

# 祁连山三种主要乔木林细根生物量比较

吴春荣<sup>1</sup>, 邢彩萍<sup>2</sup>

(1. 甘肃省治沙研究所, 兰州 730000; 2. 甘肃农业大学 林学院, 兰州 730070)

**摘 要:**采用根钻法采集细根, 分析了祁连山中段寺大隆林区 3 种主要乔木植被青海云杉纯林、杨树纯林和祁连圆柏纯林的细根生物量、土壤含水量、土壤容重和土壤养分状况, 并在 3 种森林群落之间进行了比较研究, 旨在为该区提高森林生产力和根系碳汇的后续研究提供理论依据。结果表明: 研究区内 3 种乔木植被总细根生物量和活细根生物量之间呈极显著正相关, 而细根生物量和土壤水分与土壤容重均呈显著负相关, 土壤养分和土壤含水量对细根生物量有着积极的促进作用。3 种植被类型的细根生物量都集中分布在 20—40 cm 土层, 而且杨树林分依次是青海云杉林分的 154 倍、祁连圆柏纯林的 308 倍; 3 种植被类型的土壤容重依次为  $S_{d杨} > S_{d柏} > S_{d杉}$ , 且两两之间差异显著; 0—10 cm 土壤含水量差异显著, 青海云杉纯林远高于其他两种乔木植被; 另外, 3 种植被类型土壤中含有的碳、氮含量差异也比较显著。

**关键词:** 乔木植被; 细根生物量; 土壤含水量; 土壤容重; 土壤养分

**中图分类号:** Q945

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2015)05-0325-06

## Comparison of Fine Root Biomass of Three Main Arbors in Qilian Mountains

WU Chunrong<sup>1</sup>, XING Caiping<sup>2</sup>

(1. Institute of Desert Control of Gansu, Lanzhou 730000, China;

2. College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** Using the method of soil core sampling, we analyzed the fine root biomass, soil moisture content, soil bulk density and soil nutrient in 0—40 cm soil layers of the three kinds of main arbor vegetation (*Picea crassifolia*, *Poplar* and *Sabina przewalskii*) in the middle west of the Qilian Mountain, and compared the characteristics of the three vegetation types. The results showed that there was a significant positive correlation between total fine root biomass and live fine root biomass of the three arbor vegetations in the study area, while the soil moisture and soil bulk density were also significantly negatively correlated with fine root biomass. Both soil nutrients and soil water all played the positive role in the development of the fine root biomass. The root biomass of three fine vegetation types mainly distributed in the 20—40 cm soil layers, the fine root biomass of *poplar* was 154 times of the *Picea crassifolia*, 308 times of *Sabina przewalskii*. The soil bulk densities of three vegetation types were significantly different with the rank of  $S_{d Yang} > S_{d Bai} > S_{d Shan}$ . Soil moisture appeared significantly different in 0—10 cm layers, it was much higher in *Picea crassifolia* forest than those under the other two types of vegetation. In addition, the soil carbon content and nitrogen content of three vegetation types were also significantly different.

**Keywords:** arbor vegetation; fine root biomass; soil water content; soil bulk density; soil nutrients

根系是植物重要的功能器官, 既为植物吸收水分和养分、固定地上部分, 又通过呼吸周转消耗光合产物, 向土壤输送有机质。特别是直径  $\leq 2$  mm 细根, 是植物根系中最活跃和最敏感的部位, 具有巨大的吸收表面积, 同时因其生长快、周转迅速, 并在森林生态系统物质循环和能量流动、以及生态系统生产力等方

面发挥着重要作用<sup>[1-5]</sup>。但是, 由于森林生态系统本身的复杂性, 加上根系处理需要消耗大量时间, 而且与地上部分相比, 对根的处理需要更专业的技术, 致使人类对自然生态系统中植物根系的研究始于 20 世纪 70 年代以后。近年来, 国内外很多学者对细根的分解、寿命和周转, 以及森林生态系统中碳和养分的

