

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.03.029.

徐莹, 邓磊. 祁连山不同混交度青海云杉林细根形态特征及与土壤理化性质的关系[J]. 水土保持研究, 2023, 30(3): 181-187.

XU Ying, DENG Lei. Relationships of Fine Root Morphology and Soil Physicochemical Properties in Different Mingling Intensity of *Picea crassifolia* in Qilian Mountains [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(3): 181-187.

祁连山不同混交度青海云杉林细根形态特征及与土壤理化性质的关系

徐莹^{1,2}, 邓磊^{1,2}

(1.青海大学 农林科学院, 西宁 810016; 2.国家林业和草原局贵南荒漠生态系统定位观测研究站, 青海 贵南 813100)

摘要: [目的]揭示祁连山青海云杉中龄林细根分布与土壤环境的互作关系,明晰不同混交度下土壤养分对细根发育的贡献因子,为祁连山天然林抚育经营提供理论依据。[方法]采用根钻法对混交度为0,0.2,0.4,0.6的青海云杉中龄林进行细根取样,揭示不同土层细根形态特征,剖析了与土壤理化性质的关系。[结果]细根生物量集中分布在0—20 cm土层,0—20 cm的土层细根生物量密度、根长密度、根表面积密度、比根长、比表面积显著高于20—40 cm土层($p<0.05$),混交度0.4的林分各土层细根形态指标最大。4种混交度林分各土层中全氮含量、全磷含量、速效钾含量、有机质含量随土层深度的增加呈降低趋势,且各土层均以混交度0.4为最高。细根的总生物量密度、根长密度、根表面积密度、比根长、比表面积与0—40 cm土层中土壤全氮、全磷、碱解氮、速效磷、有机质、速效钾含量呈正相关,与全钾呈负相关关系。[结论]细根生物量密度变化主要受土壤全氮含量的影响,混交度0.4的青海云杉中龄林有较强的细根贡献和较好土壤肥力,更有利于群落稳定效益的发挥。

关键词: 混交度; 云杉群落; 细根形态特征; 土壤理化性质

中图分类号: S714

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)03-0181-07

Relationships of Fine Root Morphology and Soil Physicochemical Properties in Different Mingling Intensity of *Picea crassifolia* in Qilian Mountains

XU Ying^{1,2}, DENG Lei^{1,2}

(1.Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Qinghai University, Xining, Qinghai 810016, China; 2.Qinghai Guinan Desert Ecosystem Positioning Observation and Research Station, National Forestry and Grassland Administration, Guinan, Qinghai 813100, China)

Abstract: [Objective] The interaction between fine root distribution and soil environment of middle-aged *Picea crassifolia* forests was revealed, and the contribution factors of soil nutrients to fine root development under different mingling intensity were clarified in order to provide theoretical basis for the rehabilitation and management of natural forests in Qilian Mountains. [Methods] The root samples were collected in *P. crassifolia* middle-aged forests with different mingling intensities (0, 0.2, 0.4, and 0.6) by using soil coring method. The relations between root parameters (fine root biomass density, specific root length, specific root surface area, root surface area density and root length density) and soil properties (soil total nitrogen, total phosphorus, alkali-hydrolyzable nitrogen, available phosphorous, available potassium and organic matter) were analyzed. [Results] The fine root biomass was concentrated in the upper 0—20 cm soil layer, and

收稿日期: 2022-01-02

修回日期: 2022-03-24

资助项目: 青海省自然科学基金“三江源区荒漠植被林恢复过程中林木根系互作机制”(2020-ZJ-945Q); 青海省重点研发与转化计划—青海共和盆地基于林分稳定和功能保障的沙化土地防护林评价和示范(2022-NK-168); 2020年林业和草原科技推广示范项目“三江源区沙化土地人工植被结构改善与功能提升技术和示范”(青〔2020〕TG14)

第一作者: 徐莹(1996—), 女, 新疆博乐人, 硕士, 研究方向: 高寒地区森林生态恢复机理研究。E-mail: 1520372831@qq.com

通信作者: 邓磊(1984—), 男, 陕西杨凌人, 博士, 副研究员, 主要从事高寒地区森林生态恢复机理研究。E-mail: pebbledeng@sina.com

<http://stbcj.paperonce.org>

decreased with soil depth. Values of fine root biomass density, root length density, root surface area density, specific root length, and specific root surface area in the soil layer of 0—20 cm were significantly higher than those in 20—40 cm soil layer ($p < 0.05$). The fine root morphology indices of each soil layer of *P. crassifolia* forest were all peaked in the mingling of 0.4. Total nitrogen, total phosphorus, available potassium and organic matter in each soil layer decreased with the increase of soil depth, while they peaked at the mingling of 0.4. In the soil layer of 0—40 cm, there were the positive correlations between indices of fine root biomass density, root length density, root surface area density, specific root length, and specific root surface area and soil properties such as total nitrogen, total phosphorus, alkali-hydrolyzable nitrogen, available phosphorous, organic matter, available potassium. [Conclusion] The change of fine root biomass density is mainly affected by the total nitrogen content, mixed *P. crassifolia* forest with mingling intensity of 0.4 has remarkable fine root contribution and better soil fertility, which is more conducive to the development of community stability benefits.

