

DOI: 10.5846/stxb201803270612

唐立涛, 字洪标, 胡雷, 阿的鲁骥, 王长庭. 青海省森林细根生物量及其影响因子. 生态学报, 2019, 39(10): - .

Tang L T, Zi H B, Hu L, ADE Luji, Wang C T. Forest biomass and its influencing factors in Qinghai Province. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(10): - .

青海省森林细根生物量及其影响因子

唐立涛, 字洪标, 胡 雷, 阿的鲁骥, 王长庭*

西南民族大学青藏高原研究院, 成都 610041

摘要: 细根是植物吸收水分和养分的主要器官。全球变暖背景下, 研究森林细根生物量及其环境因子的变化对生态系统碳平衡、碳收支及其贡献率具有重要意义。采用土钻法和室内分析法对青海省森林 6 个海拔梯度上 5 种林分类型的细根生物量和土壤理化性质进行测定, 并分析了与环境因子之间的相互关系。结果表明: (1) 青海省森林 0—40 cm 土层总细根生物量平均为 8.50 t/hm², 随着海拔梯度的增加先降低后升高, 不同海拔梯度细根生物量差异显著 ($P < 0.05$), 最大值出现在 2100—2400 m 处。(2) 5 种林分 0—40 cm 土层总细根生物量为: 白桦 < 白杨 < 云杉 < 圆柏 < 山杨, 不同林分间细根生物量差异不显著。(3) 细根垂直分布随土层深度增加而减少, 且 70% 的细根集中在表层 (0—20 cm)。(4) 土壤容重深层 (20—40 cm) 显著大于表层 ($P < 0.05$), 并随海拔梯度逐步增加, 且林分间差异较大。(5) 全碳 (Total carbon, TC)、全氮 (Total nitrogen, TN)、全磷 (Total phosphorus, TP) 含量表层显著高于深层。TC、TN 随海拔升高先增后降低, TP 则随海拔逐步降低。不同林分间土壤养分差异较明显。(6) 结构方程模型分析得到海拔、土层、容重直接影响细根生物量, 细根生物量直接影响土壤养分。林分类型通过土壤容重间接影响细根生物量。因此, 林分和海拔通过影响土壤微环境而影响到细根生物量及其空间分布格局。

关键词: 青海省; 细根生物量; 海拔; 林分类型; 土壤理化性质

Forest biomass and its influencing factors in Qinghai Province

TANG Litao, ZI Hongbiao, HU Lei, ADE Luji, WANG Changting*

Institute of Qinghai-tibetan Plateau, Southwest Minzu University, Chengdu 610041, China

Abstract: Fine roots are the main organs that plants use to absorb water and nutrients. In the context of global warming, it is of great significance to study the biomass of fine roots and the environmental factors affecting carbon balance, carbon budget, and contribution rate of the ecosystem. In this study, the soil drilling method and indoor analysis were used to determine the fine root biomass and soil physical and chemical properties of 5 species in forest system on 6 elevations in Qinghai Province. The relationships between fine root biomass and environmental factors were further analyzed. The results showed that: (1) In Qinghai Province, the average of the total fine root biomass was 8.50 t/hm² in 0—40 cm soil depth. With the altitude increase along the gradient, fine root biomass decreased first and then increased. There were significant differences in the biomass of fine roots among different altitudes ($P < 0.05$), and the highest peak of fine root biomass appeared at 2100—2400 m. (2) The total fine root biomass of 5 forest species in the 0—40 cm depth was as follows: *Betula platyphylla* < *Populus tomentosa* < *Picea asperata* < *Sabina chinensis* < *Populus davidiana*. There were no significant differences in biomass of fine roots among different stands. (3) Fine root biomass decreased with the soil depth, and 70% of the fine roots were concentrated in 0—20 cm soil layer. (4) Soil bulk density in the 20—40 cm soil layer was significantly greater than that in the 0—20 cm soil layer ($P < 0.05$). It increased with the altitude, and there were substantial differences among the 5 forest species. (5) The contents of total carbon (TC), total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) in the

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项“应对气候变化的碳收支认证及相关问题”(XDA05050207); 四川省重点研发项目(2018SZ0333); 中央高校基本科研业务费专项资金(2018NZD13); 西南民族大学研究生“创新型科研项目”重点项目(CX2018SZ111)

收稿日期: 2018-03-27; 网络出版日期: 2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wangct@swun.edu.cn or wangct6@163.com

surface soils (0—20 cm) were significantly higher than those in the deeper soils (20—40 cm). TC and TN increased first and then decreased, while TP decreased with the altitude gradient. The differences in soil nutrients between different forest species were obvious. (6) SEM analysis showed that the fine root biomass was significantly correlated with altitude, soil layer, and bulk density, and the biomass of fine roots directly affected soil nutrients. The forest species affected the fine root biomass indirectly. Therefore, the plant species and elevation affected the biomass and spatial distribution of fine roots by influencing the soil micro-environment.

Key Words: Qinghai Province; fine root biomass; elevation gradient; forest species; soil physical and chemical properties

细根(直径 ≤ 2 mm)具有直径小、无木质部、生长和周转迅速的特点,是构成森林生态系统地下碳库的重要组成部分^[1]。虽然森林细根生物量在大部分陆地生态系统地下总生物量中占比为 3%—30%,但是它在维持自身功能的过程中最高能消耗净初级生产力的 75%^[2]。因此,探究细根动态过程对于了解细根在森林生态系统中碳分配和养分循环过程中的作用至关重要。但由于对根系的生态学作用认识不足以及根系研究的困难,人们研究重点往往是林木的地上部分,而对林木地下部分的研究相对较弱。

近年来,随着全球碳循环研究的开展以及对森林生态系统研究的深入,森林细根生物量变化规律受到了国内外学者的广泛关注。以往研究表明细根生物量不一定呈现水平分布格局^[3],且不同海拔植被细根生物量及各形态指标都具有明显的垂直变化规律^[4]。细根的分布与土壤容重、碳和氮含量有显著的相关性,土层深度也是影响细根生物量的重要因素^[5]。鉴于细根对于森林生态系统的重要性,研究细根生物量对森林地下碳库的贡献不仅体现在局域水平,而且区域尺度上研究细根生物量对碳收支的贡献率也必不可少。然而,青海省森林作为青藏高原的重要组成部分,其对森林生态系统结构和功能的作用,及其与土壤物质循环(如碳氮循环)和维持机制仍不明确。

