

DOI: 10.5846/stxb201712242312

岳军伟, 关晋宏, 邓磊, 张建国, 李国庆, 杜盛. 甘肃亚高山云杉人工林生态系统碳、氮储量动态和分配格局. 生态学报, 2018, 38(21): - .

Yue J W, Guan J H, Deng L, Zhang J G, Li G Q, Du S. Dynamics and allocation patterns of carbon and nitrogen storage in *Picea asperata* plantations in subalpine areas of Gansu Province. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(21): - .

## 甘肃亚高山云杉人工林生态系统碳、氮储量动态和分配格局

岳军伟<sup>1,5</sup>, 关晋宏<sup>2</sup>, 邓磊<sup>3</sup>, 张建国<sup>4</sup>, 李国庆<sup>1,2</sup>, 杜盛<sup>1,2,\*</sup>

1 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, 杨凌 712100

2 西北农林科技大学水土保持研究所, 杨凌 712100

3 青海大学农林科学院, 西宁 810016

4 黄河水利委员会黄河上中游管理局, 西安 710021

5 中国科学院大学, 北京 100049

**摘要:**云杉是甘肃亚高山地区重要的造林树种, 研究其生态系统碳、氮储量的动态变化和分配格局有利于评价云杉人工造林后的生态恢复效果。以甘南、定西地区不同林龄(包括幼龄林、中龄林、近熟林和成熟林)的云杉人工林为研究对象, 共设置 16 块调查样地。在野外调查、样品采集和分析的基础上, 估算了其生态系统的碳、氮储量。结果显示: 云杉林乔木不同器官的碳含量相对稳定, 氮含量则与器官类型有密切关系; 同一土层不同龄级的土壤碳、氮含量无明显差异。从乔木层、灌木层、枯落物层到草本层碳氮含量比值依次减小, 土壤层碳氮含量比值最低。该地区云杉人工林生态系统总碳、氮储量分别为 257.75—430.23 t/hm<sup>2</sup> 和 20.50—29.88 t/hm<sup>2</sup>。随着林龄的增加, 植被层碳、氮储量增加显著, 分别从 15.5 t/hm<sup>2</sup> 和 0.24 t/hm<sup>2</sup> 增加到 143.51 t/hm<sup>2</sup> 和 1.65 t/hm<sup>2</sup>。土壤层(0—100 cm)碳、氮储量分别为 242.23—367.79 t/hm<sup>2</sup> 和 20.26—29.58 t/hm<sup>2</sup>, 在整个生态系统各龄级中所占比例均超过 60% 和 90%。生态系统和土壤层(0—100 cm)碳、氮储量在不同龄级间无显著差异。生态系统中土壤层、乔木层及灌、草、枯落物层的碳储量比例分别为 85.72%、13.44% 和 0.84%, 氮储量比例分别为 97.60%、2.08% 和 0.32%。

**关键词:**云杉人工林; 碳储量; 氮储量; 龄级; 分配格局

## Dynamics and allocation patterns of carbon and nitrogen storage in *Picea asperata* plantations in subalpine areas of Gansu Province

YUE Junwei<sup>1,5</sup>, GUAN Jinhong<sup>2</sup>, DENG Lei<sup>3</sup>, ZHANG Jianguo<sup>4</sup>, LI Guoqing<sup>1,2</sup>, DU Sheng<sup>1,2,\*</sup>

1 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China

2 Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, China

3 Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Qinghai University, Xining 810016, China

4 Upper and Middle Yellow River Bureau, Yellow River Conservancy Commission of the Ministry of Water Resources, Xi'an 710021, China

5 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract:** *Picea asperata* is an important afforestation species in the subalpine region of Gansu Province. The estimation of carbon and nitrogen storage in *P. asperata* plantations is helpful to evaluate the ecological restoration effects after afforestation. To estimate the dynamics and allocation patterns of carbon and nitrogen storage, 16 field plots of different

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA05050202)

收稿日期: 2017-12-24; 网络出版日期: 2018-00-00

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: shengdu@ms.iswc.ac.cn

forest ages (including young forests, mid-aged forests, near-mature forests, and mature forests) in the *P. asperata* plantations in Gannan Tibetan Autonomous Prefecture and Dingxi City were established. Vegetation, litter, and soil were investigated and sampled for laboratory analyses. The results showed that carbon contents of different organs in the tree layer were relatively stable, while nitrogen contents were closely related to organ types. Carbon and nitrogen contents in the same soil layer had no significant difference among different stand ages. The ratio of carbon to nitrogen content was higher in tree layer than that in shrub, grass, and litter layer, and soil layer had the lowest ratio. In this area, the total storage of carbon and nitrogen in the ecosystem was up to 257.75—430.23 and 20.50—29.88 t/hm<sup>2</sup>, respectively. As stand age increased, the biomass carbon storage increased from 15.51 to 143.51 t/hm<sup>2</sup> while the nitrogen in biomass increased from 0.24 to 1.65 t/hm<sup>2</sup>. However, carbon and nitrogen storage in the soil (0—100 cm) was 242.23—367.79 and 20.26—29.58 t/hm<sup>2</sup>, respectively, and showed no significant differences among stand age groups. Soil stored more than 60% of carbon storage and more than 90% of nitrogen storage in the total ecosystem in each age class. Carbon storage in soil layer, tree layer, and shrub/grass/litter layer accounted for 85.72%, 13.44%, and 0.84% of that in the whole ecosystem, while nitrogen storage in the corresponding layers were 97.60%, 2.08%, and 0.32%, respectively.

**Key Words:** *Picea asperata* plantation; carbon storage; nitrogen storage; age class; allocation pattern

通过人工造林提高区域植被碳固存能力作为应对气候变化的措施之一已被广泛接受<sup>[1]</sup>。人工林正逐步成为世界森林资源的关键组分,并在维持全球碳循环和缓解大气 CO<sub>2</sub> 浓度上升方面起着重要作用。联合国粮农组织(FAO)发布的 2010 年全球森林资源评估报告指出,全球人工林面积为 2.64×10<sup>8</sup> hm<sup>2</sup>,人工造林是许多地区森林面积增加的主要途径,欧洲地区过去 10 年间森林面积净增加量约一半是由人工林造林所贡献的<sup>[2]</sup>。在我国 20 世纪末的后 20 年里,由人工林增加带来的碳汇增量为 4.5×10<sup>8</sup> t<sup>[3]</sup>,贡献了约 80% 的森林碳汇增量,是森林碳汇增量主要贡献者<sup>[4]</sup>。人工造林被认为是抵消甚至逆转因森林采伐导致的碳排放,实现碳积累的有效途径<sup>[5]</sup>。

