

DOI: 10.5846/stxb201901250192

李爱琴, 张莎莎, 王会荣, 张丹丹, 赵晓雅, 关梦冉, 徐小牛. 杉木成熟林细根形态与功能特征的海拔梯度变异特点. 生态学报, 2020, 40(2): 719-727.

Li A Q, Zhang S S, Wang H R, Zhang D D, Zhao X Y, Guan M R, Xu X N. Fine root morphological characteristics and its functions in mature Chinese fir plantations along an elevation gradient in Dabie Mountains. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(2): 719-727.

杉木成熟林细根形态与功能特征的海拔梯度变异特点

李爱琴, 张莎莎, 王会荣, 张丹丹, 赵晓雅, 关梦冉, 徐小牛*

安徽农业大学林学与园林学院, 合肥 230036

摘要:为探究植物对环境变化的适应策略,在安徽省金寨县天马国家自然保护区,以不同海拔高度(750、850、1000、1150 m)杉木(*Cunninghamia lanceolata*)成熟林为对象,采用土钻法获取土壤细根样品,分别测定了不同海拔不同土层(0—10 cm、10—20 cm、20—30 cm)土壤细根生物量、形态特征参数和碳氮含量。结果表明:(1)随海拔梯度增加,0—30 cm 土层细根生物量、根长密度、比根长、表面积密度、体积密度均呈先减少后增加趋势,在海拔 750 m 生物量最大,其余指标在海拔 1150 m 最大;随土层深度增加,同一海拔细根生物量、根长密度、表面积密度、体积密度均呈减少趋势。(2)随海拔梯度增加,0—30 cm 土层细根 C 和 N 含量呈先增加后减少趋势,C/N 比呈先减少后增加再减少趋势;随土层深度增加,同一海拔细根 C 含量呈先减少后增加趋势,N 含量呈降低趋势,C/N 比呈上升趋势。(3)细根 N 含量与生物量、根长密度和体积密度显著正相关,C/N 比与生物量、根长密度、表面积密度和体积密度极显著负相关。(4)土壤水分对细根生物量及其形态指标影响显著。

关键词:杉木;海拔梯度;细根生物量;细根特征指标;土壤水分

Fine root morphological characteristics and its functions in mature Chinese fir plantations along an elevation gradient in Dabie Mountains

LI Aiqin, ZHANG Shasha, WANG Huirong, ZHANG Dandan, ZHAO Xiaoya, GUAN Mengran, XU Xiaoniu*

School of Forestry & Landscape of Architecture, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China

Abstract: In order to reveal the adaptation strategies of plants to environmental changes, the mature Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantations along an elevation gradient (750, 850, 1000 m, 1150 m a.s.l.) were selected in Tianma National Nature Reserve in Anhui Province. Their fine roots at different layers (0—10 cm, 10—20 cm, and 20—30 cm) were sampled to determine the biomass, characteristic parameters, C and N contents. The results showed that fine root biomass, length density, specific root length, surface area density, and volume density at 0—30 cm soil depth initially decreased and then increased with the increase in elevation. The fine root biomass peaked at 750 m, and the other indices showed the maximum values at 1150 m. Fine root biomass, length density, surface area density, and volume density decreased with soil depth at each elevation. The C and N contents of fine root at 0—30 cm soil depth initially increased and then decreased with the increase in elevation. While the C/N decreased at first, and increased later, but decreased again. The C contents of the fine roots decreased over the elevation gradient, however they decreased more in N content. This resulted in increase of C/N ratio. Fine root N content positively significant correlated with biomass, root length density, and volume density. However, C/N ratio negatively correlated with biomass, root length density, surface area density, and volume density. The soil moisture was positively significant correlation with fine roots biomass and its configuration.