青海森林生态系统在固碳造氧、涵养水源、森林憩游、保育土壤以及生物多样性保护等方面贡献巨大,生态地位十分重要^[6]。圆柏(*Sabina chinensis*)、云杉(*Picea asperata*)、白桦(*Betula platyphylla*)等是其生态系统植被碳库的重要组成部分。当前针对青海云杉林研究所涉及的方面颇多,例如:青海云杉与其林下植物多样性的关系^[7],云杉林更新的时空特征^[8]。但有关青海省森林地下细根生物量及其影响因子等方面研究相对匮乏。因此本文选取云杉、白桦、圆柏、山杨(*Populus davidiana*)和白杨(*Populus tomentosa*)5 种林分类型为研究对象,旨在分析和探讨青海森林细根生物量的分布格局及其与环境因子的关系,以期更深入地了解青海省森林生态系统碳汇以及地下碳循环过程,为该地区森林生态系统可持续利用与管理提供基础资料。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

青海省雄踞于青藏高原东北部(31°39′—39°19′ N, 89°35′—103°4′ E),是黄河、长江、澜沧江的发源地。青海省东西长约 1200 km,南北宽约 800 km,占地面积约 72.1×10^4 km²。其中林地面积为 11.2×10^6 hm²,占全省总面积的 15.6%,以寒温带针叶林为主,且大多集中在海拔 2000—4000 m 区域^[9]。地貌复杂,气候独特,属典型高原大陆性气候,年均气温 -3.7—6.0℃,年日照 2340—3550 h,年降水量 16.7—776.1 mm(大部分 400 mm 以下),年蒸发量 1118.4—3536.2 mm(大部分 1500 mm 以上)^[10]。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置与细根的采集处理

本研究依托中国科学院战略性先导科技专项(碳专项),按照《生态系统固碳现状、速率、机制和潜力》项目^[11]制定的统一要求,并结合青海省森林资源连续清查成果,充分考虑全省各森林类型(优势种)分布面积、蓄积比重、起源等情况,在全省 21 个县(图 1)布置主要森林类型标准样地 80 个,海拔为 2175—3852 m,以垂直距离 300 m 分为 6 个梯度(表 1)。每个样地随机设置 3 块 50 m×20 m 的乔木样方,各样方间距大于 100 m,

共计 240 个样方。每个样方按照平均木的标准选取优势种,利用内径 5 cm 的根钻,在优势树种树冠下随机钻 10 个土芯,按 0—20 cm、20—40 cm 分层取样。将样品用清水浸泡 1 d,在流水中过 100 目土壤筛分离土壤和细根。根据细根的颜色、外形、弹性、皮层保留直径 ≤ 2 mm 的木本植物细根。洗净后将细根称重,后分别装入纸袋,在 85℃ 的条件下烘干并称重。

1.2.2 土壤理化性质测定

采集根系的同时,在每个样方随机选取样点并清理林地表层凋落物,采用土钻法(直径 5 cm)采集 0—20 cm 和 20—40 cm 土层土壤各 9 个,每个土层的 9 个土样充分混合均匀,装入封口袋。将土样过 1 mm 筛清理土样中石块、残留根系及其他杂质后测定土壤容重和土壤养分 TC、TN、TP 含量。采用重铬酸钾容量法—外加热法测定土壤 TC 含量;凯氏定氮法测定土壤 TN 含量;钼锑抗比色法测定土壤 TP 含量。

1.3 数据处理

采用多因素方差分析(Multi-way ANOVA)检验土层和海拔、土层跟林分以及海拔和林分的交互作用对细根生物量的影响;单因素方差分析(One-way ANOVA)检验不同海拔、林分细根生物量的差异性,如果方差为齐性,采用 LSD 法进行多重比较,若方差为非齐性,则用 Tamhane's 2 法进行多重比较;利用 Pearson 相关分析海拔、土层、土壤容重、土壤养分与细根生物量之间的相关性,显著性水平设置为 $\alpha=0.05$,以上分析均使用 SPSS 10.0 统计软件完成。利用 AMOS 17.0 构建细根生物量与环境因子的结构方程模型。运用 Excel 2010 软件完成数据的计算和图表绘制。

表 1 不同海拔梯度样本分布

海拔梯度 Altitude gradient/m	林分 Forest type	样本数 Number of samples	总样本数 Total number of samples
2100—2400	云杉	12	16
	山杨	4	
	白桦	11	
2400—2700	白杨	3	22
	山杨	2	
	圆柏	1	
	云杉	5	
2700—3000	云杉	53	72
	白桦	14	
	白杨	2	
	山杨	3	
3000—3300	云杉	1	2
	圆柏	1	
3300—3600	云杉	31	43
	圆柏	12	
3600—3900	云杉	14	25
	圆柏	11	