森林生态系统的碳循环过程会受到其它养分元素的制约,氮是其中主要的制约因素之一<sup>[6]</sup>。有研究表明,氮素输入增加会在短期内提高幼龄林的碳储量,但是长期氮素输入对生态系统的碳储量增加效应并不明显,甚至会降低其生产力和碳储量<sup>[7]</sup>。碳、氮在植物体内的分配格局反映了植物对周围环境资源的利用能力,它们在生态系统物质循环过程中相互作用,对生态系统的生产力、固碳潜力以及稳定性都有着至关重要的作用<sup>[8]</sup>。要理解和预测这种作用,首先需要量化不同地区不同森林生态系统的碳、氮储量及其在不同组分中的分配格局<sup>[9]</sup>。

云杉(*Picea asperata*)主要分布在陕西西南部(凤县)、甘肃东部(两当)及白龙江流域、洮河流域、四川岷江流域上游及大小金川流域<sup>[10]</sup>。云杉是中国西部和西南亚高山地区地带性植被的建群种,也是甘肃人工造林的主要树种之一,第七次全国森林资源清查统计显示甘肃的云杉人工林面积约 4.99×10<sup>4</sup> hm<sup>2</sup>。甘肃亚高山云杉人工林对白龙江流域水源涵养和生态多样性保育起着重要作用,也是保障西北地区和青藏高原东南部生态安全的重要绿色屏障。目前,关于云杉人工林的研究主要集中在乔木层生物量和生产力<sup>[11]</sup>、林分密度调控<sup>[12]</sup>、植被和土壤碳固存<sup>[13-14]</sup>等方面,而对云杉人工林碳、氮储量动态及其在生态系统中分配格局研究较为缺乏。本文选择不同林龄的云杉人工林,研究其生态系统各组分的碳、氮储量的动态变化和分配特点,旨在阐明该地区云杉人工林的碳、氮储存功能,为云杉人工造林后的生态恢复效果评价提供科学依据。研究结果也将为森林碳、氮储量模型的开发、评估和在更大范围内确定碳、氮储量和林龄关系提供参考。

## 1 研究区概况与研究方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于甘肃省甘南藏族自治州和定西市。甘南藏族自治州位于甘肃西南部,青藏高原东北缘,介于

33°06′—35°44′N、100°46′—104°44′E 之间,平均海拔 3000 m。该区植被覆盖度较高,属典型的高原大陆性气候,多年平均降雨量为 400—800 mm,降雨季节性明显,主要集中在 7—9 月,年平均气温仅 1—3 ℃,年极端最高气温为 33.8 ℃,年极端最低气温为-29.6 ℃,全年平均日照时数 2200—2400 h<sup>[15]</sup>。定西市位于甘肃省中部,介于 34°26′—35°35′N、103°52′—105°13′E 之间。气候属于南温带半湿润-中温带半干旱区,大陆性气候特征明显,海拔 1640—3900 m,年均气温 5.7—7.7 ℃,年均降水量 350—600 mm,降水同样集中在 7—9 月,无霜期 142 d<sup>[16]</sup>。研究区土壤类型以山地棕壤和山地褐土为主。林内乔木层中云杉占绝对优势地位,林下灌木、草本数量较少,群落结构比较单一。乔木层中混有少量其它树种,如多毛樱桃(*Cerasus polytricha*)、川滇柳(*Salix rehderiana*)、山楂(*Crataegus pinnatifida*)、山杨(*Populus davidiana*)等。林下灌木主要有:绣线梅(*Neillia thyriflora*)、箭竹(*Fargesia spathacea*)、陇塞忍冬(*Lonicera tangutica*)等,草本植物主要有:苔草(*Carex tristachya*)、东方草莓(*Fragaria orientalis*)、牛尾蒿(*Artemisia dubia*)、天名精(*Carpesium abrotanoides*)等。

## 1.2 研究方法

### 1.2.1 标准地建立

调查于 2012 年 7—8 月进行,根据当地林业部门提供的资料,在上述研究区域选择不同造林时期的云杉人工林作为研究对象,共设置 6 块 50 m×20 m 的长方形样地(在地形破碎区域设置 30 m×20 m 样地)。样地基本情况见表 1。

表 1 云杉人工林样地特征

Table 1 Stand characteristics of survey plots in *P. asperata* plantation

林龄 Stand age/a	坡向 Aspect	坡度 Slope/(°)	海拔 Altitude/m	郁闭度 Crown density/%	林分密度 Density/ (株/hm <sup>2</sup> )	平均胸径 DBH/cm	平均树高 Height/m
15	西 W	9	2397	50	1232	4.84	2.83
18	西北 NW	16	3083	65	2081	7.17	5.02
19	北 N	15	3041	88	5435	7.83	5.96
19	东南 SE	30	2197	70	1501	7.19	4.74
21	东北 NE	12	2383	60	1346	8.76	4.93
25	东北 NE	15	3052	92	2260	11.96	6.73
25	西北 NW	4	3008	75	2874	8.71	6.53
27	西北 NW	38	2640	90	4653	7.95	6.00
27	东北 NE	39	2646	73	3453	6.63	4.01
35	西 W	14	2637	90	2044	11.73	7.05
35	北 N	8	2650	92	2137	12.69	7.94
35	西北 NW	33	3044	68	2166	8.87	5.69
37	西南 SW	28	2960	82	4058	9.83	8.39
45	东北 NE	25	2391	73	1765	19.14	17.12
46	西南 SW	36	2409	87	1063	24.49	18.07
55	西南 SW	35	2365	85	1270	25.64	18.96

### 1.2.2 样地调查及样品采集

乔木层调查及林龄确定:(1)对各样地内的林木进行每木检尺,起测胸径为 2 cm,记录其胸径和树高。按大、中、小径级分别选择 3—5 株样树,每株样树分干、枝、叶、根采集不少于 300 g 的植物样品带回实验室待处理分析。(2)测定并计算林分的平均树高、平均胸径和密度。同时从各样地内选择 3—5 株标准木,于胸高 1.3 m 处钻取树芯 3—5 个,带回实验室,经打磨后,采用交叉定年法确定树木的年轮数,以标准木平均年轮数作为该样地的林龄。龄级划分根据甘肃省林业厅 2012 年颁布的《甘肃省林地落界实施细则》进行,即林龄小于 20 年为幼龄林,21—30 年为中龄林,31—40 年为近熟林,41—60 年为成熟林,61 年以上为过熟林。

灌木、草本和枯落物层调查:在每个乔木样地内沿对角线设置 3 个 2 m×2 m 的灌木样方,全部收获后分

叶、枝、根称其鲜重,将 3 个样方内枝、叶、根分别混合均匀后取混合样,每个样品重量不少于 300 g。在每个灌木样方内设置一个 1 m×1 m 的草本样方,分地上和地下部分收获后称其鲜重并取样。草本样方同时也作为枯落物收集样方,将样方内枯落物全部收集称重,并取不少于 300g 的样品。将灌木、草本层、枯落物的样品称重后带回实验室,用于碳、氮含量的测定。

