%,高出全球平均值。六盘山地区的森林叶子的 C、N 含量均偏高,可能原因有很多;但由于六盘山森林土壤的 C/N 比与全球和全国平均值比较接近,所以可能更多地与气候类型或植物种类有关,但还有待进一步深入研究。

六盘山森林的乔木层的各器官碳含量变化规律不明显;但氮含量均表现为树叶最高,树干最低。4 种森林的各植被层次的碳含量均表现为乔木层>灌木层>草本层>枯落物层,氮含量则表现为草本层>枯落物层>灌木层>乔木层;灌木层和草本层碳氮含量均体现为地上部分>地下部分。根系层土壤的碳氮含量均为桦木林>华山松林>华北落叶松林>野李子灌丛,并均随土层加深而降低。

六盘山地区的华北落叶松林、华山松林、桦木林、野李子灌丛的乔木层碳储量分别为 29.39、56.64、41.81、9.51 t/hm²,占森林生态系统碳储量的 4.84%—12.56%;乔木层氮储量分别为 0.15、0.32、0.20、0.10 t/hm²,占森林生态系统氮储量比例仅 0.42%—0.88%。相比他人研究的人工林,六盘山华北落叶松人工林的乔木层碳储量低于小兴安岭的 15 年生长白落叶松林(36.05 t/hm²)^[40]、湖南会同的 10 年生杉木人工林(30.38 t/hm²)^[41];其乔木层氮储量低于南亚热带的马尾松人工林(0.38 t/hm²)^[15]、桂东南的柳杉人工林(0.52—0.81 t/hm²)^[16]。可见六盘山区森林乔木层的碳、氮储量均不高,这可能主要因水分不足限制了树木生长。

六盘山地区 4 种典型森林生态系统的碳、氮储量均表现为桦木次生林>华山松次生林>华北落叶松人工林>野李子灌丛。除野李子灌丛外,3 种乔木林生态系统的碳储量均高于我国森林平均值(258.82 t/hm²)^[42],说明其固碳能力仍属较高,这可能和六盘山区气候冷凉不利于凋落物分解、土壤多石砾利于有机质易随水渗入深层等条件利于土壤有机质积累有关。

根据 Baties^[43]对全球各类土壤碳储量的研究,在 0—100 cm 土层中,0—30 cm 和 0—50 cm 土层的碳储量所占比例变化在 37%—59%和 62%—81%,分别平均为 49%和 67%;本研究中 4 种森林土壤 0—60 cm 土层的碳储量所占比例为 59.32%—73.79%。从土壤氮储存空间分布看,本研究中森林土壤 0—60 cm 土层所占比例为 58.04%—73.97%。本研究中森林土壤的碳氮储量的土壤深度分布均比较分散,这可能是一些自然生态过程(包括降雨、淋溶、矿质化作用等)的影响结果,有待进一步研究;但至少六盘山土壤的石砾含量较高是个重要原因,很强的土壤渗透性会促进淋溶,减少土壤碳氮含量与储量的深度差异。

在六盘山 4 种森林生态系统中,0—100 cm 土壤层的碳、氮储量所占生态系统总储量的比例最大,其中土壤碳储量变化在 184.60—577.42 t/hm²,高于世界森林土壤平均值(189.00 t/hm²)和我国森林土壤平均值(193.55 t/hm²)^[42];土壤氮储量变化范围为 15.78—46.26 t/hm²,除桦木和华山松两个次生林外,华北落叶松人工林和野李子灌丛的土壤氮储量均低于我国森林土壤平均值(34.64 t/hm²)^[44]。土壤层碳氮储量高低除与植被生长有关外,还与土层厚度关系很大,并受土壤质地、树种和植被类型、气候、林龄、经营历史等多因素影响^[45-46]。六盘山两种次生林的土壤碳氮含量较高,这与其林龄大、前期积累影响强有关;华北落叶松人工林和野李子灌丛的土壤碳氮含量较低,与林龄小、造林和幼林期利于土壤有机质分解、生物量和凋落物量小、立地较差等有关,其不同因素的贡献大小的定量研究还有待进行。

在六盘山 4 种森林生态系统中,植被层与土壤层碳储量之比依次为野李子灌丛的 0.07、桦木次生林的 0.11、华北落叶松人工林的 0.13、华山松次生林的 0.19。相比之下,我国主要森林生态系统的植被层与土壤层的碳储量比值变化在 0.19—0.95,平均为 0.36^[42];全球森林平均为 0.46^[47]。这一方面说明六盘山森林的植被碳储量潜力还未充分发挥,另一方面也说明其土壤碳储存能力相对较高。

本文研究森林样地属于天然次生林、长期生长的天然灌木林及采伐天然次生林后栽植的人工林,因此其土壤碳氮含量和深度分布深受历史上森林的影响,所测结果反映的是这个地区现有森林和林地的碳氮储量和分布特征,不能反映或被解释为新造林后的碳氮储量变化。

参考文献(References):

- [1] Fang J Y, Chen A P, Peng C H, Zhao S Q, Ci L J. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998. *Science*, 2001, 292(5525): 2320-2322.