本文最终筛选出 180 个样本数据

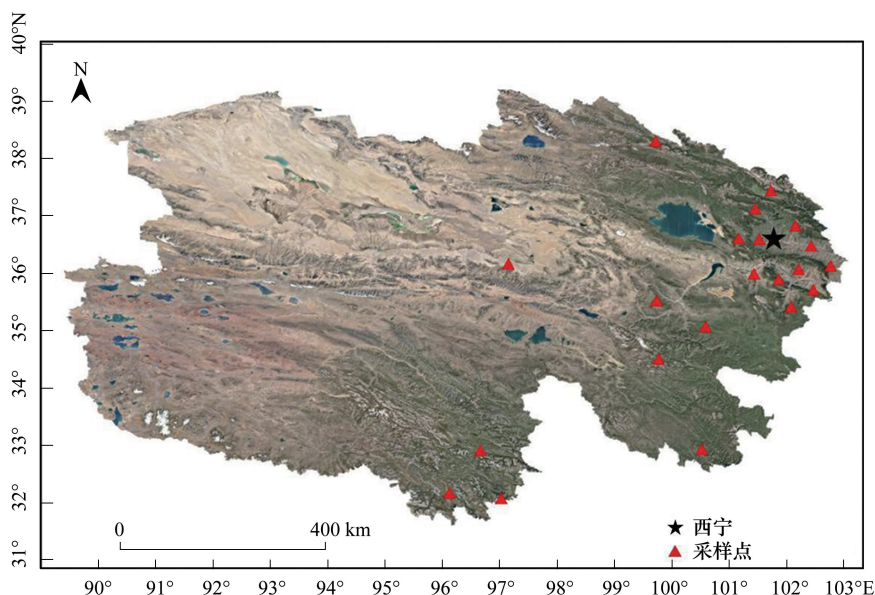


图 1 青海省采样点位图

Fig.1 Sampling point map of Qinghai Province

2 结果与分析

2.1 细根生物量的变化特征

2.1.1 不同海拔梯度细根生物量的变化

土层、海拔、土层和海拔的交互作用均对青海省森林细根生物量有显著影响 ($P<0.05$) (表 2), 细根生物量随海拔梯度总体上先降低再升高 (图 2)。细根生物量在海拔 2100—2400 m 处最大 (10.27 t/hm^2), 且显著大于 2400—3000 m 和 3300—3600 m 处 ($P<0.05$), 在海拔 2400—2700 m 最小 (7.65 t/hm^2)。

同一土层细根生物量随海拔梯度的变化特征不规律, 但差异较大 (图 3)。表层 (0—20 cm) 细根生物量在海拔 2100—2400 m 最高 (8.01 t/hm^2), 3300—3600 m 最低 (5.42 t/hm^2)。深层 (20—40 cm) 细根生物量在海拔 3000—3300 m 最大 (3.04 t/hm^2), 2700—3000 m 最低 (1.99 t/hm^2)。同一海拔不同土层, 细根生物量随土层的加深明显下降, 6 个海拔梯度不同土层的细根生物量均差异显著 ($P<0.05$) 且表层细根生物量占比为 68%—78%。

表 2 海拔和土层对细根生物量影响方差分析

Table 2 Variance analysis of the interaction effects of forest type and altitude on fine root biomass

变异来源 Sources of variation	自由度 Degrees of freedom	均方 Mean square	<i>F</i>	显著度 Significant degree
海拔梯度 Elevation gradient	5	12.283	3.053	0.010
土层 Soil layer	1	426.498	105.996	0.000
土层×海拔梯度 Soil layer×elevation gradient	5	10.787	2.681	0.021

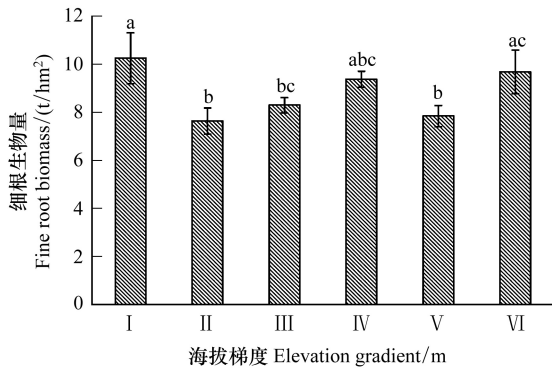


图 2 不同海拔梯度细根总生物量的分布特征

Fig.2 Distribution characteristics of the total biomass of fine roots at different altitudes

横坐标中的 I、II、III、IV、V、VI 分别表示海拔梯度 2100—2400 m、2400—2700 m、2700—3000 m、3000—3300 m、3300—3600 m、3600—3900 m, 下同; 不同小写字母表示不同海拔梯度细根生物量差异显著 ($P<0.05$)

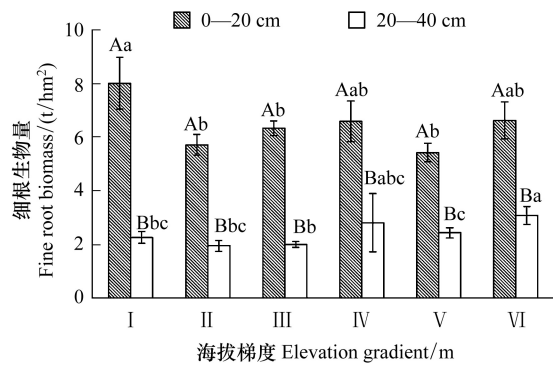


图 3 海拔梯度对细根生物量的影响

Fig.3 Fine root biomass at different altitudes

不同小写字母表示同一土层不同海拔之间差异显著; 不同大写字母表示同一海拔不同土层之间差异显著 ($P<0.05$)

2.1.2 不同林分细根生物量的变化

土层对不同林分细根生物量影响显著 ($P<0.05$), 而林分、林分与土层、海拔梯度和林分的交互作用对细根生物量影响并不显著 (表 3, 表 4)。5 种林分细根总生物量大小为: 白桦<白杨<云杉<圆柏<山杨 (图 4)。山杨林细根生物量最高 (8.94 t/hm^2), 白桦林最低 (7.75 t/hm^2)。相同土层细根生物量在不同林分间差异不显著 (图 5), 所有林分表层细根生物量大小为: 白桦<圆柏<白杨<云杉<山杨, 深层为: 白杨<白桦<山杨<圆柏<云杉。

所有林分细根生物量的垂直分布特征大致相等,均随土层加深而减少。不同林分的表层细根生物量均显著大于深层($P<0.05$),且表层细根生物量占总细根生物量的 72%—80%。

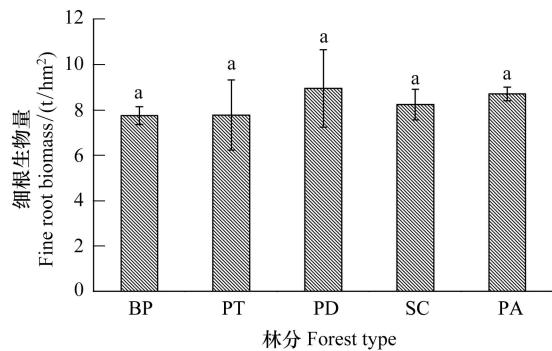


图 4 不同林分间细根总生物量的分布特征

Fig.4 The distribution characteristics of the total biomass of fine roots between different forest types