Keywords: mingling; spruce community; fine root morphological characteristics; soil physical and chemical properties

森林空间结构决定了林分的稳定性,混交度作为研究森林空间结构的关键因子,反映了树种相互隔离的程度。树种隔离程度较低,其分布格局就相对简单,林分稳定性差,不利于森林健康持续发展,因此合理的混交度是决定森林稳定性的关键所在^[1]。

细根(直径 ≤ 2 mm)能直接吸收土壤中水分和养分,其作为森林生态系统重要组成部分,为土壤提供碳源,直接影响森林生态系统物质循环与能量流动^[2]。研究表明,细根形态特征受树木水分养分、土壤环境调控的影响^[3-4]。目前对细根的研究主要围绕不同土壤因子对细根空间分布格局及不同树种细根分布与土壤理化性质的关系等方面^[5-6]。但是对树种不同混交度对细根分布的影响及其与土壤理化性质关系等方面的研究较少。

青海云杉(*Picea crassifolia*)是祁连山地带性植被建群种,对区域水土保持和水源涵养起十分关键的作用^[7],在生态建设及森林生态系统恢复等方面中发挥着重要的作用^[8]。以往青海祁连山地区植被建设忽视种间作用,导致林分结构单一,生长不良和更新不足等问题。对青海云杉细根的研究主要集中在不同环境因子下细根形态特征变化规律^[9],不同地区云杉细根生长分布特征及与土壤理化性质的关系等方面^[6]。对白桦细根的研究主要集中在白桦细根生物量分布特征及对季节变化的响应^[10],白桦细根功能状况在不同深度土层下的垂直分布差异等方面^[11]。但对于不同混交度影响下细根变异性鲜有报道。鉴于此,本研究在青藏高原祁连山中段选取混交度分别为0,0.2,0.4,0.6的青海云杉天然中龄林样地,采用根钻法对不同混交度的青海云杉中龄林进行细根取样,研究在不同混交度下细根分布特征及其土壤理化

性质的关系,以期为当地的生态经营和森林恢复提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于青海省西宁市大通县东北部东峡林场,该林场位于东经 $101^{\circ}29'09''$ — $101^{\circ}29'47''$ 、北纬 $37^{\circ}00'23''$ — $37^{\circ}01'29''$ 。该地区是青藏高原与黄土高原过渡区,属温凉半湿润气候,年均气温 2.9°C , $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 的年积温 900°C ,无霜期100 d左右,年均降水量450~820 mm,降雨集中在7—9月,年蒸发量1 100 mm。植物种类丰富,优势树种为青海云杉(*P. crassifolia*)、白桦(*Betula platyphylla*)、山生柳(*Salix oritrepha*)、银露梅(*Potentilla glabra*)等。林区土壤具有明显的垂直地带性特点,林区土壤主要是以山地褐色针叶林土为主^[12]。

1.2 样地设置和调查

2020年8月,在青海省西宁市大通县东峡林场,选择生长较好且林龄相近的青海云杉天然次生林布设样地,该地区海拔为2 650~2 694 m、西偏北 30° ~ 35° 、下坡,林内青海云杉多形成纯林或与白桦混交,云杉为扩展种群,白桦为退出种群^[8],选取4个混交度分别为10云杉(混交度0);8云杉+2白桦(混交度0.2);6云杉+4白桦(混交度0.4);4云杉+6白桦(混交度0.6),各林分设置3块样地(20 m \times 20 m),每块样地各设置3个样点,共完成样地12块。每块样地利用GPS定位,每木检尺后,调查样地中土壤类型。利用生长锥对样地内胸径大于平均值的10株青海云杉和白桦进行树芯钻取取样来确定林龄,青海云杉树龄78~80 a,白桦树龄50~52 a。将同一混交度样地数据合并,样地概况见表1。