土壤调查:在每个标准样方内按 S 形取样法设置 10 个土壤取样点,采用土钻法,按 0—10、10—20、20—30、30—50 cm 和 50—100 cm 分层钻取土壤样品,将相同样地内同一层次土壤样品混匀,取样带回实验室进行有机碳、氮含量测定。同时在样方内选取一块具有代表性的地段挖取土壤剖面,层次划分与土钻取样相同,用 100 cm<sup>3</sup> 环刀取各层原状土,带回实验室 105 °C 下烘干至恒量以计算土壤容重。

### 1.2.3 碳、氮含量测定

将野外采集的乔、灌、草各器官及枯落物样品置于 85 °C 烘箱烘至恒重求含水率。用于植物碳、氮含量测定的烘干样品粉碎并过 0.25 mm 筛。土壤样品自然风干,研磨后过 2 mm 筛(收集大于 2 mm 的砾石并称重),再用四分法取部分样品研磨过 0.25 mm 筛装袋标记后备测。植物和土壤样品碳含量测定均采用重铬酸钾-硫酸氧化外加热法,氮含量的测定采用凯氏定氮法<sup>[17]</sup>。

### 1.2.4 生物量测算

乔木生物量估算采用程堂仁等<sup>[18]</sup>所建立的云冷杉生物量方程,构建该方程的区域与本研究区地域相近,生物量估算结果经根茎比验证处于合理范围。由胸径、树高计算得到单株各器官生物量,进一步估算整株生物量和样地内所有乔木的生物量。

灌木、草本及枯落物生物量估算:根据计算出的样品含水率,进而推算出样地内单位面积灌木、草本和枯落物生物量。

### 1.2.5 各层碳、氮储量及含量计算

碳、氮储量计算:乔木、灌木、草本及枯落物各组碳(氮)储量为对应组分生物量乘以碳(氮)含量。植被碳(氮)储量为乔木层、林下灌、草层及枯落物层碳(氮)储量之和。

土壤层碳、氮储量计算:0—100 cm 土层土壤碳(氮)储量为各层土壤碳(氮)储量之和。土壤各层碳(氮)储量计算公式为:

$$S_j = \sum C_j \times D_j \times E_j \times (1 - G_j) \times 0.1$$

式中, $S_j$ 为第  $j$  层土壤碳(氮)储量( $t/hm^2$ ); $C_j$ 为第  $j$  层土壤碳(氮)含量( $g/kg$ ); $D_j$ 为第  $j$  层土壤容重( $g/cm^3$ ); $E_j$ 为第  $j$  层土壤厚度( $cm$ ); $G_j$ 为直径 $>2$  mm 的砾石所占的体积百分比。

各样树的碳、氮含量是相应生物量组分的加权平均值,以各样树平均碳、氮含量作为乔木层的碳、氮含量。样地水平的灌木和草本层碳、氮含量是各样地内灌木和草本的相应生物量组分的加权平均值;对于土壤层,则是样地各层土壤质量加权平均值。计算公式为:

$$C = \frac{\sum_1^n C_i \times W_i}{\sum_1^n W_i}$$

式中, $C$ 为各样地内灌木层、草本层、土壤层平均碳、氮含量; $C_i$ 为灌木层各器官、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。

## 1.3 数据处理

利用 SPSS 20.0 软件对数据进行统计分析,采用单因素方差分析法(one-way ANOVA)和最小显著差异法(LSD)检验不同龄级间云杉林生态系统各组分和不同土层间碳、氮含量及储量的差异显著性。

## 2 结果与分析

### 2.1 云杉人工林各层碳氮含量

云杉不同器官的碳、氮含量分别为 488.68—535.44  $g/kg$  和 3.08—10.55  $g/kg$ (图 1)。云杉叶碳含量平均

值最高,为 535.44 g/kg,其次是干和枝,约为 520.0 g/kg,根的碳含量最低,为 488.68 g/kg。氮含量同样是云杉叶最高,为 10.55 g/kg,与枝和根无显著差异,但显著高于树干的氮含量(3.08 g/kg)。

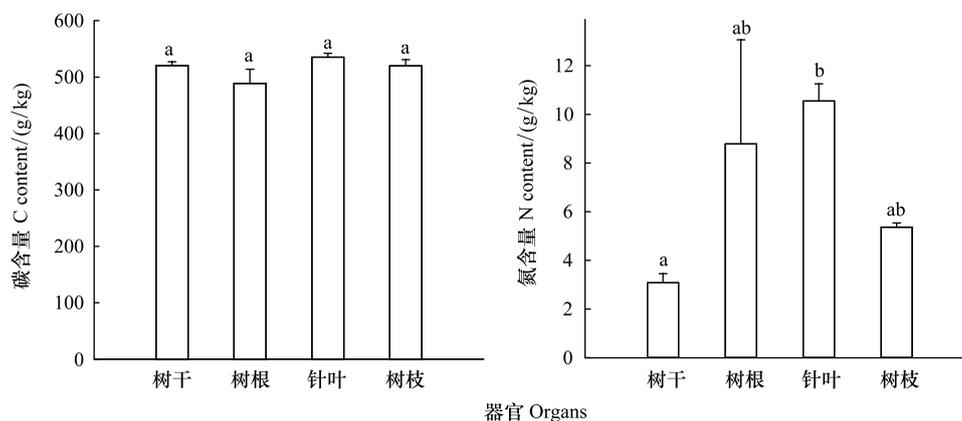


图 1 云杉人工林乔木层各器官的碳、氮含量

Fig.1 C and N contents of different organs of arbor layer in the *P. asperata* plantation

不同小写字母表示不同器官间差异显著( $P < 0.05$ )

林下灌木层各器官的碳、氮含量分别为 444.25—503.35 g/kg 和 6.73—26.62 g/kg(图 2),碳含量在各器官间相近,而氮含量则是叶片普遍高于枝和根。草本层碳、氮含量分别为 291.27—430.35 g/kg 和 10.30—25.08 g/kg,地上部分碳、氮含量数值普遍大于地下部分。枯落物层为 342.24—460.43 g/kg 和 9.83—12.12 g/kg。经差异显著性检验,草本层各器官以及枯落物的碳、氮含量在不同龄级间无显著差异,灌木各器官在幼龄林、中龄林和近熟林间无显著差异。