- [2] Caldeira K, Duffy P B. The role of the southern ocean in uptake and storage of anthropogenic carbon dioxide. *Science*, 2000, 287 (5453) : 620-622.
- [3] 方精云, 郭兆迪, 朴世龙, 陈安平. 1981—2000 年中国陆地植被碳汇的估算. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2007, 37(6) : 804-812.
- [4] 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. *Annals of Botany*, 1999, 84(5) : 577-590.
- [5] Reich P B, Hobbie S E, Lee T, Ellsworth D S, West J B, David T, Tolman D, Knops J M, Naeem S, Trost J. Nitrogen limitation constrains sustainability of ecosystem response to CO₂. *Nature*, 2006, 440(7086) : 922-925.
- [6] Townsend A R, Braswell B H, Holland E A, Penner J E. Spatial and temporal patterns in terrestrial carbon storage due to deposition of fossil fuel nitrogen. *Ecological Applications*, 1996, 6: 806-814.
- [7] Nadelhoffer K J, Downs M R, Fry B. Sinks for N-enriched additions to an oak forest and a red pine plantation. *Ecological Applications*, 1999, 9 (1) : 72-86.
- [8] Körner C. Biosphere responses to CO₂ enrichment. *Ecological Applications*, 2000, 10(6) : 1590-1619.
- [9] Schulze E D. Air pollution and forest decline in a spruce (*Picea abies*) forest. *Science*, 1989, 244(4906) : 776-783.
- [10] Cao M K, Woodward F I. Dynamic responses of terrestrial ecosystem carbon cycling to global climate change. *Nature*, 1998, 393(6682) : 249-252.
- [11] 梅莉, 张卓文, 谷加存, 全先奎, 杨丽君, 黄冬. 水曲柳和落叶松人工林乔木层碳、氮储量及分配. *应用生态学报*, 2009, 20(8) : 1791-1796.
- [12] Tan Z H, Zhang Y P, Yu G R, Sha L Q, Tang J W, Deng X B, Song Q H. Carbon balance of a primary tropical seasonal rain forest. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115(D4) , 411-454.
- [13] Wen X F, Wang H M, Wang J L, Yu G R, Sun X M. Ecosystem carbon exchanges of a subtropical evergreen coniferous plantation subjected to seasonal drought, 2003-2007. *Biogeosciences*, 2010, 7: 357-369.
- [14] Chen X G, Zhang X Q, Zhang Y P, Booth T, He X H. Changes of carbon stocks in bamboo stands in China during 100 years. *Forest Ecology and Management*, 2009, 258(7) : 1489-1496.
- [15] 王卫霞, 史作民, 罗达, 刘世荣, 卢立华, 明安刚, 于浩龙. 我国亚热带几种人工林生态系统碳氮储量. *生态学报*, 2013, 33(3) : 0925-0933.
- [16] 莫德祥, 吴庆标, 林宁, 卓宇. 桂东南柳杉人工林碳氮储量及其分配格局. *生态学杂志*, 2012, 31(4) : 794-799.
- [17] 黄宇, 冯宗炜, 汪思龙, 冯兆忠, 张红星, 徐永荣. 杉木、火力楠纯林及其混交林生态系统 C、N 贮量. *生态学报*, 2005, 25(12) : 3146-3154.
- [18] 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. *应用生态学报*, 2014, 25(2) : 333-341.
- [19] 曹恭祥, 王绪芳, 熊伟, 王彦辉, 于澎涛, 王云霓, 徐丽宏, 李振华. 宁夏六盘山人工林和天然林生长季的蒸散特征. *应用生态学报*, 2013, 24(8) : 2089-2096.
- [20] 徐丽宏, 时忠杰, 王彦辉, 熊伟, 于澎涛. 六盘山主要植被类型冠层截留特征. *应用生态学报*. 2010, 21(10) : 2487-2493.
- [21] 徐丽宏, 王彦辉, 熊伟, 于澎涛. 六盘山典型植被类型土壤水文生态功能研究. *林业科学研究*, 2012, 25(4) : 456-463.
- [22] 时忠杰, 王彦辉, 徐丽宏, 熊伟, 于澎涛, 胡哲森, 高吉喜. 六盘山香水河小流域地形与植被类型对降雨径流系数的影响. *中国水土保持科学*, 2009, 7(4) : 31-37.
- [23] 刘延惠, 王彦辉, 于澎涛, 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.
- [24] 刘延惠, 王彦辉, 于澎涛, 熊伟, 莫菲, 王占印. 六盘山主要植被类型的生物量及其分配. *林业科学研究*, 2011, 24(4) : 443-452.
- [25] Li H T, Wang S N, Gao L P, Yu G R. The carbon storage of the subtropical forest vegetation in central Jiangxi Province. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(2) : 693-704.
- [26] 田大伦. 杉木林生态系统定位研究方法. 北京, 科学出版社, 2004: 320-341.
- [27] Bashkin M A, Binkley D. Changes in soil carbon following afforestation in Hawaii. *Ecology*, 1998, 79(3) : 828-833.
- [28] 刘增文, 王乃江, 李雅素, 吕月玲. 森林生态系统稳定性的养分原理. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2006, 34(12) : 129-134.
- [29] Sterner R W, Elser J J. Ecological Stoichiometry: the Biology of Elements from Molecules to the Biosphere. *Science*, 2002, 423(6937) : 225-226.
- [30] Agren G I. The C:N:P stoichiometry of autotrophs-theory and observations. *Ecology Letters*, 2004, 7(3) : 185-191.
- [31] 项文化, 田大伦. 不同年龄阶段马尾松人工林养分循环的研究. *植物生态学报*, 2002, 26(1) : 89-95.
- [32] 郭剑芬, 杨玉盛, 陈光水, 林鹏, 谢锦升. 森林凋落物分解研究进展. *林业科学*, 2006, 42(4) : 93-100.
- [33] 王绍强, 于贵瑞. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征. *生态学报*, 2008, 28(8) : 3937-3947.
- [34] Camargo P B, Trumbore S E, Martinelli L A, Davidson E A, Nepstad D C, Victoria R L. Soil carbon dynamics in regrowing forest of eastern Amazonia. *Global Change Biology*, 1999, 5(6) : 693-702.
- [35] Post W M, Pastor J, Zinke P J, Stangenberger A G. Global patterns of soil nitrogen storage. *Nature*, 1985, 317(6038) : 613-616.