生态循环有了较为深入的详细研究;研究表明,细根生物量只占森林总生物量的 5%左右,但其生长量占到森林初级生产力的 50%~75%;土壤碳库是森林生态系统碳库的重要组成部分,1 m<sup>3</sup> 森林蓄积量就能固定 850 kg 的 CO<sub>2</sub>;同时得出,细根生物量通常随树龄增加而增加,在一定时期达到最大值,然后逐渐下降并趋于稳定;土壤含水量和容重则在很大程度上影响细根的垂直分布<sup>[6]</sup>。森林细根作为土壤碳库的重要来源,已越来越受到碳循环研究者的关注。

祁连山是我国西北地区主要的高大山系之一,发育了我国西北干旱区疏勒河、黑河和石羊河三大内陆河,是各流域维持生态平衡的重要保障,更是内陆河流域绿洲发育的生命源泉。目前,对祁连山区的研究主要集中在保护区水资源可持续利用、植物群落及区系和森林灾害预防等方面,而关于该区森林植被固碳以及细根生物量方面的研究较少。基于以上原因,本研究以祁连山国家级自然保护区中段西水林场 3 种祁连圆柏、杨树和青海云杉纯林主要乔木植被作为主要研究对象,对 3 种森林植物的细根生物量、土壤含水量、土壤容重和土壤养分进行试验分析,并在 3 种植被类型之间进行比较研究,以期为该区植被利用和植被固碳方面的后续研究提供理论依据。

1 研究材料与方法

1.1 研究区概括

研究区位于甘肃省张掖市肃南县祁连山中段寺大隆林区,地理位置为 37°25′—39°63′N,99°54′—102°13′E,海拔 2 500~3 600 m,属大陆性寒温带半湿润半干旱气候区。该地区年平均气温 3.7℃,1 月平均气温-13℃,

7 月平均气温 11℃;年均降水量 436 mm,降雨集中在 5—9 月,占全年降水量的 89%,年蒸发量 1 061.8 mm,年均相对湿度 60%,年日照时数 1 892.6 h,土壤和植被随地形和气候的差异形成明显的垂直带分布。山地森林—草原植被带分布于海拔 2 500~3 300 m,阴坡和半阴坡分布着青海云杉林(*Picea crassifolia*),并伴生有:山生柳(*Salix oritrepha*)、鬼箭锦鸡儿(*Caragana jubata*)、金露梅(*Potentilla fruticosa*)、小叶忍冬(*Lonicera microphylla*)和银露梅(*Potentilla glabra*)等灌丛;阳坡和半阳坡为高山草甸,建群种为紫花针茅(*Stipa purpurea*)、甘青针茅(*Stipa przewalskyi*),并零星分布有杨树(*Poplar*)、祁连圆柏(*Sabina przewalskii*)疏林,伴生有金露梅、银露梅、高山绣线菊(*Spiraea alpina*)、蔷薇(*Rosaceae*)等灌丛;土壤类型为森林灰褐土。海拔 3 300~3 600 m 为亚高山灌丛草甸植被带,阴坡和半阴坡分布杜鹃灌丛和山柳灌丛,主要建群种为青海杜鹃(*Rhododendron qinghaiense*)、山生柳等,灌丛下分布有蒿草(*Kobresia myosuroides*)、高山龙胆(*Gentiana algida*)和藓类等耐低温植物;阳坡、半阳坡分布有蒿草草甸,并伴生有金露梅灌丛;土壤类型为亚高山灌丛草甸土<sup>[7]</sup>。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置 选取林相良好,具有典型代表性的青海云杉纯林、祁连圆柏纯林和杨树纯林进行调查采样(表 1),调查各采样点内乔木个体数量,并测量其内每棵乔木的胸径。在每种植被类型下随机设置 3 个样地,样地间隔至少 30 m,样地面积均为 1 000 m<sup>2</sup> (20 m×50 m)。在每块典型样地内随机选 3 个采样点,构成 3 个重复,调查结果取其平均值。