表 1 样地基本情况

林分类型	林分密度/ (棵·hm ⁻²)	平均 胸径/cm	平均 树高/m	郁闭度	0—40 cm 土层 土壤水分/%	0—40 cm 土层 土壤温度/℃	0—40 cm 土层 土壤 pH 值
纯林	743±37a	31.68±2.48a	31.34±0.26a	0.83±0.04a	24.13±1.69a	11.68±1.76a	5.45±0.31a
混交度 0.2	933±43b	23.88±2.46b	26.46±0.33b	0.68±0.08a	25.78±1.54a	11.54±1.43a	5.74±0.45b
混交度 0.4	1198±54c	21.36±1.27c	22.41±0.48c	0.79±0.15a	27.33±2.21a	11.85±1.79a	6.32±0.24c
混交度 0.6	968±65d	19.47±1.31c	24.67±0.23c	0.58±0.20b	16.75±2.43b	13.97±2.65b	6.58±0.43d

注:同行不同小写字母表示差异显著($p<0.05$)。

1.3 混交度的计算方法

树种混交度 M 为参照树的最近相邻木中与参照树不为同种的个体所占的比例,其值在纯林为 0,在完全混交林为 1^[8]。计算方法如下^[13]:

$$M=(1/N)\sum((1/n)\sum V_{ij})$$

式中: N 为样地内乔木株树; n 为目标树最近乔木株树; V_{ij} 是目标树与周围乔木的树种差异比较结果,不同记为 1,相同记为 0。

1.4 细根的采集与处理

青海云杉属于浅根系树种,根系主要分布在 0—40 cm 土层中,根据前期预试验,0—40 cm 土层深度满足试验要求^[12,14]。采用根钻法(直径 9 cm,高度 20 cm 的圆柱体)对每块样地都采集根系样品,去除样地中地表的枯落物及杂物,分别采集土层为 0—10 cm,10—20 cm,20—30 cm,30—40 cm 的土柱各 1 个,将根系样品用塑料袋分装,利用手持放大镜根据云杉和白桦根系外形、气味、颜色等的不同辨别并挑选,用编号塑料袋分装带回实验室,将样品过 0.2 mm 筛内,用流动的水冲洗并浸泡,除去根系表面的杂土、植物残渣,并将死根分离挑选出来,处理好的根系放入自封袋中,在 4℃ 下进行保存。用根系扫描分析系统(WinRHIZO),分析不同径级细根的长度(cm)和体积(cm³),然后在 80℃ 烘箱中烘干至恒重,称干质量及统计细根生物量(g)。计算细根根长密度(FRBD)公式:根长密度(FRBD)=细根总长度(FRL)/土柱体积(SCV)。单位细根体积(FRV)计算公式:单位细根体积(FRV)=细根总体积(TFRV)/土柱体积(SCV)。细根生物量密度(FRBD)计算公式:细根生物量密度(FRBD)=细根生物量(FRB)/土柱体积(SCV)。细根比根长(FSRL)计算公式:细根比根长(FSRL)=细根总长度(FRL)/细根生物量(FRB)^[6,8]。

1.5 土壤样品的采集和测定

采集样根的同时,分别将各层的土壤均匀混合,利用四分法取得 500~800 g 土样,分为两份装袋并写明编号,一份用于测定土壤的全氮、全磷、全钾、碱解氮、速效磷、速效钾,在低温(4℃)下保存,另一份用

于测定土壤有机质的含量,在风干研磨后过 1 mm 筛内,用环刀(100 cm³)在同一样点采集土壤剖面,0—10 cm,10—20 cm,20—30 cm,30—40 cm 的原状土,测定各土层的土壤密度,土壤碱解氮含量利用碱解扩散法,土壤速效磷含量利用 Olsen 法检测,碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法测定土壤速效钾,重铬酸钾容量法测定土壤有机质,电位滴定法测定土壤 pH,烘干法测定土壤含水量,土壤全氮用浓磷酸消解—半自动定氮仪测定,用高氯酸—浓磷酸消解测定土壤全磷,用热硝酸浸提—火焰光度计测定土壤全钾^[15-16]。