Key Words: Chinese fir; elevation gradient; fine root biomass; fine-root characteristic index; soil moisture

基金项目:国家重点研发计划课题(2016YFD0600304);“973”计划课题(2012CB416905)

收稿日期:2019-01-25; 网络出版日期:2019-11-04

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xnxu2007@ahau.edu.cn

细根($d \leq 2 \text{ mm}$)是植物吸收水分和养分的主要器官,其快速生产和周转率对生态系统碳收支平衡、养分循环过程发挥着重要作用^[1-2]。细根也是植物对环境变化响应最敏感和最活跃的部分^[3],其形态参数和养分含量不仅影响细根生理生态特性^[4-5]、反映林地养分有效性^[6],还表达了植物生存环境的变化信息^[7]。在全球气候变化日益加剧的时代背景下,研究其性状指标对环境变化的适应机制有重要现实意义^[8]。

海拔梯度变化作为一种自然地理变化,影响着森林土壤理化性质^[9]、植被分布^[10]以及因植被密度不同导致的凋落物量变化^[11],为细根对环境的响应提供了合适的研究场所。近年来不少学者在海拔梯度上开展了研究,初步表明不同海拔植被细根生物量与性状指标有明显的垂直变化规律^[12-15]。同时土壤水分状况是海拔梯度上变化最明显的因子之一,土壤水分的多少成为细根生长的决定性因素^[16]。但受地理条件的限制,这些研究的对象集中于不同海拔的不同自然林群落,针对不同海拔梯度上同一植被类型的细根特征研究较少,对人工林细根在海拔上的响应研究更是鲜见报道。

杉木(*Cunninghamia lanceolata*)是中国南方集体林区重要的优质、速生、高产的用材树种,在我国人工林资源中占据重要地位^[17]。对杉木林细根在不同林龄^[18]、林分结构^[19-20]等方面的特征研究已有初步进展,但对其细根在海拔梯度上的变化规律尚不清晰。鉴于以上原因,对同一区域不同海拔同类植被被细根的研究,有助于了解细根沿海拔的变化状况。本文针对安徽大别山马鬃岭杉木人工林细根生物量、形态指标和碳氮含量的海拔梯度变异特点进行了探讨,目的为深入了解林木细根对环境变化的适应机制提供理论依据,为大别山区杉木林科学经营管理乃至揭示北亚热带地区杉木人工林生长规律及其生产力形成机制提供基础资料。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

本研究地位于安徽省金寨县西南天马国家自然保护区($31^{\circ}10'—31^{\circ}20'N$ 和 $115^{\circ}31'—115^{\circ}50'E$),总面积 34.7 km^2 ,试验区内群山林立、沟谷纵横、地形起伏较大, $30^{\circ}—40^{\circ}$ 陡坡较多。气候类型属亚热带湿润季风气候,四季分明,年均气温 $13—15^{\circ}\text{C}$,年均降水量约 1510 mm ,年蒸发量 1266 mm ,相对湿度 80% ,无霜期 210 d 。调查区岩层主要是寒武纪前的变质岩,成土母质主要来自花岗岩风化物,土壤质地为沙壤至轻粘壤土,偏酸性。土壤垂直分布规律为:海拔 800 m 以下为山地黄棕壤, 800 m 以上为山地棕壤, 1400 m 以上局部地区有山地草甸土和沼泽土存在^[21]。森林类型丰富,森林覆盖率达 94% ,植被分布垂直变化明显。区内主要树种有杉木、青冈栎(*Cyclobalanopsis glauca*)、黄山松(*Pinus tawanensis*)、马尾松(*Pinus massoniana*)、紫楠(*Phoebe shearer*)等。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置

根据研究区内杉木人工林生长和分布情况,选择 $26—35 \text{ a}$ 生的成熟林分,于 2018 年 7 月,按 750 m 、 850 m 、 1000 m 和 1150 m 四个海拔设置典型调查样地,每个海拔高度设置 3 个基本特征一致的重复样地,每个样地面积为 $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ 。不同海拔梯度样方内杉木成熟林基本情况见表 1。