表 1 样地基本信息采集表

植被类型	坡向 坡度	地理位置	海拔/ m	郁闭度/ %	林龄/ a	群落 高度/m	土壤 类型	植被 类型	人类 活动
祁连圆柏	南 60°	102°32′32″E 37°22′56″N	2843	0.35	35	9.3	山地灰褐土	山地天然针叶林	维护
杨树	西北 58°	102°36′45″E 37°36′42″N	1468	0.55	55	13.5	灌淤土	人工阔叶林	灌溉
青海云杉	平地 0°~0.5°	102°428′20″E 38°6′34″N	2755	0.5	50	15	山地灰褐土	山地天然针叶林	维护

1.2.2 野外采样 利用内径为 9 cm 的土钻采集细根,在青海云杉纯林、祁连圆柏纯林和杨树纯林的各样地内随打钻采样深度均为 40 cm,分为 0—20,20—40 cm 两层,3 个重复,依次钻取完整土芯,把每层的样品分别标记装入塑料袋内,然后带回实验室放置在一4℃冰箱内冷藏。采用环刀法,自上而下,按照 0—10,10—20,20—30,30—50,50—100 cm 分 5 层取出完整

的容重土样;并在每一土层中用铝盒收集适量土壤,用于土壤含水量的测定。同时,在 3 种植被类型下的每个样地中心设置 1 个长 1 m、宽 0.5 m、深 0.5 m 的土壤剖面,分 5 层取样,在室温下自然风干,挑拣植物残体、石块等杂物,进行土壤含水量、容重和土壤有机碳含量的测定。

1.2.3 室内分析及计算 把土芯从塑料袋取出,分

别放入盆中用自来水浸泡 2 h,在 0.9 mm 孔径的土壤筛内流水冲洗,除去根系粘连的土壤。过 40 目筛,得到 3 种植物类型各层的根系样品。将洗净的根系编号,挑出直径 $\leq 2$  mm 的细根,并根据细根的表皮颜色、弹性、弯折角度和表皮与中柱分离程度的难易,区分活细根和死细根<sup>[8]</sup>。细根阴干,称量,记为鲜质量;之后 75℃烘干至恒量,称量,记为干质量。采用重铬酸钾容量法—外加加热法测定土壤有机碳含量;烘干法测定土壤容重( $\text{g}/\text{cm}^3$ )和土壤含水量( $\%$ )<sup>[9]</sup>。

$$B_i=10^{-4}\overline{A}[\pi(D/2)^2]$$

(1)

式中: $\overline{A}$ ——平均每根土芯细根质量; $B_i$ ——细根生物量( $\text{g}/\text{cm}^2$ ); $D$ ——土钻内直径( $\text{cm}$ )。

$$W_t=[(G+X)-(G+T)]/T\times 100\%$$

(2)

式中: $W_t$ ——土壤含水量; $G$ ——铝盒重; $X$ ——湿土样重; $T$ ——干土样重。

$$S=[(V_w+T_w)-V_w]/V_b$$

(3)

式中: $S$ ——土壤容重; $V_w$ ——环刀重; $T_w$ ——干土样重; $V_b$ ——环刀体积。

1.3 数据处理

所有数据均利用 DPS 软件进行分析,并采用最小显著差异法(LSD)比较不同数据组间的差异,用 Pearson 相关系数评价不同因子间的相关关系。

2 结果与分析

2.1 3 种植被类型的细根生物量特征

2.1.1 细根生物量的组成 由表 2 可以看出,3 种林分 0—40 cm 土层的细根(活细根和死细根)生物量大小依次是  $B_{\text{杨}}>B_{\text{杉}}>B_{\text{柏}}$ 。0—20 cm 土层中,杨树纯林细根总生物量为  $0.005\ 536\ \text{g}/\text{cm}^2$ ,是青海云杉细根生物量  $0.000\ 036\ \text{g}/\text{cm}^2$  的 154 倍,是祁连圆柏纯林的 308 倍,表现为杨树林分和青海云杉林分显著高于祁连圆柏林分;20—40 cm 土层杨树细根生物量