不同小写字母表示不同林分细根生物量差异显著($P<0.05$);BP:白桦 *Betula platyphylla*;PT:白杨 *Populus tomentosa*;PA:云杉 *Picea asperata*;SC:圆柏 *Sebina chinensis*;PD:山杨 *Populus davi415diana*

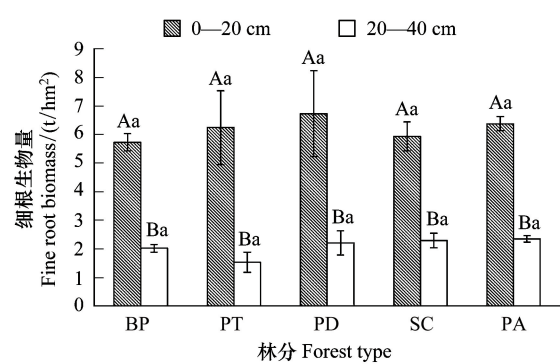


图 5 林分对细根生物量的影响

Fig.5 Effect of forest type on fine root biomass

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

表 3 林分和土层对细根生物量影响方差分析

Table 3 Variance analysis of the interaction effects of forest type and altitude gradient on fine root biomass				
变异来源 Sources of variation	自由度 Degrees of freedom	均方 The mean square	<i>F</i>	显著度 Significant degree
林分 Forest type	4	3.109	0.726	0.574
土层 Soil layer	1	529.249	123.639	0.000
林分×土层 Forest type×soil layer	4	1.241	0.290	0.884

表 4 林分 and 海拔梯度对细根生物量交互影响方差分析

Table 4 Variance analysis of the interaction effects of forest type and altitude gradient on fine root biomass				
变异来源 Sources of variation	自由度 Degrees of freedom	均方 The mean square	<i>F</i>	显著度 Significant degree
林分 Forest type	4	1.583	1.255	0.290
海拔梯度 Elevation gradient	5	3.373	2.674	0.024
林分×海拔梯度 Forest type×elevation gradient	7	0.853	0.676	0.692

2.2 土壤理化性质的变化特征

2.2.1 不同海拔梯度土壤理化性质的变化

土壤容重大致随海拔增加而变大,最小值出现在 2100—2400 m 处,最大值出现在 3300—3600 m 处。土壤表层、深层土容重在低海拔处与高海拔处差异显著($P<0.05$)。所有海拔梯度土壤容重均呈现出随土层加深而变大的垂直分布规律,且深层显著大于表层($P<0.05$)(表 5)。

各个海拔梯度土壤表层 TC、TN、TP 含量显著大于深层($P<0.05$)。TC 含量均随海拔梯度总体上先增加后减少,在 3300—3600 m 处达到峰值。TN 含量随海拔梯度也表现出与 TC 类似的规律。TP 含量随海拔梯度逐步减少,不同海拔上 TP 含量均存在差异,最小值出现在 3600—3900 m 处。

2.2.2 不同林分土壤理化性质变化

不同林分土壤容重均存在差异,云杉、白桦林土壤容重较小,且与白杨、山杨林有较大差异(表 6)。所有林分土壤容重均随土层的加深而变大。同一林分不同土层,深层(20—40 cm)土壤容重显著大于表层(0—

20 cm) ($P<0.05$)。

所有林分 TC、TN、TP 含量均随土层加深而降低,且表层含量均显著大于深层 ($P<0.05$)。云杉林土壤 TC、TN、TP 含量较高。表层土壤中,白杨林 TC 含量显著小于白桦、云杉林 ($P<0.05$),云杉林 TN 含量显著大于白杨林 ($P<0.05$),云杉、白桦林 TP 含量显著大于山杨、圆柏林 ($P<0.05$)。深层土壤中,白杨、山杨林 TC 含量与白桦林差异显著 ($P<0.05$),山杨林与圆柏、云杉林 TN 含量差异显著 ($P<0.05$),云杉林 TP 含量显著大于圆柏林 ($P<0.05$)。

表 5 不同海拔梯度内土壤特性分布特征

Table 5 Distribution characteristics of soil characteristics in different elevation gradients

海拔梯度 Elevation/m	土层 Soil layer/cm	土壤全 C Soil total C/(g/kg)	土壤全 N Soil total N/(g/kg)	土壤全 P Soil total P/(g/kg)	土壤容重 Soil bulk density/(g/cm ³)
I	0—20	95.00±7.93Aa	4.01±0.46Ab	0.88±0.03Aa	0.37±0.03Ab
	20—40	58.80±6.50Bb	2.57±0.43Bb	0.79±0.04Bab	0.66±0.05Bb
II	0—20	97.97±7.97Aa	3.97±0.28Ab	0.80±0.05Aab	0.53±0.05Aab
	20—40	64.43±5.85Bb	2.45±0.15Bb	0.71±0.05Bab	0.83±0.04Babc
III	0—20	96.41±3.82Aa	4.10±0.21Ab	0.79±0.02Aab	0.53±0.03Aab
	20—40	58.49±3.13Bb	2.52±0.18Bb	0.70±0.02Bab	0.72±0.03Bab
IV	0—20	113.83±6.43Aa	8.80±4.75Aa	0.81±0.09Aab	0.58±0.22Aab
	20—40	86.92±41.84Bb	7.07±3.18Ba	0.82±0.07Ba	0.75±0.22Bab
V	0—20	91.27±6.88Aa	6.80±0.40Aa	0.85±0.30Aa	0.65±0.04Aa
	20—40	43.47±3.51Ba	3.47±0.28Bb	0.69±0.03Bab	0.99±0.03Ba
VI	0—20	98.37±7.42Aa	6.82±0.46Aa	0.74±0.03Ab	0.64±0.05Aa
	20—40	52.34±4.14Bab	3.71±0.35Bb	0.60±0.03Bb	0.92±0.05Bab