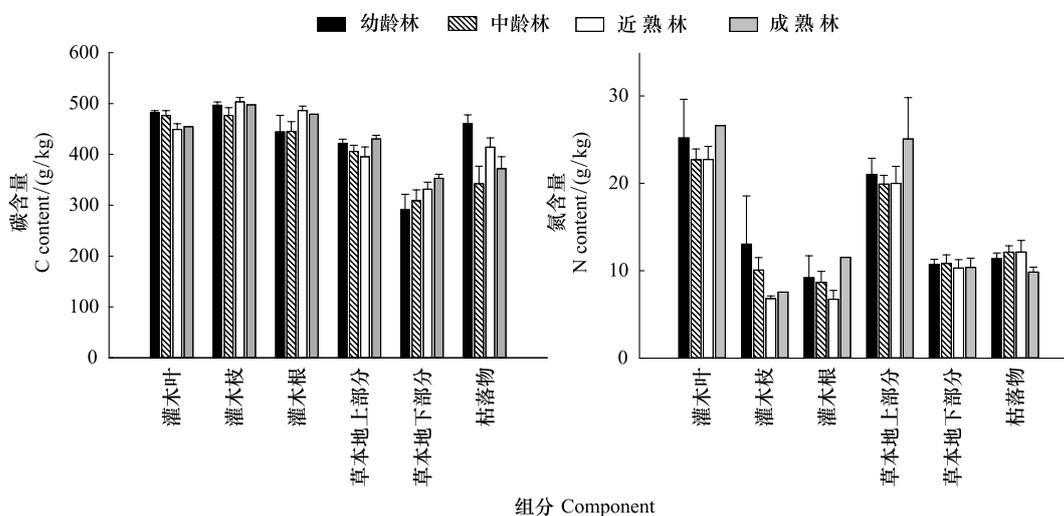


图 2 不同龄级云杉人工林灌木层、草本层和枯落物层的碳、氮含量

Fig.2 C and N contents in shrub, herb and litter layers in *P. asperata* plantation with different age classes

云杉人工林各土壤层的碳、氮含量分别为 9.51—121.32 g/kg 和 0.96—7.52 g/kg,同一土层不同龄级间碳、氮含量无显著差异(图 3)。同一龄级的土壤碳、氮含量随土壤深度增加显著减小,在幼龄林、中龄林、近熟林和成熟林中,与 0—10 cm 土层相比,50—100 cm 土层的碳含量仅为前者的 12.12%、21.55%、26.67% 和 10.81%,氮含量为前者的 19.16%、28.90%、28.33% 和 16.10%。

为了深入理解碳、氮储量的分配格局,我们计算了云杉人工林不同层次碳氮元素含量比值。乔木各器官碳氮含量比为干(175.56)>枝(97.34)>根(93.39)>针叶(51.27),乔木层碳氮比为 113.46。显著性检验结果

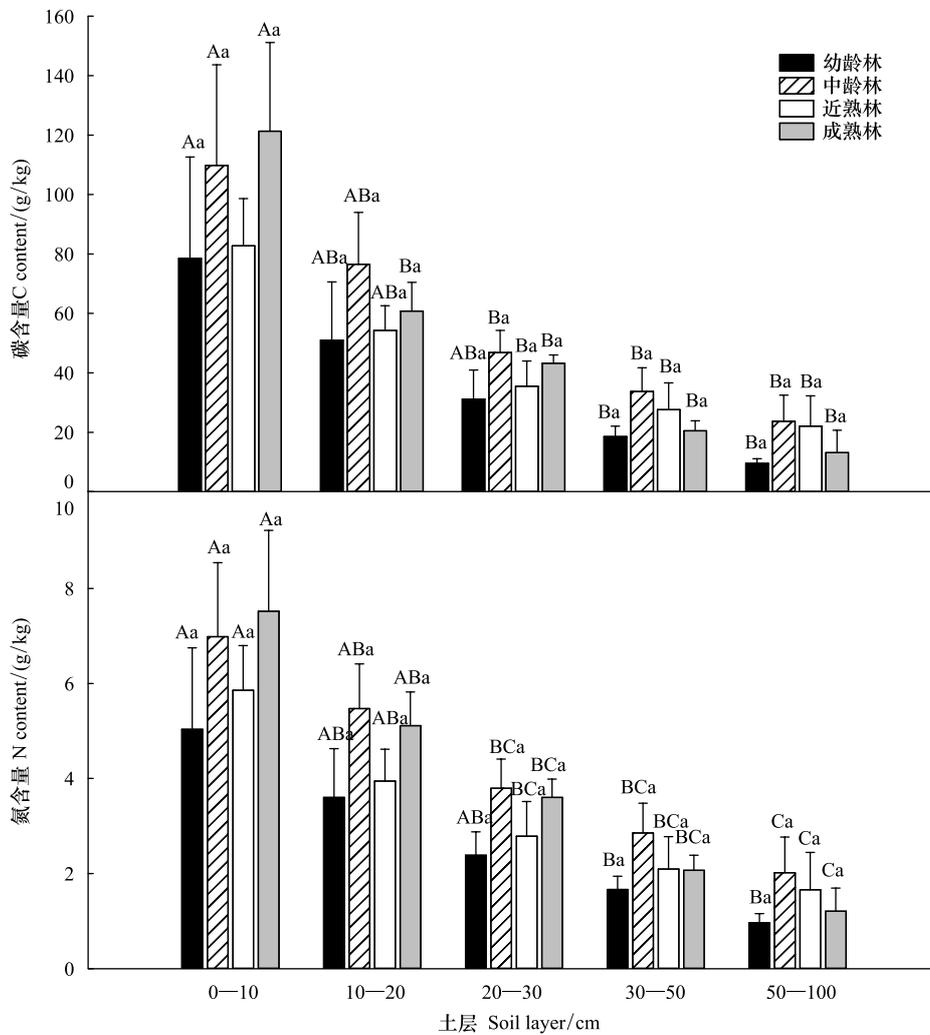


图3 不同林龄云杉人工林各土壤层的碳、氮含量

Fig.3 Soil C and N contents of different soil layers in *P. asperata* plantation with different stand age classes

不同大写字母表示同龄级不同土层间差异显著,不同小写字母表示同土层不同龄级间差异显著( $P < 0.05$ )

显示,碳氮比在枝、根、针叶之间差异不显著,但均显著低于树干。在灌木和草本层,随着木质部生物量比例的降低,灌木、草本层的碳氮比依次降低,分别为 55.85 和 25.46;枯落物层的碳氮比(34.36)介于草本和灌木之间;土壤层的碳氮比(12.73)最小(表 2)。不同林龄间的灌木、草本、枯落物和土壤层的碳氮比无显著差异。

表 2 不同龄级云杉人工林林下层、枯落物层和土壤层的碳氮比

Table 2 The ratio of C:N in different age classes of understory, litter and soil layers in *P. asperata* plantation

组分 Component	幼龄林 Young forest (Y)	中龄林 Mid-aged forest (MD)	近熟林 Near-mature forest (NM)	成熟林 Mature forest (M)	平均值 Mean
灌木层 Shrub layer	51.78±17.41	49.59±7.93	69.87±6.27	43.47	55.85
草本层 Herb layer	23.41±1.50a	24.57±1.12a	29.70±1.90b	23.35±4.95a	25.46
枯落物 Litter layer	40.92±3.7a	28.28±2.60a	35.30±3.77a	37.85±2.60a	34.36
土壤层 Soil layer	11.73±1.13a	12.81±0.67a	13.75±0.74a	12.59±0.79a	12.73