为  $0.004\ 054\ \text{g}/\text{cm}^2$ ,是青海云杉林分生物量的 3 倍,祁连圆柏纯林的 338 倍,这可能与杨树林的人工管护以及林龄有关。0—20 cm 土层的活细根生物量所占比例大小为: $B_{\text{杨}}>B_{\text{杉}}>B_{\text{柏}}$ ,其中杨树林分显著高于青海云杉林分和祁连圆柏林分;20—40 cm 土层也表现为: $B_{\text{杨}}>B_{\text{杉}}>B_{\text{柏}}$ 。此外,3 种林分 20—40 cm 土层的细根生物量均大于 0—20 cm,说明 3 种乔木植被在 20—40 cm 土层根系较 0—20 cm 更为发达。与生物量不同,在 0—40 cm 土层中 3 种植被类型细根(活细根和死细根)含水量大小均表现为: $W_{\text{柏}}>W_{\text{杨}}>W_{\text{杉}}$ ,0—20 cm 土层中,祁连圆柏林分和杨树林分样地活细根含水量略高于青海云杉林分,而前两种林分死细根含水量显著高于青海云杉林分。同时可以看出,3 种乔木植被 0—20 cm 土层细根含水量大于 20—40 cm,这是因为 0—20 cm 土层细根量大于 20—40 cm 细根量所致,说明 3 种乔木植被均是浅根系植物,也可能与区域的土壤条件有关。

2.1.2 细根生物量的垂直分布 细根生物量的垂直分布主要受立地条件、植被类型等因素的影响。由图 1 可以看出,3 种乔木植被 20—40 cm 土层的细根(活细根和死细根)生物量略高于 0—20 cm 土层,其中祁连圆柏林分两个土层的差距甚小。0—20 cm 土层表现青海云杉林分显著高于其他两种乔木林分,杨树林分略低于祁连圆柏林分,二者并无显著差异。20—40 cm 土层细根生物量所占比例大小为: $B_{\text{杉}}>B_{\text{杨}}>B_{\text{柏}}$ ,其中青海云杉林分显著高于其他两种乔木林分,杨树林分又显著高于祁连圆柏林分。结合表 2 中的活细根比例数据,可以得出 3 种乔木植被在 20—40 cm 土层中的活细根生物量比例大于 0—20 cm 土层,由此推测,该地区 20—40 cm 土壤中的根系相对发达。此外,可能由于气候和土壤因素的影响,该地区草地植被较为稀少。

表 2 细根生物量的组成

植被 类型	土层/ cm	活细根 比例/%	生物量/( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ )			含水量/%	
			活细根	死细根	总生物量	活细根	死细根
祁连圆柏	0—20	22.23±2.7c	0.000004±0.83c	0.000014±2.04c	0.000018±0.58c	37.29±4.7a	29.24±1.2a
	20—40	83.33±3.8ab	0.00001±3.01c	0.000002±1.42b	0.000012±1.13c	37.29±1.8a	29.24±0.7a
杨树	0—20	98.81±3.1a	0.00054±1.02b	0.000066±0.91a	0.005536±0.66ab	35.76±3.6ab	28.26±1.5a
	20—40	98.87±4.2a	0.004008±0.77a	0.000046±1.34ab	0.004054±0.19a	35.79±4.5ab	28.26±0.4a
青海云杉	0—20	61.11±5.5b	0.000022±1.56bc	0.000014±2.17b	0.000036±0.68bc	24.14±1.9b	8.32±0.6b
	20—40	98.61±3.3a	0.001273±2.26ab	0.000018±0.56a	0.001291±1.74b	16.17±2.1c	7.78±0.4b

注:同一土层同列数据后不同小写字母表示差异显著( $p<0.05$ )。

2.2 3 种植被类型土壤含水量和容重的垂直分布

由图 2 可以看出,0—10 cm 土层青海云杉林分含水量远大于杨树林分和祁连圆柏林分,分别达到 3.5,11.3 倍。就青海云杉林分而言,0—10 cm 土层

含水量达到最大,为 198.18%,随后 10—100 cm 土层的含水量维持在 70%~80%,变化浮动较小。杨树林分含水量总体变化不大,0—100 cm 土层含水量一直维持在 23%~55%,随着土层的加深含水量呈