1.6 数据分析

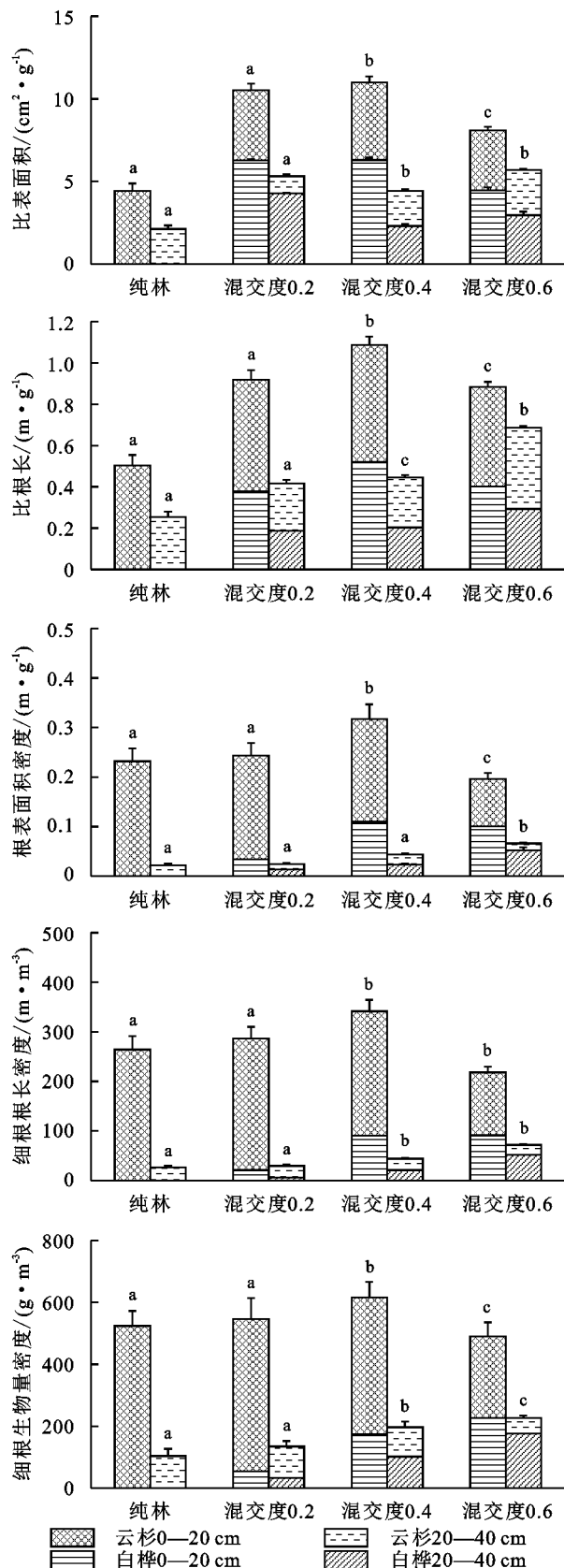
采用 Microsoft Excel 2019 进行数据整理,用 Origin 2018 软件进行根系形态指标的图形处理,SPSS 26.0 软件进行不同混交度下细根形态特征与土壤理化性质的相关性分析、土壤理化性质的主成分分析、回归分析、通径分析和单因素方差分析(One-way ANOVA),并结合 Duncan 新复极差法比较其差异性。

2 结果与分析

2.1 不同深度细根分布特征

由图 1 可知,随着混交度的增加,青海云杉中龄林细根生物量密度呈现先增加后减少的趋势,混交度为 0.4 的细根生物量密度最高(813.05 g/m³),0—20 cm 土层细根生物量密度(616.26 g/m³)>20—40 cm 土层(196.79 g/m³)($p<0.05$)。4 种混交度青海云杉中龄林在 20—40 cm 土层的细根生物量密度分别是 0—20 cm 土层的 20%,25%,32%,46%;同一混交度,青海云杉中龄林不同土层细根根长密度、根表面积密度、比根长、比表面积在相同混交度中也有差异,表现为 0—20 cm>20—40 cm 土层;随着混交度的增大,青海云杉中龄林细根根长密度、根表面积密度、比根长、比表面积均随着混交度的增大呈先增加后减少的趋势,混交度 0.4 的青海云杉中龄林比根长(1.081 m/g)、比表面积(10.415 cm²/g)、根表面积密度(0.328 m/g)、细根根长密度(345.032 m/m³)最大;云杉纯林细根比表面积(4.431 cm²/g)、比根长(0.504 m/g)最低;混交度 0.6 的细根根表面积密度

(0.196 m/g)和根长密度(218.126 m/m³)最低。



注:不同小写字母表示差异显著($p < 0.05$)。

图1 混交度对青海云杉林细根形态特征的影响

2.2 土壤基本理化性质

由表2可知,4种混交度林分各土层中全氮含

量、全磷含量、碱解氮含量、速效钾含量、有机质含量随土层深度的增加呈降低趋势。0—20 cm土层中土壤的全氮、全磷、碱解氮、速效钾、速效磷、有机质含量以混交度0.4为最大,20—40 cm土层中全钾含量以云杉纯林为最大;20—40 cm土层中全氮、全磷、速效钾、有机质含量均以混交度0.4为最大,土壤中全钾含量、速效磷含量以混交度0.6为最大,碱解氮含量以混交度0.2为最大。