数据表示为平均值±标准误,同行不同小写字母表示龄级间差异显著( $P < 0.05$ )

## 2.2 云杉人工林土壤碳、氮储量

云杉人工林 0—10 cm 土层土壤碳、氮储量随林龄增加而显著增加。其它土层碳、氮储量随林龄变化差异

不显著。土壤碳、氮储量(0—100 cm)随林龄增加呈先增后减的变化趋势,但这种变化并未达到显著水平,平均碳、氮储量占生态系统碳、氮储量的比例分别为 85.72%和 97.60%。中龄林的土壤碳、氮储量最高,为 367.79 t/hm<sup>2</sup>和 29.58 t/hm<sup>2</sup>,幼龄林的土壤碳、氮储量最小,为 242.23 t/hm<sup>2</sup>和 20.26 t/hm<sup>2</sup>(表 3)。

不同龄级云杉人工林土壤碳、氮储量均随土层深度增加而降低。土壤碳、氮储量主要集中于 0—30 cm 土层,4 个龄级的人工林 0—30 cm 土层平均碳储量分别为 126.80、161.73、152.24 t/hm<sup>2</sup>和 189.13 t/hm<sup>2</sup>,占 0—100 cm 土壤层碳储量的比重分别为 52.35%、43.97%、46.96%和 65.96%。

表 3 云杉人工林土壤层碳、氮储量/(t/hm<sup>2</sup>)  
Table 3 C, N storage of soil layer in *P. asperata* plantation

龄级 Age classes	土壤层 Soil layer/cm					
	0—10	10—20	20—30	30—50	50—100	
C	幼龄林 Y	34.63±4.97a	51.38±19.75a	40.79±14.22a	52.98±15.83a	62.45±11.59a
	中龄 MD	62.22±10.084ab	56.56±8.19a	42.95±6.25a	76.03±14.05a	130.03±29.46a
	近熟林 NM	65.73±13.94ab	51.59±6.60a	34.92±6.87a	55.37±14.29a	116.56±42.47a
	成熟林 M	92.77±20.18b	55.69±10.42a	40.67±3.90a	27.35±13.79a	70.24±50.60a
N	幼龄林 Y	2.53±0.09a	3.68±1.02a	3.06±0.75a	4.64±1.21a	6.35±1.43a
	中龄 MD	4.26±0.44ab	4.18±0.45a	3.49±0.52a	6.36±1.08a	11.29±2.56a
	近熟林 NM	4.72±1.00ab	3.75±0.57a	2.74±0.61a	4.21±1.09a	8.66±3.19a
	成熟林 M	5.78±1.17b	4.67±0.73a	3.39±0.45a	2.77±1.39a	6.45±4.01a

同列不同小写字母表示龄级间差异显著( $P < 0.05$ )

### 2.3 不同林龄云杉人工林植被及枯落物层碳氮储量

由表 4 可以看出,乔木层碳、氮储量随林龄的增加而显著增加。碳、氮储量分别从幼龄林的 13.49 t/hm<sup>2</sup>和 0.17 t/hm<sup>2</sup>迅速增加至成熟林 138.93 t/hm<sup>2</sup>和 1.53 t/hm<sup>2</sup>,占生态系的比例也从幼龄林的 5.23%和 0.83%大幅增加至成熟林的 32.29%和 6.18%。各龄级中,树干平均碳储量占乔木平均碳储量的比例为 50%左右,是乔木碳储量的主体。枝、根和叶平均碳储量比例为分别为 20%、13%和 8%。树干占乔木层平均氮储量的比例为 37.90%—43.50%,其次为枝(21.12%—24.79%),叶的比例最小(15.11%—19.51%)。各器官平均碳、氮储量占乔木层碳、氮储量的比例在不同龄级间无显著变化。

表 4 云杉人工林乔木层碳、氮储量/(t/hm<sup>2</sup>)  
Table 4 C and N storage in arbor layer in *P. asperata* plantation

龄级 Age class	干 Stem	枝 Branch	叶 Needle	根 Root	乔木 Arbor	
C	幼龄林 Y	7.59±4.22a	2.83±1.55a	1.14±0.64a	1.93±1.18a	13.49±7.58a
	中龄林 MD	12.90±3.12a	4.92±1.23ab	2.00±0.50a	3.17±0.74ab	22.98±5.59ab
	近熟林 NM	26.75±3.82a	10.28±1.54b	4.32±0.61a	6.82±1.08b	48.17±7.02b
	成熟林 M	77.86±13.92b	28.60±5.10c	13.48±2.47b	18.98±3.38c	138.93±24.86c
N (×0.01)	幼龄林 Y	7.41±4.53a	3.60±2.04a	2.71±1.58a	3.32±1.50a	17.04±9.52a
	中龄林 MD	9.24±1.72a	5.93±1.34a	4.60±1.14a	4.06±0.89a	23.92±5.01a
	近熟林 NM	20.15±4.31a	11.82±1.65a	9.08±1.38a	7.31±1.35a	48.37±7.77a
	成熟林 M	57.87±10.33b	37.01±6.59b	31.53±5.75b	26.29±4.69b	152.70±27.36b

各龄级灌木层碳、氮储量分别为 0.17—2.08 t/hm<sup>2</sup>和 0.00—0.03 t/hm<sup>2</sup>,各器官碳储量大小为根>枝>叶,氮储量大小为枝>根>叶(表 5)。成熟林的林下灌木碳、氮储量最小,显示了成熟林郁闭后的遮阴作用。各龄级草本层碳、氮储量分别为 0.17—0.77 t/hm<sup>2</sup>和 0.01—0.04 t/hm<sup>2</sup>。草本层碳储量在不同龄级无显著差异,而氮储量在成熟林阶段显著小于幼龄林。枯落物碳、氮储量从幼龄林的 0.32 t/hm<sup>2</sup>和 0.01 t/hm<sup>2</sup>显著增加到成熟林的 4.25 t/hm<sup>2</sup>和 0.11 t/hm<sup>2</sup>,这是枯落物随林龄增加逐渐积累的结果。灌、草和枯落物层占生态系统碳储量的比例为 0.84%,占生态系统氮储量的比例为 0.32%。

表 5 云杉人工林灌木层、草本层和枯落物层的碳、氮储量/(t/hm<sup>2</sup>)Table 5 C and N storage in shrub, herb and litter layers in *P. asperata* plantation