先增后减趋势,在 10—20 cm 土层达到最大。祁连圆柏林分含水量整体也表现先增后减,在 30—50 cm 土层达到最大。从总体来看,3 种乔木植被 0—100 cm 土层平均含水量依次是  $B_{\text{杉}} > B_{\text{柏}} > B_{\text{杨}}$ ,青海云杉根系和祁连圆柏根系土层含水量显著高于杨树林分,说明青海云杉根系和祁连圆柏根系具有较强的持水能力,易于在干旱区生长。

3 种乔木植被 0—100 cm 土层的平均土壤容重大小依次为  $S_{\text{d杨}} > S_{\text{d柏}} > S_{\text{d杉}}$ ,且 3 者之间两两差异显著。3 种乔木植被除了杨树林分土壤容重基本保持在 1.26~1.42 g/cm<sup>3</sup> 左右变化浮动不大之外,其他两种乔木植被均呈现逐渐增加趋势,而且圆柏林分的增加梯度大于青海云杉林分。总体来说,3 种植被类

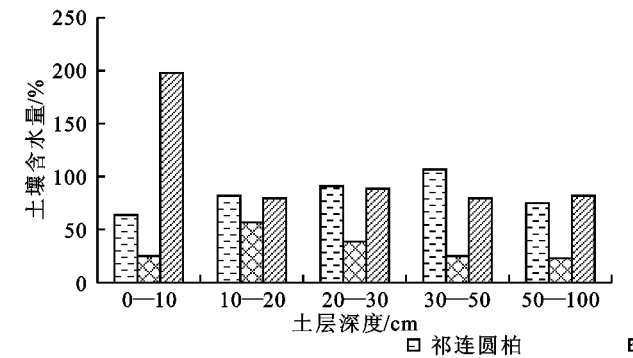


图 2 土壤含水量和容重的垂直分布

2.3 3 种植被类型土壤养分状况

土壤有机碳含量是土体含碳丰富度的最直接表征,主要来源于动植物、微生物残体和根系分泌物,并且处于不断分解与形成的动态过程,因此,土壤有机碳含量是生态系统在特定条件下的动态平衡值<sup>[10]</sup>。根据试验数据(表 3),3 种乔木植被 0—100 cm 土层平均有机碳、氮含量大小均依次表现为青海云杉林分>祁连圆柏林分>杨树林分,其中三者有机碳含量均大于各自氮、磷含量,而且 3 种元素的含量均随着各自土层的加深而降低。就有机碳含量而言,青海云杉林分和祁连圆柏林分平均值分别为 68.209 0,67.913 2 g/kg,均大约是杨树林分平均有机碳含

量 0—100 cm 土层的土壤容重均波动不大,说明研究区内植被类型比较单一,地表枯枝落叶物较少,土壤容重在空间上变异不大。

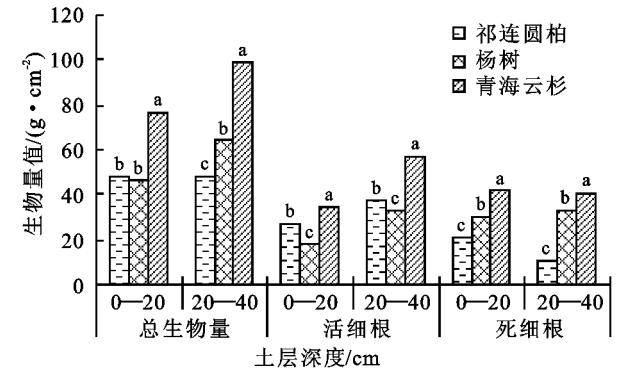
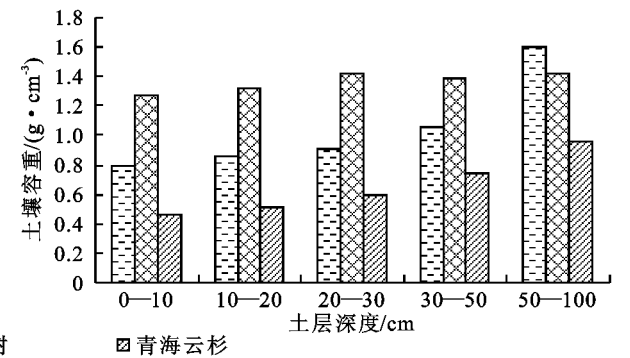