2.3 细根分布特征与土壤理化性质

由表3,表4可知,白桦、云杉细根总生物量密度、根长密度、根表面积密度、比根长、比表面积与0—40 cm土层中土壤全氮、全磷、碱解氮、速效磷、速效钾、有机质呈正相关。白桦细根表面积密度、比根长与土壤全磷、速效钾、有机质含量呈显著正相关($p < 0.05$)(r 值分别为0.781,0.736,0.719,0.775,0.720,0.765);与土壤中全钾含量呈负相关关系(r 值分别为-0.012,-0.227,-0.339,-0.534,-0.719)。土壤全氮与云杉细根根长密度、根表面积密度、比根长、比表面积呈极显著正相关($p < 0.01$)(r 值分别为0.859,0.845,0.876,0.866);土壤碱解氮与云杉细根总生物量密度、根长密度、根表面积密度呈极显著正相关(r 值分别为0.843,0.857,0.837);云杉细根形态指标与土壤中速效磷含量(r 值分别为0.759,0.793,0.814,0.764,0.796)、速效钾含量(r 值分别为0.735,0.781,0.758,0.816,0.801)呈显著正相关;与土壤中全钾含量呈负相关(r 值分别为-0.549,-0.568,-0.511,-0.486,-0.398)。

对影响细根形态特征的土壤理化性质进行主成分分析,第一主成分累计贡献率为70.69%,第一主成分各因子的表现为全氮(0.985) > 速效钾(0.979) > 全磷(0.967) > 碱解氮(0.945) > 有机质(0.937) > 速效磷(0.828) > 全钾(-0.605),可用这些指标代表第一主成分。

以细根生物量密度为因变量 Y ,以第一主成分中的7个土壤因子(全氮、全磷、全钾、碱解氮、速效磷、速效钾、有机质含量)为自变量,进行逐步回归分析,土壤中的全氮含量 X_1 ,有机质含量 X_2 ,全磷含量 X_3 筛选进入线性回归分析: $Y = -1.554 + 1.211X_1 - 0.896X_2 + 0.578X_3$ ($R = 0.997$),结果表明,所提取的土壤因子能较好地解释细根生物量密度。

通径分析结果表明(表5),土壤中全氮、有机质、全磷对细根总生物量密度的直接和间接效益。相关系数表现为全氮 > 全磷 > 有机质且都表现为正效应。直接通径系数表现为全氮 > 全磷 > 有机质,其中全氮的含量数值最大。间接通径系数表现为有机质 > 全磷 > 全氮,其中土壤有机质含量为正效应且值最大。

表 2 4 种林分土壤理化性质

森林类型	土层深度/cm	全氮/(g·kg ⁻¹)	全磷/(g·kg ⁻¹)	全钾/(g·kg ⁻¹)	碱解氮/(mg·kg ⁻¹)	速效磷/(mg·kg ⁻¹)	速效钾/(mg·kg ⁻¹)	有机质/(g·kg ⁻¹)	pH
云杉纯林	0—20	6.55±0.19a	2.39±0.07a	23.78±0.26a	192±0.05a	4.40±0.16a	103.50±0.15a	96.71±2.09a	7.59
	20—40	2.04±0.15b	1.13±0.08b	22.35±0.19b	84±0.14b	1.20±0.26b	50.00±0.14b	39.43±1.56b	7.49
混交度 0.2	0—20	7.96±0.23a	2.63±0.10a	18.61±0.25a	230±0.19a	3.15±0.12a	142.00±0.23a	127.06±2.26a	6.82
	20—40	3.34±0.17b	1.47±1.16b	21.88±0.18b	152±0.21b	1.90±0.19b	68.00±0.17b	72.97±2.19b	6.97
混交度 0.4	0—20	10.07±0.19a	4.20±0.06a	20.48±0.24a	281±0.18a	5.20±0.29a	179.00±0.17a	230.53±3.21a	6.91
	20—40	4.88±0.09b	1.63±0.6b	24.25±0.26b	130±0.07b	2.40±0.25b	100.00±0.13b	117.16±2.45b	7.25
混交度 0.6	0—20	6.20±1.16a	2.90±0.18a	21.46±0.19a	176±0.21a	2.10±0.22a	127.00±0.24a	109.83±2.12a	6.28
	20—40	4.18±1.12b	1.60±0.19b	24.72±0.26b	62±0.22b	2.75±0.26b	73.00±0.12b	81.69±2.07b	6.92