龄级 Age class	灌木层 Shrub layer				草本层 Herb layer			枯落物层 Litter layer	
	根 Root	枝 Branch	叶 Leaf	合计 Total	叶 Leaf	根 Root	合计 Total		
C	幼龄林 Y	0.49±0.31ab	0.37±0.14ab	0.06±0.03a	0.92±0.36ab	0.35±0.11a	0.43±0.15a	0.77±0.27a	0.32±0.18a
	中龄林 MD	0.45±0.15ab	0.55±0.23ab	0.06±0.02a	1.06±0.31ab	0.18±0.04ab	0.22±0.05a	0.39±0.07a	0.74±0.10a
	近熟林 NM	0.93±0.18a	1.07±0.43a	0.07±0.04a	2.08±0.57a	0.15±0.07ab	0.54±0.22a	0.68±0.27a	1.26±0.29a
	成熟林 M	0.07±0.075b	0.09±0.09b	0.02±0.02a	0.17±0.17b	0.07±0.04b	0.10±0.07a	0.17±0.10a	4.25±1.86b
N	幼龄林 Y	0.77±0.33ab	1.12±0.72a	0.38±0.26a	2.27±1.12ab	1.88±0.71a	1.68±0.64a	3.56±1.34a	0.74±0.37a
	中龄林 MD	0.73±0.18ab	1.03±0.30a	0.26±0.09a	2.01±0.35ab	0.84±0.15ab	0.77±0.19a	1.61±0.33ab	2.77±0.54a
	近熟林 NM	1.32±0.38a	1.36±0.47a	0.35±0.17a	3.03±0.80a	0.61±0.25b	1.64±0.59a	2.25±0.77ab	3.49±0.46a
	成熟林 M	0.17±0.17b	0.13±0.13a	0.10±0.10a	0.40±0.40b	0.36±0.16b	0.34±0.25a	0.70±0.41b	11.40±5.60b

## 2.4 云杉人工林生态系统碳氮储量及分配

不同龄级云杉人工林生态系统碳储量变化总体上呈现随林分生长而增加的趋势,分别为 257.75、392.97、376.36、430.23 t/hm<sup>2</sup>。植被层碳储量从幼龄林的 15.51 t/hm<sup>2</sup>增加到成熟林的 143.51 t/hm<sup>2</sup>,增加了 9.25 倍(表 6)。其占生态系统碳储量的比重也从幼龄林的 6.02%显著增加到成熟林的 33.36%。土壤碳储量占生态系统碳储量的比重在各龄级均超过 60%,在幼龄林和中龄林阶段,这一比例甚至超过 90%,表明土壤是生态系统碳储量的主要贡献者,但其变化趋势为随林龄增加而逐渐减小,与生物量碳的变化趋势相反。

幼龄林、中龄林、近熟林和成熟林生态系统氮储量分别为 20.50、29.88、24.65 t/hm<sup>2</sup>和 24.70 t/hm<sup>2</sup>。其中生物量部分的氮储量随林龄增长持续增加,其中成熟林的氮储量显著高于其它龄级,占生态系统氮储量的比重整体上也随林龄的增加逐渐增大,分别为 1.17%、1.00%、2.31%、6.68%。土壤部分占生态系统氮储量的比例则表现出随林龄增加而减小的趋势,但其对生态系统各龄级的氮储量的贡献率仍超过 90%,在中龄林中甚至高达 98.99%。

云杉林生态系统碳储量空间分配格局为:土壤层(85.72%)>乔木层(13.44%)>灌草层和枯落物层(0.84%),氮储量为土壤层(97.60%)>乔木层(2.08%)>灌草层和枯落物层(0.32%)。

表 6 云杉人工林生态系统碳、氮储量/(t/hm<sup>2</sup>)Table 6 C, N storage in *P. asperata* plantation ecosystem

项目 Item	幼龄林 Y	中龄林 MD	近熟林 NM	成熟林 M	
C	生物量部分 Biomass	15.51±7.59a	25.18±5.57ab	52.19±6.30b	143.51±26.69c
	土壤部分 Soil	242.23±53.33a	367.79±45.88a	324.17±71.37a	286.72±45.48a
	生态系统 Ecosystem	257.75±57.26a	392.97±46.43a	376.36±73.00a	430.23±68.92a
N	生物量部分 Biomass	0.24±0.09a	0.30±0.05a	0.57±0.07a	1.65±0.33b
	土壤部分 Soil	20.26±3.42a	29.58±4.31a	24.07±5.83a	23.04±4.24a
	生态系统 Ecosystem	20.50±3.43a	29.88±4.30a	24.65±5.86a	24.70±4.55a

同行不同小写字母表示龄级间差异显著( $P < 0.05$ )

## 3 讨论

乔木各器官平均碳含量为 516.09 g/kg,灌木为 472.66 g/kg,草本为 363.32 g/kg(图 2),表明相对于灌木和草本,乔木在生长过程中能更有效地合成并积累碳。0.50<sup>[4,19]</sup>和 0.45<sup>[9]</sup>是国内外计算森林碳储量时常用的碳转换系数,0.50 的碳转换系数在云杉乔木器官碳含量 490—540 g/kg 范围内,用来估算该区云杉乔木的碳储量是合适的;而用 0.45 作碳转换系数则会明显低估云杉乔木层碳储量。灌木层(444.25—503.35 g/kg)、草本层(291.27—430.35 g/kg)和枯落物层(342.24—460.43 g/kg)的碳含量整体上低于 0.5,因此,以 0.45 或 0.50 的碳转换系数计算森林碳储量均存在一定的估计误差,掩盖了不同器官和植被层次之间碳含量的差异。为了

准确估计森林的碳储量,分器官实测碳含量是必要的。

土壤的碳、氮含量,主要由土壤有机质的输入、输出以及土壤性质和过程决定的<sup>[20]</sup>。由于在林分早期生长阶段有机质输入量较低,幼龄林中的土壤碳、氮含量常常低于老龄林的土壤的碳、氮含量<sup>[21]</sup>。但在本研究中,同一深度土层碳、氮含量在不同龄级间没有显著差异(图3)。这种结果可能有两方面的原因,一是云杉为常绿乔木树种,枝叶寿命较长,短期的云杉人工造林地枯落物少,造成可分解的枯落物较少;二是研究区气温较低,细根周转速度慢。

植物碳氮元素含量比值反映植物生长速度并与植物氮素的利用效率有关<sup>[22]</sup>。在人工云杉林生态系统中,乔木层各器官碳含量在不同林龄间无显著差异(图1),说明作为构建植物器官必要元素的碳具有相对稳定性。而不同器官的氮含量在不同林龄间差异显著,这可能是植物不同器官在生长发育过程中对氮元素的吸收利用存在差异引起的<sup>[23]</sup>,表现为针叶氮含量最大而树干最小,即幼嫩器官中的氮含量大于老化器官,相应的老化器官的碳氮比值大于幼嫩器官。这与杨丽丽等人<sup>[24]</sup>以及刘增文等人<sup>[25]</sup>的研究结果一致。这表明氮素具有流动性,且对于幼嫩器官的生长具有重要作用。在乔木层,氮的有效性随时间的推移而下降,分配方向是从碳氮比低的细根、叶转移到碳氮比高的枝、干,以使林分的碳积累保持一定的速率<sup>[26]</sup>。在生态系统水平,林分生长和碳积累就是通过氮的转移来实现的,转移方向是从碳氮比低的组分(如土壤)转移到碳氮比高的组分(如植被)<sup>[27-28]</sup>。