第一列中的 I、II、III、IV、V、VI 分别表示海拔梯度 2100—2400 m、2400—2700 m、2700—3000 m、3000—3300 m、3300—3600 m、3600—3900 m,下同;不同小写字母表示不同海拔梯度相同土层细根生物量差异显著 ($P<0.05$),不同的大写字母表示同一海拔梯度内不同土层间细根生物量差异显著 ($P<0.05$)

表 6 不同林分土壤理化性质分布特征

Table 6 Distribution characteristics of different forest types of fine root biomass

林分 Forest type	土层 Soil layer/cm	土壤容重 Soil bulk density/ (g/cm ³)	土壤全 C Soil total P/ (g/kg)	土壤全 N Soil total N/ (g/kg)	土壤全 P Soil total P/ (g/kg)
白桦	0—20	0.49±0.22Bc	99.96±7.13Aa	4.33±1.57Aabc	0.84±0.21Aa
<i>Betula platyphylla</i> Suk	20—40	0.72±0.20Ac	60.27±5.51Ba	2.56±1.34Bab	0.68±0.22Bab
白杨	0—20	0.71±0.05Bab	65.90±5.55Ab	2.79±0.30Ac	0.76±0.13Aab
<i>Populus tomentosa</i> Carr	20—40	1.02±0.10Aa	37.42±5.44Bb	1.73±0.62Bab	0.65±0.20Bab
山杨	0—20	0.76±0.39Bab	70.27±9.82Aab	3.52±0.89Abc	0.72±0.13Ab
<i>Populus davidiana</i>	20—40	0.98±0.42Aab	37.72±8.768Bb	1.75±0.93Bb	0.64±0.21Bab
圆柏	0—20	0.70±0.25Aab	83.47±10.16Aab	5.92±2.74Aa	0.71±0.08Ab
<i>Sabina chinensis</i>	20—40	0.92±0.19Aabc	46.26±3.80Bab	3.22±1.35Ba	0.60±0.12Bb
云杉	0—20	0.52±0.19Bbc	100.64±3.11Aa	5.39±2.60Aab	0.83±0.17Aa
<i>Picea asperata</i> Mast	20—40	0.80±0.26Abc	57.95±2.49Bab	3.13±1.91Ba	0.73±0.19Ba

不同小写字母表示不同林分间相同土层细根生物量差异显著,不同大写字母表示同一林分不同土层间细根生物量差异显著 ($P<0.05$)

2.3 细根生物量与环境因子相关性分析

构建结构方程模型 (Structural Equation Model, SEM) 分析细根生物量与环境因子之间的相互影响关系。CHI/DF = 0.218, GFI = 0.999, RMSEA < 0.001, $P = 0.929$ (图 6) 说明该模型能够较好的适配研究数据以及路径分析体系。建模时对土壤 TC、TN、TP 进行降维处理,提取第一维数据可解释率为 63.62%。结果显示 SEM 能解释细根生物量的 49%,土壤养分的 48%,土壤容重的 37%。土层、土壤容重直接影响细根生物量,并

且极显著负相关($P<0.01$);林分通过容重间接影响细根生物量;细根生物量显著影响土壤养分($P<0.01$)。Pearson 相关分析结果也表明:细根生物量与海拔、土壤 TC、TN、容重、土层均极显著相关($P<0.01$)。而土壤 TC、TN、TP 均与容重呈负相关($P<0.01$)(表 7)。

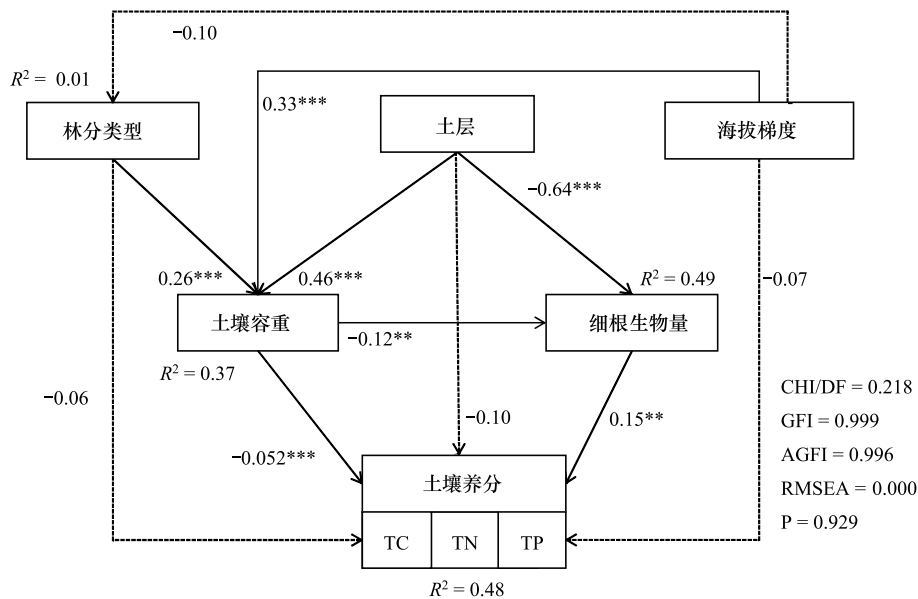


图 6 细根生物量与环境因子结构方程模型

Fig.6 The structural equation model of fine root biomass and environmental factor

* * $P < 0.01$, * * * $P < 0.001$;实线表示影响显著,虚线表示影响不显著;CHI:卡方值,Chi-Square;DF:自由度,Degrees of freedom;GFI:适配度指数,Goodness-of-fit index;AGFI:调整后适配度指数,Adjusted goodness-of-fit index;RMSEA:近似误差均方根,Root mean square error of approximation

表 7 细根生物量与环境因子相关性分析

Table 7 The correlation analysis between fine root biomass and environmental factors