表 1 杉木林调查样地基本情况

Table 1 Basic situation of sampling plots of Chinese fir plantations

海拔梯度 Elevation gradient/m	林分密度 Stand density/ (株/ hm^2)	平均胸径 Mean diameter at breast height/cm	平均树高 Mean height of tree/m	土壤含水率 Soil moisture/%	土壤 pH Soil pH
750	1129 ± 49	20.0 ± 1.58	13.5 ± 1.02	35.95 ± 0.61	4.64 ± 0.02
850	2216 ± 145	17.6 ± 0.63	12.5 ± 0.87	17.28 ± 2.63	5.07 ± 0.06
1000	1584 ± 129	17.5 ± 0.94	12.1 ± 0.24	32.16 ± 1.06	4.80 ± 0.04
1150	2150 ± 58	17.7 ± 2.03	11.6 ± 0.66	42.45 ± 4.03	4.70 ± 0.03

以上数据均为平均值 $\pm$ 标准误

1.2.2 样品采集与处理

根系样品:在每个样地内随机选取 9 个样点,将地表凋落物清理干净后,用内径 5.50 cm 的土钻按 0—10 cm、10—20 cm 和 20—30 cm 土层分层取样,放入自封袋中标记编号,用冰盒低温保存带回实验室。将带有根样的土芯放入低温(1—2 ℃)去离子水浸泡 1 d,随后用 60 目孔径的分样筛反复淘洗过滤,使根系与杂质和泥土分离。洗净后用镊子、游标卡尺等工具分拣出直径 ≤ 2 mm 的所有目标树种活根(根据根系外形、颜色、气味、根皮、弹性等区分),剔除草根。将获得的活根依次装入标记好的自封袋中放入冰箱保存待测。

土壤样品:在根系取样的同时,在每个样地随机选取 3 个点,每个点采用多点混合分层取样法,即:用土钻(内径为 3 cm)按 0—10 cm、10—20 cm 和 20—30 cm 土层取样,放入自封袋中标记编号,共计 108 份土壤样品,与根系一同带回实验室待测。

1.2.3 细根样品指标测定

将获得的样品用 Microtek 数字扫描仪(MRS-600A3LED)进行扫描,保存其扫描图像,用配套根系分析系统 WinRhizo 进行分析得到平均直径、根长、表面积、体积等指标。待所有根系扫描完成后将根样装入信封标记,于 65 ℃烘箱烘干至恒重(72 h),测定各样品生物量(mg/cm^3)。经研磨机粉碎后使用元素分析仪(EA3000 CNHSO Analysis, Euro Vector)测定全碳(C),全氮(N)。将各根样长度、表面积、体积分别除以取样土体体积计算出根长密度(cm/cm^3)、表面积密度(cm^2/cm^3)、体积密度(mm^3/cm^3)等细根特征指标;将各根样细根长度除以其生物量得到各根样的比根长(m/g)。

1.2.4 土壤含水测定

采用烘干法即在 105 ℃条件下烘干至恒重测定土壤含水率,计算公式为:土壤含水率($\text{SWC}, \%$)=(鲜土质量-干土质量)/鲜土质量 $\times 100\%$ 。

1.3 数据处理

采用双因素方差分析法分析不同海拔梯度和土壤深度对细根形态和养分含量的影响,并用 Duncan 多重比较进行差异显著性检验;采用皮尔逊(Pearson)相关分析进行细根各指标间相关性检验;取每个样地内的细根特征指标和土壤含水的平均值,采用回归分析研究细根各指标与土壤含水率的相关关系。所有数据处理、绘图、统计分析在 Excel 2016 和 SPSS 20.0 中完成。

2 结果与分析

2.1 不同海拔细根生物量与形态指标特征

随海拔梯度增加,0—30 cm 土层杉木细根的平均生物量、平均根长密度、平均比根长、平均表面积密度、平均体积密度均呈先减少后增加的变化趋势(图 1)。双因素方差分析表明(表 2),海拔对细根根长密度和表面积密度有极显著影响($P<0.01$),对体积密度有显著影响($P<0.05$),对生物量和比根长无显著影响($P>0.05$);土层对细根比根长无显著影响($P>0.05$),对其余形态指标均有极显著影响($P<0.01$);海拔与土层的交互作用只对细根表面积密度有显著影响($P<0.05$),对细根生物量、根长密度、比根长、体积密度均无显著影响($P>0.05$)。