图 1 细根生物量的垂直分布



量的 7.6 倍;祁连圆柏林分 0—100 cm 土层的氮含量为 2.475 6~5.203 7 g/kg,大约是杨树林分全氮含量的 5~12.9 倍,青海云杉林分为 3.23~6.24 g/kg,大约是杨树林分全氮含量的 8~14.9 倍;而 3 种乔木植被 0—100 cm 土层的全磷含量基本相差不大,分别是青海云杉林分 0.675 3 g/kg、杨树林分 0.666 0 g/kg、祁连圆柏林分 0.627 1 g/kg。总体来说,青海云杉林分和祁连圆柏林分的碳、氮、磷含量在 0—100 cm 各土层均高于杨树林分各土层的含量,这说明青海云杉林分和祁连圆柏林分的生长更能够促进区域土壤中碳、氮、磷等营养元素的累积,即更能够促进土壤发育、发挥水土保持作用。

表 3 不同土层碳、氮、磷含量 g/kg

植物类型	土壤养分	0—10 cm	10—20 cm	20—30 cm	30—50 cm	50—100 cm	平均值
祁连圆柏	有机 C	91.4650	94.2148	50.4864	56.1912	47.2084	67.9132
	全 N	5.2037	4.7979	3.1987	2.9408	2.4756	3.7233
	全 P	0.6622	0.6287	0.6262	0.6157	0.6023	0.6271
杨树	有机 C	12.5449	13.9969	9.3446	3.8199	5.6733	9.0759
	全 N	1.2133	1.2295	0.9663	0.4042	0.5593	0.8745
	全 P	0.6903	0.6952	0.6550	0.6445	0.6451	0.6660
青海云杉	有机 C	89.8000	77.2391	68.6706	55.8855	49.4500	68.2090
	全 N	6.2419	5.8994	4.7648	3.7091	3.2495	4.7729
	全 P	0.6809	0.7375	0.6630	0.6461	0.6490	0.6753

3 讨论与结论

3.1 讨论

植物细根生物量受植被特性、气候条件和土壤条件等因素的影响。对特定区域的特定植物而言,土壤容重和土壤含水量是影响其细根垂直分布的关键因素。细根生物量随土层深度增加而减小,主要是受土壤理化性质和养分含量的影响<sup>[10-11]</sup>。

苏纪帅等<sup>[12]</sup>发现,宁夏大罗山 4 种主要植被类型的总细根生物量和活细根生物量呈极显著正相关,细根生物量与土壤容重呈极显著负相关,同时土壤水分与土壤容重也呈显著负相关关系,活细根和死细根生物量比例与土壤含水量、土壤容重均无相关性,这与本研究的结果是一致的(表 4)。不同的是,本研

究发现研究区 3 种乔木类型 0—40 cm 土层中死细根生物量与土壤水分呈极显著负相关,而与总细根生物量和活细根生物量并无显著相关性,这可能与不同植物类型、不同立地条件有关。通过比较研究还发现,就年内各土层含水量而言,青海云杉林地和祁连圆柏林地在 0—100 cm 土层平均土壤含水量分别为 106.04%,83.99%,而杨树林地仅为 33.06%,与杨树林地相比较,青海云杉林地和祁连圆柏林地具有较高的土壤含水量和相对较低的土壤容重,而青海云杉林分和祁连圆柏林分细根生物量却低于杨树林分,这可能是因为本试验中杨树纯林为人工林,林内形成了较好的乔—草植被系统,植物根系得以充分生长发育,也可能与研究区杨树纯林具有较大的郁闭度和林龄有关。