项目 Item	土壤全 C TC	土壤全 N TN	土壤全 P TP	土壤容重 Soil bulk density	海拔 Elevation	土层 Soil layer	细根生物量 Fine root biomass
土壤全 C TC	1						
土壤全 N TN	0.635 **	1					
土壤全 P TP	0.302 **	0.386 **	1				
土壤容重 Soil bulk density	-0.657 **	-0.302 **	-0.207 **	1			
海拔 Elevation	-0.298 **	0.460 **	-0.071	0.467 **	1		
土层 Soil layer	-0.535 **	-0.455 **	-0.299 **	0.462 **	0.000	1	
细根生物量 Fine root biomass	0.459 **	0.285 **	0.136 *	-0.413 **	-0.236 **	-0.694 **	1

* $P<0.05$, * * $P<0.01$

3 讨论

3.1 细根生物量的变化

研究表明,细根生物量随海拔梯度先降低后升高,在 2100—2400 m 处最大,因为低海拔处生境适宜,种群通过增加细根生物量来满足其空间拓展和繁殖需求^[12]。随着海拔的升高,可能由于水、气、光、热组合发生变异,气候条件变差,风力变强,有效积温降低,植物为了生存繁殖,调整生存对策改变细根生物量来适应严酷的高海拔环境。高海拔地区土壤酶活性降低^[13],微生物代谢变慢抑制了对根系凋落物的分解速率,且海拔高的

地方死根生物量相对较高,以此来维持局部小环境的温度,来保证活根的生长,这可能也是高海拔地区植物适应环境的一种策略^[14]。还可能因为青藏高原是全球气候变暖的“启动器”和“放大器”,其温度升高要快于全球平均值^[15]。海拔越高的地区气候变暖趋势越明显,高海拔地区森林环境因子向低海拔地区趋近^[16],导致高海拔区域细根生长相对较快。另外,本研究仅选择海拔 2175—3852 m 细根生物量来研究分析,海拔继续升高后是否还有同样的规律有待进一步研究考证。

差异显著性分析表明 5 种林分间细根生物量差异不显著,林分和土层以及林分与海拔梯度的交互作用(表 4)均对细根生物量没有显著影响,说明林分的变化并不影响细根生物量空间上的生态位^[17]。热带落叶阔叶林的细根生物量为 40.68 t/hm²、暖温带落叶阔叶林的为 13.71 t/hm²、寒温带落叶阔叶林的为 6.55 t/hm²和寒温带常绿针叶林的为 7.31 t/hm²^[18],可见细根生物量随着纬度的升高而减小。青海省森林细根生物量平均为 8.50 t/hm²(所有样地细根生物量取均值),除山杨林,其他两种阔叶林的细根生物量比针叶林的细根生物量低,这与一般阔叶林细根生物量高于针叶林的有关研究结论不一致^[19],因为植被群落类型不同,它们的生活对策不同,对光合作用产生的能量分配也不同,进而导致细根生物量出现差异。何永涛的调查发现白桦林细根生物量为 7.89 t/hm²^[20],与本研究结果相近。郭忠玲等研究表明^[21],白桦林细根生物量最高(5.13 t/hm²)、其次为山杨林(3.94 t/hm²),这比本研究中的白桦林细根生物量低 33.8%,比山杨林的低 55.9%,可能是因为本研究区域所处的气候带^[22]、海拔等地理因素不同导致土壤类型、立地条件有差异^[23],也可能是林下草本群落组成尤其是优势种的不同引起的差异。

3.2 土壤理化性质的变化

土壤作为植被赖以生存的载体,理化性质在时间和空间上是异质性分布的^[24]。低海拔区域降水量适宜,它可以明显影响土壤的导电率和含水率,致使土壤吸水溶胀,因而低海拔处土壤容重变小^[25]。随着海拔的升高容重变大,可能由于海拔的变化导致林分改变,林分的变化又与土壤容重密切相关^[26],林分可改变土壤的物理性状。还可能是海拔的变化引起土壤结构、质地、有机质含量差异等因素造成的。

土壤 TC 随海拔梯度先增加后减少,由于低海拔处气温较高,微生物以及酶活性较高,有机碳分解快土壤有机碳积累变少,区域含碳量以无机碳为主从而 TC 含量较少^[27]。随着海拔的增加,温度降低,林地植被覆盖度高,地下地上生物量充足,微生物以及根系活性较弱,碳酸钙沉淀减少,有机质积累变多最终促使 TC 含量增加^[28]。当海拔进一步升高,气温降低到一定界值,植被生存环境恶劣,作为 TC 重要来源的地上生物量相比其他区域较少,因而土壤 TC 含量降低。土壤 TN 含量随海拔的升高先增加后降低,可能是不同海拔林地植被凋落物数量和种类以及林地温度、湿度差异造成的^[29]。土壤 TN 含量还可能受植物生长所消耗以及有机质分解氮的影响,二者相互作用导致 TN 随海拔先增后降^[30]。土壤 TP 随海拔梯度逐步减少,可能因为 P 元素主要来源于岩石风化,土壤中 P 的迁移转化以及磷沉降容易受外界因子的影响而发生变异。海拔高度的增加,气候变化更明显,气候又是影响土壤 P 空间分布的主要因素^[31],所以土壤 TP 随海拔的增加空间分布不规律。

各林分类型之间土壤容重均有差异,可能由于不同林分林下土壤母质、凋落物特性、根系分布存在差异导致的^[32]。云杉、白桦林土壤容重较小,原因可能是:林地土壤团粒较多土壤疏松,从而土壤孔隙度大,容重变小;地表腐殖质层厚度适中、凋落物产量适宜,土壤微生物活性良好有机质分解较快,使得林地土壤疏松多孔,透气性好。所有林分表层容重显著小于深层,这和林地表层土壤中较高的资源有效性、微生物活性以及水肥耦合性有关^[33]。

林分间土壤 TC 含量有差异,可能因为不同林分的树种组成有差异,植被冠层的光合固碳能力不同,导致林地凋落物的类别、质量和产量有差异,最终影响森林土壤的碳汇功能^[34]。林分间土壤 TN 含量存在差异可能因为不同林分土壤的硝化速率不同,影响林分土壤氮素的转化,导致林分土壤的氮素水平产生差异。不同林分所处的地理位置、气候、土壤母质以及地表凋落物不同,又因为土壤中的 P 不只来源于凋落物的分解,还和土壤母质的矿物成分有关,所以林分间土壤 TP 含量存在差异。此外,云杉林的 TC、TN、TP 含量较高充分说明,作为青海省特有的优势树种,云杉对青海省森林土壤环境的优化和土壤生态平衡的维持意义重大^[35]。