2.1.1 生物量

同一土层不同海拔细根生物量存在差异,0—10 cm 和 10—20 cm 土层细根生物量均为海拔 850 m<1000 m<1150 m<750 m(图 1),20—30 cm 土层细根生物量为海拔 1000 m<850 m<1150 m<750 m。同一海拔不同土层的细根生物量随土层深度增加表现出减少趋势。各海拔土层间差异性水平不同,其中,海拔 1000 m 处,三个土层间差异显著($P<0.05$),海拔 1150 m 处,0—10 cm 土层与 20—30 cm 土层差异显著($P<0.05$)。20—30 cm 土层间细根生物量在 0—30 cm 土层细根总生物量中贡献最小,在 750、850、1000、1150 m 处分别仅占 0—30 cm 细根总生物量的 18.5%、20.9%、16.8%、17.0%。

表2 海拔梯度和土壤层次对细根生物量、形态特征、C、N 含量影响的方差分析

Table 2 ANOVA results for the effects of elevational gradient and soil layer on fine root biomass, morphology and C, N contents

变异来源 Source of various	生物量 Biomass	根长密度 Root length density	比根长 Specific root length	表面积密度 Surface area density	体积密度 Volume density	C 含量 C content	N 含量 N content	C/N 比 C/N ratio
海拔 Elevation	0.081	0.007 **	0.110	<0.001 **	0.044 *	0.001 **	0.013 *	0.651
土壤层次 Soil layer	<0.001 **	<0.001 **	0.163	<0.001 **	<0.001 **	0.298	<0.001 **	<0.001 **
海拔×土壤层次 Elevation×Soil layer	0.982	0.888	0.938	0.049 *	0.878	0.813	0.980	0.689

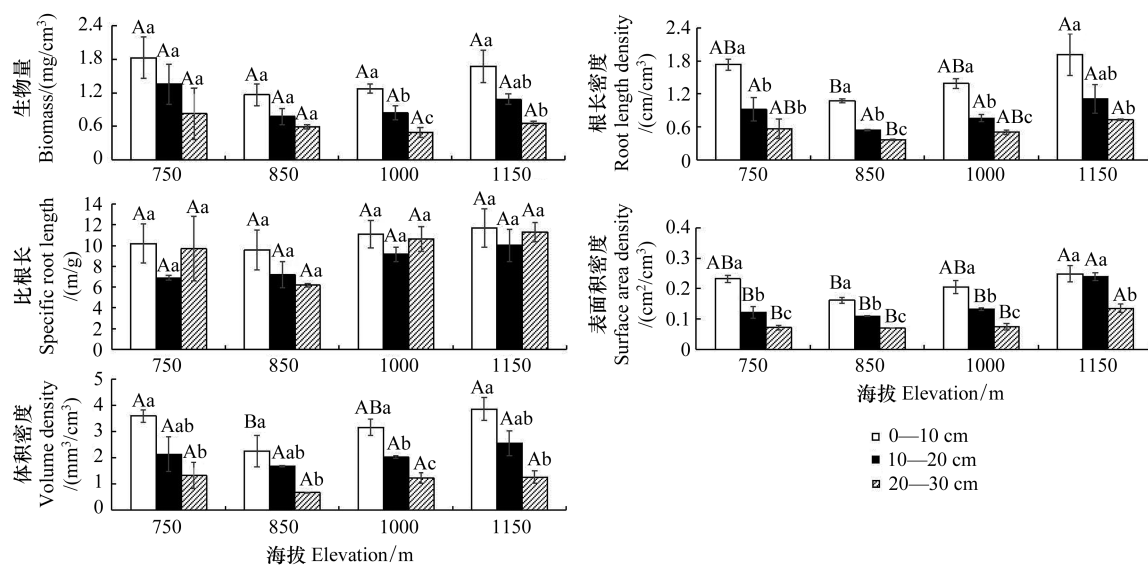
*, $P < 0.05$; **, $P < 0.01$ 

图1 不同海拔杉木林细根各指标变化

Fig.1 Changes of fine root indices of Chinese fir plantations along the elevation gradient

不同大写字母表示同一土层不同海拔之间差异显著;不同小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 根长密度