土壤碳氮含量比值通常被认为是土壤氮素矿化能力的标志,碳氮比低则表明土壤有机质具有更快的矿化速率<sup>[29]</sup>。本研究中云杉人工林土壤碳氮比为12.73,且在不同龄级间无显著差异(表2),表明林龄对云杉人工林土壤有机质的矿化速率影响较小。同时,云杉人工林土壤碳氮比略高于中国土壤碳氮比平均值为10—12<sup>[30]</sup>而低于全球土壤碳氮比为13.3<sup>[31]</sup>。这是由于土壤碳氮比受区域水热条件和成土作用特征的影响,是气候、地貌、植被、母岩、年代、土壤动物等土壤形成因子和人类活动综合作用的结果。在部分研究中,土壤碳氮比可用于土壤氮储量估算和生态系统碳模型研究中,并根据土壤和生物量中碳含量以及碳氮比值,近似估计土壤和生物量的氮储量<sup>[32]</sup>。

森林土壤是森林生态系统的极重要的碳、氮存储库,在减缓温室气体浓度上升中发挥着重要的作用<sup>[33]</sup>。本研究中,云杉人工林土壤(0—100 cm)碳储量为310.29 t/hm<sup>2</sup>(表3),远高于甘肃省人工林土壤碳储量(107.07 t/hm<sup>2</sup>)<sup>[14]</sup>和我国人工林的土壤碳储量(107.10 t/hm<sup>2</sup>)<sup>[34]</sup>。一方面,林分土壤碳储量与林分类型关系密切,云冷杉林在我国主要森林生态系统中具有最大的土壤碳储量<sup>[35]</sup>。另一方面,较高的土壤碳储量与较低的土壤温度和湿度密切相关<sup>[36-37]</sup>,较低的土壤温度和湿度在大部分时间里抑制了土壤活性,降低了土壤有机碳的分解速率,同时抑制了土壤呼吸<sup>[38]</sup>。由于本研究中云杉人工林处于高海拔地区,气温较低,同时年均降水量也相对较低,因而使该环境条件下的土壤具有较高的碳储量。云杉人工林0—100 cm土壤氮储量24.65 t/hm<sup>2</sup>,不仅高于陕南地区秦岭南坡油松的人工林土壤氮储量(8.57 t/hm<sup>2</sup>)<sup>[39]</sup>和黄土丘陵沟壑区人工林氮储量(6.80 t/hm<sup>2</sup>)<sup>[40]</sup>,同时也高于中国森林土壤氮储量(17.31 t/hm<sup>2</sup>)<sup>[41]</sup>。这表明云杉人工林土壤具有较高的碳、氮储量。

此外,云杉人工林土壤碳、氮储量在不同龄级间无显著差异,这主要是因为本研究中云杉人工林林龄都在60年以内,生长时间较短,其土壤碳、氮储量受造林前的土地利用方式的影响较大,反映的是该区云杉人工林土壤碳、氮储量的现存量 and 分布特征,不能反映或被解释为造林后的土壤碳、氮储量变化。这表明云杉人工林中,林龄不能作为土壤碳、氮储量的预测因子,准确评估土壤碳、氮动态需要长期的定位观测研究。

基于当前调查资料,云杉林植被层平均碳储量为51.70 t/hm<sup>2</sup>,高于甘肃省人工林植被层平均碳储量(33.79 t/hm<sup>2</sup>)<sup>[13]</sup>而低于全国云冷杉林植被平均碳储量(82.01 t/hm<sup>2</sup>)<sup>[35]</sup>。这一碳储量水平表明甘肃的云杉人工林植被层仍具有很高的固碳潜力。这主要是因为云杉人工林以幼龄林和中龄林为主,成熟林偏少,单位面积植被碳储量较低。随着林分的生长,云杉林的固碳能力将显著提高。本研究中成熟林的林下植被(灌、草层)碳、氮储量最低(表5),可能是随着林分的生长,乔木层逐渐郁闭,林下灌草层生长的光照条件逐渐减

弱,林下灌草之间以及灌草与乔木之间的资源竞争加强,导致林下灌、草层盖度减小,生物量和碳、氮储量降低。另外,人为干扰可能也是一个不可忽视的原因。

云杉人工林生态系统的平均碳储量为  $362.00 \text{ t/hm}^2$ , 高于我国森林生态系统碳储量的平均值 ( $258.82 \text{ t/hm}^2$ )<sup>[35]</sup>。同时,生态系统平均氮储量  $25.25 \text{ t/hm}^2$ , 远高于黄土丘陵区 37 年生刺槐林生态系统氮储量 ( $6.51 \text{ t/hm}^2$ )<sup>[42]</sup> 和岷江干热河谷区 13 年生岷江柏人工林生态系统氮储量 ( $19.09 \text{ t/hm}^2$ )<sup>[43]</sup>。这表明云杉人工林生态系统具有较强的碳、氮固存能力。然而,由于土壤碳、氮储量在生态系统中处于支配地位(各龄级碳、氮储量均超过 60% 和 90%), 生态系统碳、氮储量并未呈现出随林分生长持续增加的趋势。以上结果表明,云杉人工林生态系统具有较高的碳、氮储量,但与林龄无明显相关性。