注:同一森林类型不同土层间不同小写字母表示差异显著($p<0.05$)。

表 3 白桦细根形态特征与土壤理化性质的相关性分析

指标	细根总生物量密度	根长密度	根表面积密度	比根长	比表面积	全氮	全磷	全钾	碱解氮	速效磷	速效钾	有机质
细根总生物量密度	1											
根长密度	0.941 **	1										
根表面积密度	0.906 **	0.991 **	1									
比根长	0.790 *	0.847 *	0.895 *	1								
比表面积	0.526	0.604	0.690	0.920 **	1							
全氮	0.381	0.566	0.633	0.697	0.638	1						
全磷	0.502	0.725 *	0.781 *	0.736 *	0.634	0.946 **	1					
全钾	-0.012	-0.227	-0.339	-0.534	-0.719 *	-0.535	-0.540	1				
碱解氮	0.120	0.370	0.470	0.554	0.626	0.904 **	0.882 **	-0.705	1			
速效磷	0.163	0.338	0.378	0.379	0.301	0.857 **	0.787 *	-0.169	0.735 *	1		
速效钾	0.470	0.649	0.719 *	0.775 *	0.707	0.977 **	0.955 **	-0.596	0.901 **	0.747 *	1	
有机质	0.488	0.657	0.720 *	0.765 *	0.671	0.916 **	0.913 **	-0.426	0.822 *	0.799 *	0.932 **	1

注:**表示 $p<0.01$; *表示 $p<0.05$ 。

表 4 云杉细根形态特征与土壤理化性质的相关性分析

指标	细根总生物量密度	根长密度	根表面积密度	比根长	比表面积	全氮	全磷	全钾	碱解氮	速效磷	速效钾	有机质
细根总生物量密度	1											
根长密度	0.994 **	1										
根表面积密度	0.994 **	0.997 **	1									
比根长	0.850 **	0.892 **	0.879 **	1								
比表面积	0.883 **	0.914 **	0.916 **	0.964 **	1							
全氮	0.815 *	0.859 **	0.845 **	0.876 **	0.866 **	1						
全磷	0.729 *	0.777 *	0.760 *	0.850 **	0.821 *	0.946 **	1					
全钾	-0.549	-0.568	-0.511	-0.486	-0.398	-0.535	-0.540	1				
碱解氮	0.843 **	0.857 **	0.837 **	0.726 *	0.711 *	0.904 **	0.882 **	-0.705	1			
速效磷	0.759 *	0.793 *	0.814 *	0.764 *	0.796 *	0.857 **	0.787 *	-0.169	0.735 *	1		
速效钾	0.735 *	0.781 *	0.758 *	0.816 *	0.801 *	0.977 **	0.955 **	-0.596	0.901 **	0.747 *	1	
有机质	0.561	0.621	0.608	0.660	0.658	0.916 **	0.913 **	-0.426	0.822 *	0.799 *	0.932 **	1

注:**表示 $p<0.01$; *表示 $p<0.05$ 。

表5 土壤理化性质对细根生物量密度的通径分析

作用因子	相关系数	直接通径系数 $\rightarrow y$	间接通径系数总和 $\rightarrow X \rightarrow y$	间接通径系数 $\rightarrow y \rightarrow X_2 \rightarrow y \rightarrow X_3 \rightarrow y$	间接通径系数 $\rightarrow X_1$
全氮	0.937	1.211	-0.274	-0.821	0.547
有机质	0.740	-0.896	1.637	1.109	0.528
全磷	0.906	0.578	0.328	1.146	-0.818

注: y 为细根生物量密度。

3 讨论

3.1 不同深度细根分布特征

细根形态对土壤养分和水分的运输具有重要影响^[17]。4种混交度的青海云杉中龄林细根生物量密度、根长密度、根表面积密度、比根长、比表面积随着混交度增大呈先增大后减少的趋势,以混交度0.4为最大。这与邓磊等^[8]研究0.4左右的混交度能显著增加细根形态指标的结果一致。说明通过控制混交度的大小进而影响细根形态特征对森林生态系统水分养分的吸收具有重要作用。不同混交度的青海云杉中龄林在0—20 cm土层具有最高的细根生物量密度、根长密度、根表面积密度、比根长和比表面积。这与黄林等^[18]研究各种森林类型的细根形态特征随土层深度的增加呈递减趋势的结果一致。由于森林枯落物分解可以为土壤提供大量养分,使土壤表层水分、养分含量相对较大,能为细根生长提供更好的环境条件,从而使林木细根分布更集中于表层土壤^[19]。不同深度土层间细根的功能存在差异。浅土层中细根同时吸收水分和养分,随着土层深度的增加细根对水分含量有更明显的响应。云杉纯林各土层细根生物量密度、比根长、比表面积及细根根长密度最低;混交度0.4的青海云杉中龄林细根形态指标最大,这与尤健健等^[20]研究适宜的郁闭度使黄龙山油松中龄林细根形态特征最佳的结论一致。说明细根生长过程不仅受土壤环境的影响,也与林分结构有关^[6,21]。