表 4 细根生物量、土壤含水量、土壤养分和土壤容重的相关系数

指标	细根生物量	活细根生物量	死细根生物量	活细根比例	含水量	容重	全 C 含量	全 N 含量
细根生物量	1	0.986 *	-0.148	0.391	0.193	-0.799	0.331	0.561
活细根生物量	0.86	1	-0.635	0.582	0.129	-0.998 **	0.763	0.983
死细根生物量	-0.18	-0.65	1	0.247	-0.194	0.846	-0.997 *	-0.991 *
活细根比例	0.91	0.58	0.24	1	0.216	-0.437	-0.092	0.174
含水量	0.59	0.92	-0.9	0.21	1	-0.968 *	0.969 *	1.00 **
容重	-0.79	-0.99 **	0.74	-0.47	-0.96 *	1	-0.848	-0.959 *
全 C 含量	0.33	0.76	-0.99 *	-0.09	0.96 *	-0.84	1	0.976 *
全 N 含量	0.56	0.90	-0.91	0.17	1.00 **	-0.95 *	0.97 *	1

注: \* 表示  $p<0.05$ , \*\* 表示  $p<0.01$ 。

此外,本试验中 3 种乔木植被的最大细根生物量均出现在 20—40 cm 土层,与土壤含水量基本保持相同的趋势,也使得 20—40 cm 土层的活细根比例高于 0—20 cm 土层,这与前人研究结果类似<sup>[13-14]</sup>。由此可知,土壤水分和土壤养分对本试验区内 3 种乔木植被的细根生物量均表现出明显的促进作用,并显著影响其垂直分布特征。

3.2 结论

根据细根现存生物量推测,青海云杉的固碳能力大约是杨树的 1.8 倍,是祁连圆柏 1.57 倍;青海云杉林的土壤持水率分别是杨树林分和祁连圆柏的 16,7.9 倍左右;而且青海云杉林分和祁连圆柏林分 0—100 cm 土层的碳、氮含量远大于杨树林分。此外,常学向等<sup>[15]</sup>研究发现,青海云杉林内大部分降雨以林内雨的形式进入林下并贮存于土壤中,林地土壤中液态水的储量在整个生长季内(除 8 月份外)均是增加的。青海云杉对土壤条件要求不严。青海云杉喜生在大陆性寒温半湿润或半干旱地区,具耐寒耐旱、耐贫瘠的特性,对肥力适应性较强,对土壤酸碱的适应性也

较广,而且树形美观,综合比较研究区 3 种乔木植被,在西北干旱地区更适宜于栽培种植青海云杉树种。

青海云杉林年净固定 CO<sub>2</sub> 量 9.85 g/hm<sup>2</sup>,价值 2 691.94 元/hm<sup>2</sup>,其中土壤贮存占 69.61%,林分贮存占 30.39%<sup>[16-17]</sup>。祁连山现有 13.67 万 hm<sup>2</sup> 青海云杉林,每年可以固定大气 CO<sub>2</sub> 134.65 万 t,价值 3.8 亿元,还有 6.8 万 hm<sup>2</sup> 宜林荒地,如果全部营造青海云杉林,成林后每年 CO<sub>2</sub> 吸收量可以增加至 182.59 万 t,比现在提高 70.39%,吸收 CO<sub>2</sub> 潜力较大<sup>[18]</sup>。祁连山是我国西北地区的生态屏障,又是河西地区的水源,而青海云杉又是祁连山自然保护区的唯一建种群,因此,不但要加强对青海云杉的种植栽培技术和森林生物多样性的研究,又要强化科学封山育林力度,杜绝不合理经营和过度采伐。此外,还可大面积营造祁连圆柏和青海云杉混交林,不仅能够提高林地生产力,使森林涵养水源、保持水土、调节河川径流等生态功能得到加强,还能够增加祁连山地区生态系统多样性和稳定性。