在云杉人工林生态系统中,土壤碳、氮储量所占比例最大;在生物量组分中,乔木是碳、氮储量的主体。植被碳、氮储量随林分生长显著增加。林龄不能作为土壤碳、氮储量的预测因子,准确评估云杉人工林土壤碳、氮动态需要长期的定位观测研究。生态系统碳、氮储量在不同生长阶段保持相对稳定。人工造林是应对气候变化、减缓大气  $\text{CO}_2$  浓度升高的有效措施。本研究提供的信息不仅有助于人工林养分模型的开发和评价,对改进森林管理措施以提高碳汇功能也具有一定的参考价值。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] Yang Y S, Guo J F, Chen G S, Xie J S, Gao R, Li Z, Jin Z. Carbon and nitrogen pools in Chinese fir and evergreen broadleaved forests and changes associated with felling and burning in mid-subtropical China. *Forest Ecology and Management*, 2005, 216(1/3): 216-226.
- [ 2 ] FAO. Global forest resources assessment 2010. Rome: FAO, 2010.
- [ 3 ] 方精云, 陈安平. 中国森林植被碳库的动态变化及其意义. *植物学报*, 2001, 43(9): 967-973.
- [ 4 ] 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, 291(5525): 2320-2322.
- [ 5 ] Metz B, Davidson O R, Bosch P R, Dave R, Meyer L A. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2007.
- [ 6 ] Hungate B A, Dukes J S, Shaw M R, Luo Y Q, Field C B. Nitrogen and climate change. *Science*, 2003, 302(5650): 1512-1513.
- [ 7 ] Fowler Z K, Adams M B, Peterjohn W T. Will more nitrogen enhance carbon storage in young forest stands in central Appalachia? *Forest Ecology and Management*, 2015, 337: 144-152.
- [ 8 ] Reich P B, Hobbie S E, Lee T, Ellsworth D S, West J B, Tilman D, Knops J M H, Naeem S, Trost J. Nitrogen limitation constrains sustainability of ecosystem response to  $\text{CO}_2$ . *Nature*, 2006, 440(7086): 922-925.
- [ 9 ] 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.
- [ 10 ] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志. 北京: 科学出版社, 1978
- [ 11 ] 鄢武先, 宿以明, 刘兴良, 梁罕超. 云杉人工林生物量和生产力的研究. *四川林业科技*, 1991, 12(4): 17-22.
- [ 12 ] 冯秋红, 吴晓龙, 徐峥静茹, 刘兴良, 卢昌泰, 潘红丽, 刘世荣. 密度调控对川西山地云杉人工林地被物及土壤水文特征的影响. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2018, 42(1): 98-104.
- [ 13 ] 关晋宏, 张克栋, 邓磊, 张建国, 何秋月, 杜盛. 不同起源云杉林土壤有机碳密度及与物种多样性关系. *水土保持研究*, 2016, 23(2): 49-54, 59.
- [ 14 ] 关晋宏, 杜盛, 程积民, 吴春荣, 李国庆, 邓磊, 张建国, 何秋月, 时伟宇. 甘肃省森林碳储量现状与固碳速率. *植物生态学报*, 2016, 40(4): 304-317.
- [ 15 ] 邹德富, 冯琦胜, 梁天刚. 甘南地区植被类型及其 NPP 研究. *遥感技术与应用*, 2011, 26(5): 577-583.
- [ 16 ] 张佰林, 邵臻, 戚继阳. 定西市水保林综合效益分析. *甘肃林业科技*, 2016, 41(1): 29-35.
- [ 17 ] 刘光崧. 土壤理化分析与剖面描述. 北京: 中国标准出版社, 1996.
- [ 18 ] 程堂仁, 马钦彦, 冯仲科, 罗旭. 甘肃小陇山森林生物量研究. *北京林业大学学报*, 2007, 29(1): 31-36.
- [ 19 ] Houghton R A, Skole D L, Nobre C A, Hackler J L, Lawrence K T, Chomentowski W H. Annual fluxes of carbon from deforestation and regrowth in the Brazilian Amazon. *Nature*, 2000, 403(6767): 301-304.
- [ 20 ] 侯浩, 张宋智, 关晋宏, 杜盛. 小陇山不同林龄锐齿栎林土壤有机碳和全氮积累特征. *生态学报*, 2016, 36(24): 8025-8033.
- [ 21 ] Noh N J, Son Y, Lee S K, Seo K W, Heo S J, Yi M J, Park P S, Kim R H, Son Y M, Lee K H. Carbon and nitrogen storage in an age-sequence

- of *Pinus densiflora* stands in Korea. *Science China Life Sciences*, 2010, 53(7): 822-830.
- [22] 张珂, 何明珠, 李新荣, 谭会娟, 高艳红, 李刚, 韩国君, 吴杨杨. 阿拉善荒漠典型植物叶片碳、氮、磷化学计量特征. *生态学报*, 2014, 34(22): 6538-6547.
- [23] 施家月, 王希华, 闫恩荣, 程铭华. 浙江天童常见植物幼树器官的氮磷养分特征. *华东师范大学学报: 自然科学版*, 2006(2): 121-129.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] Hooker T D, Compton J E. Forest ecosystem carbon and nitrogen accumulation during the first century after agricultural abandonment. *Ecological Applications*, 2003, 13(2): 299-313.
- [27] Rastetter E B, Mckane R B, Shaver G R, Melillo J M. Changes in C storage by terrestrial ecosystems: How C-N interactions restrict responses to CO<sub>2</sub> and temperature. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1992, 64(1/2): 327-344.
- [28] Gessel S P, Cole D W, Steinbrener E C. Nitrogen balances in forest ecosystems of the Pacific Northwest. *Soil Biology and Biochemistry*, 1973, 5(1): 19-34.
- [29] 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.
- [30] 黄昌勇. 土壤学. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [31] Post W M, Pastor J, Zinke P J, Stangenberger A G. Global patterns of soil nitrogen storage. *Nature*, 1985, 317(6038): 613-616.
- [32] 韩兴国, 李凌浩, 黄建辉. 生物地球化学概论. 北京: 高等教育出版社, 1999.
- [33] 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.
- [34] 刘世荣, 王晖, 栾军伟. 中国森林土壤碳储量与土壤碳过程研究进展. *生态学报*, 2011, 31(19): 5437-5448.
- [35] 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.
- [36] Perruchoud D, Walthert L, Zimmermann S, Lüscher P. Contemporary carbon stocks of mineral forest soils in the Swiss Alps. *Biogeochemistry*, 2000, 50(2): 111-136.
- [37] Callesen I, Liski J, Raulund-Rasmussen K, Olsson M T, Tau-Strand L, Vesterdal L, Westman C J. Soil carbon stores in Nordic well-drained forest soils-relationships with climate and texture class. *Global Change Biology*, 2003, 9(3): 358-370.
- [38] Zheng X L, Zhao C Y, Peng S Z, Jian S Q, Liang B, Wang X P, Yang S F, Wang C, Peng H H, Wang Y. Soil CO<sub>2</sub> efflux along an elevation gradient in Qinghai spruce forests in the upper reaches of the Heihe River, northwest China. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 71(5): 2065-2076.
- [39] 刘冰燕, 陈云明, 曹扬, 吴旭. 秦岭南坡东段油松人工林生态系统碳、氮储量及其分配格局. *应用生态学报*, 2015, 26(3): 643-652.
- [40] 孙文义, 郭胜利. 天然次生林与人工林对黄土丘陵沟壑区深层土壤有机碳氮的影响. *生态学报*, 2010, 30(10): 2611-2620.
- [41] 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, 579.
- [42] 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.
- [43] 罗达, 冯秋红, 史作民, 李东胜, 杨昌旭, 刘千里, 何建社. 岷江干旱河谷区岷江柏人工林碳氮储量随林龄的动态. *应用生态学报*, 2015, 26(4): 1099-1105.