3.2 土壤理化性质

各林分0—20 cm土层中全氮含量、全磷含量、碱解氮含量、速效钾、有机质含量高于20—40 cm土层中的含量且以混交度0.4为最大。不同混交度的林分土壤中全氮含量、速效钾含量、有机质含量随土层深度的增加而降低,这与魏孝荣等^[22]对黄土高原丘陵区小流域坡地土壤养分含量随土层深度增加呈降低趋势的研究结果一致。土壤表层枯落物的分解及根系新陈代谢的共同作用,使土壤肥力增加,因此土壤表层的养分含量最高。

3.3 细根分布特征与土壤理化性质的关系

土壤养分含量会直接影响细根形态分布^[23]。云杉、白桦细根各指标与土壤中全氮、速效磷、碱解氮、有机质、速效钾含量呈正相关。这与邸楠等^[24]研究

土壤养分含量影响白毛杨细根的垂直分布结果相似。细根是植物体与土壤进行物质循环的媒介^[19],由此说明林木细根分布与形态特征和土壤中氮、磷、钾含量密切相关。而与土壤中全钾含量呈负相关,可能与土壤母质及植物养分循环有关^[25],适量的全钾有助于细根的生长发育,反之则抑制细根的生长发育。主成分分析表明,土壤的理化性质与树木细根的形态分布呈显著相关性,这与Pregitzer^[26]、祝乐^[6]等研究细根生长受土壤养分影响较大的结果相似。通径分析表明,土壤中全氮的含量对细根生物量密度的直接正效应最高,说明全氮是影响细根分布的重要影响因素,张雷等^[27]研究发现土层含氮量较高时杉木具有较高的细根生物量和根表面积密度,但对细根比根长无明显影响。全氮在一定程度上决定着青海云杉林细根的空间分布及形态特征还需要进一步的研究。

4 结论

4种混交度青海云杉中龄林的各细根指标均随着土层深度的增加而降低,细根主要分布在0—20 cm土层中,混交度在0.4时0—20 cm土层的细根生物量密度、根长密度、根表面积密度、比根长和比表面积最高。土壤全氮的含量对细根生物量密度的影响最大。在对祁连山地区进行生态治理和森林恢复过程中,因考虑到细根特性及生长状况,混交度控制在0.4的青海云杉中龄林的细根形态更有利于群落稳定效益的发挥。

参考文献:

- [1] 杜秀芳,汤孟平,酆青,等.临安不同森林类型混交度的对比研究[J].西南林业大学学报,2019,39(3):101-108.
- [2] 张成富,何腾兵,杨威,等.高原山地丘陵区马尾松近成熟林和成熟林细根的垂直分布特征[J].福建农林大学学报,2020,49(6):789-795.
- [3] 师伟,王政权,刘金梁,等.帽儿山天然次生林20个阔叶树种细根形态[J].植物生态学报,2008,32(6):1217-1226.
- [4] 王芳芳,郭素娟,廖逸宁,等.土壤环境调控对板栗细根形态和产量的影响[J].果树学报,2021,38(7):1123-1135.
- [5] 梅莉,王政权,韩有志,等.水曲柳根系生物量、比根长和根比密度的分布格局[J].应用生态学报,2006,17(1):1-4.
- [6] 祝乐,许晨阳,耿增超,等.秦岭3种天然林细根分布特征及其与土壤理化性质的关系[J].林业科学,2020,56(2):24-31.
- [7] 王彬,于澎涛,于艺鹏,等.祁连山不同年龄青海云杉径向生长对气候变化的响应[J].林业科学,2021,57(3):1-8.
- [8] 邓磊,朱春云,于世川,等.祁连山青海云杉中龄林混交度对细根形态特征的影响[J].林业科学,2020,56(1):191-200.
- [9] 苏宇,吴世磊,贺维,等.弓杠岭不同海拔云杉细根生物量及形态特征[J].西北植物学报,2022,42(1):138-144.
- [10] 楚旭,邸雪颖,张吉利,等.大兴安岭两种林分细根生物量分布特征及季节动态[J].东北林业大学学报,2011,