3.3 细根生物量与环境因子的相互关系分析

细根生物量与环境因子的相互影响关系已经有诸多报道。例如 Mc Cormack 等^[36]认为细根生物量与气候条件等因素有关。本文 SEM 显示土层、土壤容重直接影响细根生物量。土层是影响细根生物量的重要因素,细根生物量随着土层深度的增加而减少^[37],且有大概 70%集中在 0—20 cm 土层^[38]。这是由于随着土层深度的增加土壤养分含量减少,影响细根吸收养分,还引起土壤下层温度变低细根的呼吸速率变小,致使细根生物量垂直下降^[39]。土壤容重影响细根生物量,主要和土壤中的空气含量有关^[40]。表层土壤容重较小,根系生长空间大且容易获得足够的空气,深层土壤空气含量减少,导致细根生物量减少^[41]。由于不同林分地表凋落物的构成及其储量和分解速率有差异,造成林分间土壤容重不同^[42],林分通过影响土壤容重间接影响细根生物量。

土壤的 C、N、P 元素是养分循环和转化的核心,它在驱动和调节森林生态系统演替过程发挥重要作用^[43]。本研究发现细根生物量对土壤 TC、TN、TP 有较大影响。因为细根在森林生态系统凋落物和养分循环中,且作为根系中最为活跃的部分,它的不断生长、死亡以及分解变化对补偿土壤养分发挥着重要作用^[44]。细根是 C 进入土壤生态系统的主要路径,大部分土壤 C 可能来源于它^[45],细根死亡分解不仅对土壤 N 的贡献率比凋落物大 18%—58%,而且还是归还土壤 P 的重要途径,倘若忽略细根的生产、死亡和分解作用,土壤养分的周转将会被低估 20%—80%^[46],所以细根生物量显著影响土壤养分。

4 结论

本研究分析了青海省森林细根生物量及其影响因子,表明青海省 0—40 cm 土层森林细根生物量平均为 8.50 t/hm²,并且对土层、土壤容重和海拔的变化十分敏感。林分可能通过土壤容重间接影响细根生物量。同时,细根生物量还直接显著影响土壤养分含量。

参考文献 (References):

- [1] Gill R A, Jackson R B. Global patterns of root turnover for terrestrial ecosystems. *New Phytologist*, 2000, 147(1): 13-31.
- [2] 张小全, 吴可红. 森林细根生产和周转研究. *林业科学*, 2001(3): 126-138.
- [3] Kummerow J, Castillanos J, Maas M, Larigauderie A. Production of fine roots and the seasonality of their growth in a Mexican deciduous dry forest. *Vegetatio*, 1990, 90(1): 73-80.
- [4] 权伟, 徐侠, 王丰, 汪家社, 方燕鸿, 阮宏华, 余水强. 武夷山不同海拔高度植被细根生物量及形态特征. *生态学杂志*, 2008, 27(7): 1095-1103.
- [5] 刘顺, 罗达, 杨洪国, 史作民, 刘千里, 张利, 康英, 马青. 川西亚高山岷江冷杉原始林细根生物量、生产力和周转. *生态学杂志*, 2018, 37(4): 987-993.
- [6] 向泽宇, 张莉, 张全发, 刘伟, 王根绪, 王长庭, 胡雷. 青海不同林分类型土壤养分与微生物功能多样性. *林业科学*, 2014, 50(4): 22-31.
- [7] 邹扬, 贺康宁, 赵畅, 周建, 赵丹丹, 安国才. 高寒区青海云杉人工林密度与林下植物多样性的关系. *西北植物学报*, 2013, 33(12): 2543-2549.
- [8] 王清涛. 青海云杉林更新及其幼苗幼树生态势模拟研究. 兰州: 兰州大学, 2017.
- [9] 字洪标, 向泽宇, 王根绪, 阿的鲁骥, 王长庭. 青海不同林分土壤微生物群落结构 (PLFA). *林业科学*, 2017, 53(3): 21-32.
- [10] 董旭. 青海省森林资源评价. *安徽农业科学*, 2009, 37(12): 5727-5728, 5751-5751.
- [11] 生态系统固碳项目技术规范编写组. 生态系统固碳观测与调查技术规范. 北京: 科学出版社, 2015.
- [12] 陈劲松, 苏智先. 缙云山马尾松种群生物量生殖配置研究. *植物生态学报*, 2001, 25(6): 704-708.
- [13] 曹瑞, 吴福忠, 杨万勤, 徐振锋, 谭波, 王滨, 李俊, 常晨晖. 海拔对高山峡谷区土壤微生物生物量和酶活性的影响. *应用生态学报*, 2016, 27(4): 1257-1264.
- [14] Wang C T, Long R J, Wang Q J, Ding L M, Wang M P. Effects of altitude on plant-species diversity and productivity in an alpine meadow, Qinghai-Tibetan plateau. *Australian Journal of Botany*, 2007, 55(2): 110-117.
- [15] Xu Y, Ding Y H, Li D L. Climatic change over Qinghai and Xizang in 21st century. *Plateau Meteorology*, 2003, 22(5): 451-457.
- [16] 刘彦春, 张远东, 刘世荣, 张笑鹤. 川西亚高山针阔混交林乔木层生物量、生产力随海拔梯度的变化. *生态学报*, 2010, 30(21):

5810-5820.