- [36] Elser J J, Sterner R W, Gorokhova E, Fagan W F, Markow T A, Cotner J B, Harrison J F, Hobbie S E, Odell G M, Weider L J. Biological stoichiometry from genes to ecosystems. *Ecology Letters*, 2000, 3(6): 540-550.
- [37] 韩文轩, 吴漪, 汤璐瑛, 陈雅涵, 李利平, 贺金生, 方精云. 北京及周边地区植物叶的碳氮磷元素计量特征. *北京大学学报: 自然科学版*, 2009, 45(5): 855-860.
- [38] 甘秋妹, 孙海龙, 郑红, 郝龙飞, 刘婷岩. 大兴安岭不同退化阶段土壤和植物 C、N、P 浓度及其化学计量特征. *森林工程*, 2013, 29(3): 1-5.
- [39] 贺金生, 韩兴国. 生态化学计量学: 探索从个体到生态系统的统一化理论. *植物生态学报*, 2010, 34(1): 2-6.
- [40] 马伟, 孙玉军, 郭孝玉, 巨文珍, 穆景森. 不同林龄长白落叶松人工林碳储量. *生态学报*, 2010, 30(17): 4659-4667.
- [41] 方晰, 田大伦. 杉木人工林 C 库与 C 吸存的动态研究. *广西植物*, 2006, 26(5): 516-522.
- [42] 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.
- [43] Batjes N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *European Journal of Soil Science*, 1996, 47(2): 151-163.
- [44] 张春娜, 延晓冬, 杨剑虹. 中国森林土壤氮储量估算. *西南农业大学学报: 自然科学版*, 2004, 26(5): 572-575.
- [45] 骆土寿, 陈步峰, 陈永富, 杨彦臣, 杨秀森, 李大江. 海南岛霸王岭热带山地雨林采伐经营初期土壤碳氮储量. *林业科学研究*, 2000, 13(2): 123-128.
- [46] Finer 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.
- [47] Dixon R K, Solomon A M, Brown S, Houghton R A, Trexler M C, Wisniewski J. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science*, 1994, 263(5144): 185-190.