- 39(5):36-39.
- [11] 胡慧,包维楷,李芳兰,等.岷江上游4个栽培树种细根功能性状垂直分布的差异[J].生态学报,2020,39(1):46-56.
- [12] 《青海森林》编辑委员会.青海森林[M].北京:中国林业出版社,1993.
- [13] 惠刚盈,胡艳波.混交林树种空间隔离程度表达方式的研究[J].林业科学研究,2001,14(1):23-27.
- [14] 杨文娟.祁连山青海云杉林空间分布和结构特征及蒸散研究[D].北京:中国林业科学研究院,2018.
- [15] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000.
- [16] 王梅,张文辉.不同密度油松人工林生长更新状况及群落结构[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2009,37(7):75-80.
- [17] 洪梓明,邢亚娟,闫国永,等.长白山白桦山杨次生林细根形态特征和解剖结构对氮沉降的响应[J].生态学报,2020,40(2):608-620.
- [18] 黄林,王峰,周立江,等.不同森林类型根系分布于土壤性质的关系[J].生态学报,2012,32(19):6110-6119.
- [19] 安慧,韦兰英,刘勇,等.黄土丘陵区油松人工林和白桦天然林细根垂直分布及其与土壤养分的关系[J].植物营养与肥料学报,2007,13(4):611-619.
- [20] 尤健健,张文辉,邓磊,等.间伐对黄龙山油松中龄林细根空间分布和形态特征的影响[J].生态学报,2017,37(9):3065-3073.
- [21] Vennetier M, Zanetti C, Meriaux P, et al. Tree root architecture: new insights from a comprehensive study on dikes[J]. Plant & Soil, 2015, 387(1/2): 81-101.
- [22] 魏孝荣,邵明安.黄土高原沟壑区小流域坡地土壤养分分布特征[J].生态学报,2007,27(2):603-612.
- [23] 郭灵辉,王道杰,张云红,等.蒋家沟新银合欢人工林土壤养分分布及其与细根的关系[J].中国水土保持,2010(12):46-49.
- [24] 邸楠,席本野, Jeremiah R. PINTO, 等.宽窄行栽植下三倍体毛白杨根系生物量分布及其对土壤养分因子的响应[J].植物生态学报,2013,37(10):961-971.
- [25] 燕辉,苏印泉,李吉平,等.秦岭北坡刺槐人工林细根垂直分布及其与土壤养分的关系[J].水土保持研究,2008,15(3):65-73.
- [26] Pregitzer K S, King J S, Burton A J, et al. Responses of tree fine roots to temperature[J]. The New Phytologist, 2000, 147(1): 105-115.
- [27] 张雷,项文化,田大伦,等.第2代杉木林土壤有机碳、全氮对细根分布及形态特征的影响[J].中南林业科技大学学报,2009,29(3):11-15.

(上接第172页)

- [9] 马扶林,李全平,高贵生.2018年青海湖东北岸气象因素影响下的草地土壤水分及植被特征响应[J].草原与农业,2019,31(3):32-37.
- [10] 颜送宝,王丽云,邹璐,等.青藏高原草地不同利用方式下土壤碳氮与土壤性状的关系[J].生态科学,2019,38(2):105-111.
- [11] 石培宏,杨太保,田庆春,等.靖远黄土—古土壤色度变化特征分析及古气候意义[J].兰州大学学报:自然科学版,2012,48(2):15-23.
- [12] 陈杰,杨太保,曾彪,等.中国帕米尔地区黄土上部色度变化特征及古气候意义[J].沉积学报,2018,36(2):333-342.
- [13] 卢演涛,刘高魁,彭文世.黄土中(微斜长石)/(石英)、(方解石)/(石英)及其古环境的意义[J].地球化学,1982,11(2):198-204.

(上接第180页)

- [35] Wang Y, Hu W, Zhu Y, et al. Vertical distribution and temporal stability of soil water in 21-m profiles under different land uses on the Loess Plateau in China [J]. Journal of Hydrology, 2015, 527: 543-554.
- [36] Li H, Si B, Ma X, et al. Deep soil water extraction by apple sequesters organic carbon via root biomass rather than altering soil organic carbon content[J]. Science of the Total Environment, 2019, 670: 662-671.
- [37] Ji W, Huang Y, Shi P, et al. Recharge mechanism of deep soil water and the response to land use change in the loess deposits [J]. Journal of Hydrology, 2021, 592: 125817.
- [38] 冯挺,黄法融,郝建盛,等.巩乃斯河谷地带地表土壤水分和电导率的分布特征[J].干旱区研究,2020,37(6):1457-1468.
- [39] Turkeltaub T, Wang J, Cheng Q, et al. Soil moisture and electrical conductivity relationships under typical Loess Plateau land covers[J]. Vadose Zone Journal, 2022, 21(1): e20174.
- [40] Wang Y, Shao M A, Zhu Y, et al. Impacts of land use and plant characteristics on dried soil layers in different climatic regions on the Loess Plateau of China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2011, 151(4): 437-448.