- [17] 王伟伟, 黄锦学, 陈锋, 熊德成, 卢正立, 黄超超, 杨智杰, 陈光水. 树种多样性对亚热带米槠林细根生物量和形态特征的影响. 应用生态学报, 2014, 25(2): 318-324.
- [18] Lin Y M, Lin P, Yang Z W. A study on fine root turnover. Journal of Xiamen University: Natural Science, 1998, 37(3): 429-435.
- [19] Vogt K A, Vogt D J, Palmiotto P A, Boon P, O'Hara J, Asbjornsen H. Review of root dynamics in forest ecosystems grouped by climate, climatic forest type and species. Plant and Soil, 1995, 187(2): 159-219.
- [20] 何永涛, 石培礼, 徐玲玲. 拉萨-林芝植被样带不同群落类型的细根生物量. 林业科学, 2009, 45(10): 148-151.
- [21] 郭忠玲, 郑金萍, 马元丹, 韩士杰, 李庆康, 于贵瑞, 范春楠, 刘万德, 邵殿坤. 长白山几种主要森林群落木本植物细根生物量及其动态. 生态学报, 2006, 26(9): 2855-2862.
- [22] Idol T W, Pope P E, Ponder Jr F. Fine root dynamics across a chronosequence of upland temperate deciduous forests. Forest Ecology and Management, 2000, 127(1-3): 153-167.
- [23] 朱胜英, 周彪, 毛子军, 王秀伟, 孙元发. 帽儿山林区 6 种林分细根生物量的时空动态. 林业科学, 2006, 42(6): 13-19.
- [24] Campbell B D, Grime J P. A comparative study of plant responsiveness to the duration of episodes of mineral nutrient enrichment. New Phytologist, 1989, 112(2): 261-267.
- [25] 乔宇鑫, 朱华忠, 钟华平, 伍兆文, 孟雷, 周李磊. 内蒙古地区草地表层土壤容重空间格局分析. 草地学报, 2016, 24(4): 793-801.
- [26] 方运霆, 莫江明, 彭少麟, 李德军. 森林演替在南亚热带森林生态系统碳吸存中的作用. 生态学报, 2003, 23(9): 1685-1694.
- [27] 周李磊, 朱华忠, 钟华平, 杨华. 新疆伊犁地区草地土壤全碳含量空间格局分析. 草业科学, 2016, 33(10): 1963-1974.
- [28] 刘伟, 程积民, 高阳, 程杰, 梁万鹏. 黄土高原草地土壤有机碳分布及其影响因素. 土壤学报, 2012, 49(1): 68-76.
- [29] 朱红霞, 王艳玲, 张耀鸿, 周晓冬. 紫金山不同海拔高度土壤的碳氮分布特征. 南京信息工程大学学报, 2012, 4(4): 326-329.
- [30] 王瑞永, 刘莎莎, 王成章, 郭玉霞, 严学兵. 不同海拔高度高寒草地土壤理化指标分析. 草地学报, 2009, 17(5): 621-628.
- [31] 张向茹, 马露莎, 陈亚南, 杨佳佳, 安韶山. 黄土高原不同纬度下刺槐林土壤生态化学计量学特征研究. 土壤学报, 2013, 50(4): 818-825.
- [32] 丁访军, 潘忠松, 周凤娇, 吴鹏. 黔中喀斯特地区 3 种林型土壤有机碳含量及垂直分布特征. 水土保持学报, 2012, 26(1): 161-164, 169-169.
- [33] 苏纪帅, 程积民, 高阳, 仇智虎, 曹怀清. 宁夏大罗山 4 种主要植被类型的细根生物量. 应用生态学报, 2013, 24(3): 626-632.
- [34] Vázquez-Murrieta M S, Migueles-Garduño I, Franco-Hernández O, Govaerts B, Dendooven L. C and N mineralization and microbial biomass in heavy-metal contaminated soil. European Journal of Soil Biology, 2006, 42(2): 89-98.
- [35] 刘晓敏, 车克钧, 车宗玺, 张富, 张学龙. 祁连山青海云杉分布带土壤的空间变异性研究. 甘肃农业大学学报, 2011, 46(6): 86-92, 98-98.
- [36] McCormack M L, Guo D L. Impacts of environmental factors on fine root lifespan. Frontiers in Plant Science, 2014, 5: 205.
- [37] Liu C, Xiang W H, Lei P F, Deng X W, Tian D L, Fang X, Peng C H. Standing fine root mass and production in four Chinese subtropical forests along a succession and species diversity gradient. Plant and Soil, 2014, 376(1-2): 445-459.
- [38] Püttsepp Ü, Lohmus K, Persson H A, Ahlström K. Fine-root distribution and morphology in an acidic Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) stand in SW Sweden in relation to granulated wood ash application. Forest Ecology and Management, 2006, 221(1-3): 291-298.
- [39] Cormier N, Twilley R R, Ewel K C, Krauss K W. Fine root productivity varies along nitrogen and phosphorus gradients in high-rainfall mangrove forests of Micronesia. Hydrobiologia, 2015, 750(1): 69-87.
- [40] 杨丽韞, 罗天祥, 吴松涛. 长白山原始阔叶红松 (*Pinus koraiensis*) 林及其次生林细根生物量与垂直分布特征. 生态学报, 2007, 27(9): 3609-3617.
- [41] Hansson K, Helmisaari H S, Sah S P, Lange H. Fine root production and turnover of tree and understorey vegetation in Scots pine, silver birch and Norway spruce stands in SW Sweden. Forest Ecology and Management, 2013, 309: 58-65.
- [42] 秦娟, 唐心红, 杨雪梅. 马尾松不同林型对土壤理化性质的影响. 生态环境学报, 2013, 22(4): 598-604.
- [43] 庞圣江, 张培, 贾宏炎, 杨保国, 邓硕坤, 冯昌林, 王庆灵. 桂西北不同森林类型土壤生态化学计量特征. 中国农学通报, 2015, 31(1): 17-23.
- [44] 陈金林, 许新健, 姜志林, 张武兆, 张井义, 贾永正. 空青山次生栎林细根周转. 南京林业大学学报, 1999, 23(1): 6-10.
- [45] Richter D D, Markewitz D, Trumbore S E, Wells C G. Rapid accumulation and turnover of soil carbon in are-establishing forest. Nature, 1999, 400(6739): 56-58.
- [46] Vogt K A, Grier C C, Vogt D J. Production, turnover, and nutrient dynamics of above-and belowground detritus of world forests. Advances in Ecological Research, 1986, 15: 303-377.