## 参考文献:

- [1] 苏永中,赵哈林.土壤有机碳储量影响因素及其环境效应的研究进展[J].中国沙漠,2002,22(3):220-228.
- [2] 李庆华,曹扬,陈云明,等.陕西油松人工林下枯落物层生物量及其碳储量[J].水土保持研究,2013,20(4):24-28,54.
- [3] 刘满强,胡锋,陈小云,等.中国土壤有机碳库及空间分布特征分析[J].地理学报,2000,55(5):533-544.
- [4] 鲁绍伟,陈波,潘青华,等.北京山地不同林分乔木层生物量和生产力研究[J].水土保持研究,2013,20(4):155-159.
- [5] 彭守璋,赵传燕,郑祥霖,等.祁连山区青海云杉林生物量和碳储量空间分布特征[J].应用生态学报,2011,22(7):1689-1694.
- [6] 苏娜,焦菊英,马祥华,等.黄土丘陵沟壑区主要群落地上生物量季节变化及其与土壤水分的关系[J].水土保持研究,2012,19(6):7-12.
- [7] 姜红梅,李明治,王亲,等.祁连山东段不同植被下土壤养分状况研究[J].水土保持研究,2011,18(5):166-170.
- [8] 罗云建,张小全,王效科,等.森林生物量的估算方法及其研究进展[J].林业科学,2009,45(8):129-134.
- [9] 许文强,罗格平,陈曦,等.干旱区三工河流域土壤有机碳储量及空间分布特征[J].自然资源学报,2009,24(10):1740-1747.
- [10] 党宏忠,赵雨森,陈祥伟,等.祁连山青海云杉林地土壤水分特征研究[J].应用生态学报,2004,15(7):1148-1152.
- [11] 王绍强,周成虎,李克让,等.中国土壤有机碳库及空间分布特征分析[J].地理学报,2000,55(5):533-544.
- [12] 苏纪帅,程积民,高阳,等.宁夏大罗山4种主要植被类型的细根生物量[J].应用生态学报,2013,24(3):626-632.
- [13] 彭守璋,赵传燕,许仲林,等.黑河上游祁连山区青海云杉生长状况及其潜在分布区的模拟[J].植物生态学报,2011,35(6):605-614.
- [14] 胡启武,欧阳华,刘贤德.祁连山北坡土壤碳氮分布特征[J].山地学报,2006,24(6):654-661.
- [15] 常学向,赵爱芬,王金叶,等.祁连山林区大气降水特征与森林对降水的截留作用[J].高原气象,2002,21(3):274-280.
- [16] 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.
- [17] 梁二,蔡典雄,张丁辰,等.中国陆地土壤有机碳储量估算及其不确定性分析[J].中国土壤与肥料,2010,(6):75-79.
- [18] 潘根兴,李恋卿,张旭辉,等.中国土壤有机碳库量与农业土壤碳固定动态的若干问题[J].地球科学进展,2003,18(4):609-618.
- [9] Iroumé A, Huber A. Comparison of interception losses in a broadleaved native forest and a *Pseudotsuga menziesii* (Douglas fir) plantation in the Andes Mountains of southern Chile [J]. Hydrological Processes, 2002, 16(12):2347-2361.
- [10] 常志勇,包维楷,何丙辉,等.岷江上游油松与华山松人工混交林对降雨的截留分配效应[J].水土保持学报,2006,20(6):37-40.
- [11] 何常清,薛建辉,吴永波,等.岷江上游亚高山川滇高山栎林的降雨再分配[J].应用生态学报,2008,19(9):1871-1876.
- [12] 时忠杰,王彦辉,徐丽宏,等.六盘山华山松林降雨再分配及其空间变异特征[J].生态学报,2009,29(1):76-85.
- [13] 殷晖,关文斌,薛肖肖,等.贡嘎山暗针叶林林冠对降雨能量再分配的影响研究[J].北京林业大学学报,2010,32(2):2-5.
- [14] 党宏忠,周泽福,赵雨森.青海云杉林冠截留特征研究[J].水土保持学报,2005,19(4):61-64.
- [15] 党宏忠,董铁狮,赵雨森.水曲柳林冠的降水截留特征[J].林业科学研究,2008,21(5):657-661.
- [16] 巩合德,张一平,刘玉洪,等.哀牢山常绿阔叶林林冠的截留特征[J].浙江林学院学报,2008,25(4):469-474.

(上接第324页)