随海拔梯度增加,0—30 cm 土层细根平均根长密度在 1150 m 处最大,850 m 处最小,两者之间差异显著 ($P < 0.05$)。三个土层细根根长密度均为海拔 850 m < 1000 m < 750 m < 1150 m (图 1)。同一海拔梯度细根根长密度随土层深度增加呈明显减少趋势。海拔 750 m 处 10—20 cm 和 20—30 cm 土层细根根长密度差异不显著 ($P > 0.05$),但都与 0—10 cm 土层差异显著 ($P < 0.05$)。同一土层不同海拔梯度间,850 m 和 1000 m 海拔处 3 个土层间根长密度差异极显著 ($P < 0.01$)。海拔 1150 m 处 0—10 cm 土层与 20—30 cm 土层间细根根长密度差异显著 ($P < 0.05$)。

2.1.3 比根长

0—30 cm 土层细根平均比根长在海拔 1150 m 最大,850 m 最小,两者之间差异显著 ($P < 0.05$)。同一土层细根根长密度在不同海拔间的变化趋势存在差异 (图 1)。0—10 cm 和 20—30 cm 土层细根比根长为海拔 850 m < 750 m < 1000 m < 1150 m,10—20 cm 土层细根比根长为海拔 750 m < 850 m < 1000 m < 1150 m。同一海拔不同土层间细根比根长差异均不显著 ($P > 0.05$),且在土层间的变化趋势不一致,海拔 850 m 细根比根长随土层深度增加呈减少的趋势,其他海拔比根长均随土层深度增加呈先减少后增加的趋势。

2.1.4 表面积密度

测定海拔范围内,0—30 cm 土层细根平均表面积密度在海拔 1150 m 处最大,750 m 次之。0—10 cm 土层

细根表面积密度为海拔 850 m<1000 m<750 m<1150 m, 10—20 cm 和 20—30 cm 土层细根表面积密度均为海拔 850 m<750 m<1000 m<1150 m(图 1)。同一海拔不同土层细根表面积密度变化趋势基本一致,均为 20—30 cm<10—20 cm<0—10 cm。海拔 750 m、850 m 和 1000 m 不同土层间差异显著($P<0.05$);海拔 1150 m 处 0—10 cm 与 10—20 cm 土层间细根表面积密度在差异不显著,但都与 20—30 cm 土层差异显著($P<0.05$)。

2.1.5 体积密度

由图 1 可以看出,细根体积密度在海拔 1150 m 最大,海拔 750 m 次之。0—10 cm 和 10—20 cm 土层细根体积密度为海拔 850 m<1000 m<750 m<1150 m, 20—30 cm 土层细根体积密度在海拔 750 m 最大,海拔 850 m 最小。同一海拔细根体积密度随土层深度增加呈减少的趋势,海拔 750、850 和 1150 m 处,0—10 cm 土层细根体积密度显著高于 20—30 cm 土层,海拔 1000 m 处各土层间差异显著($P<0.05$)。

2.2 不同海拔梯度细根碳氮含量变异特征

随海拔梯度增加,细根平均 C、N 含量呈先增加后减少的变化趋势,平均 C/N 比呈先减少后增加再减少的趋势。双因素方差分析结果显示(表 2):海拔对杉木细根 C 含量有极显著影响($P<0.01$),对 N 含量有显著影响($P<0.05$),对 C/N 比无显著影响($P>0.05$);土层对细根 N 含量、C/N 比有极显著影响($P<0.01$),对 C 含量无显著影响($P>0.05$);海拔与土层的交互作用对 C、N 含量和 C/N 比均无显著影响($P>0.05$)。

2.2.1 碳含量

海拔梯度上 0—30 cm 土层细根平均 C 含量在 850 m 最大,1000 m 次之。0—10 cm 土层细根 C 含量为海拔 1150 m<1000 m<850 m<750 m, 10—20 土层细根 C 含量为海拔 1150 m<750 m<850 m<1000 m, 20—30 cm 细根 C 含量为海拔 1150 m<750 m<1000 m<850 m(图 2)。同一海拔不同土层细根 C 含量的变化趋势一致,海拔 750 m、850 m、1000 m、1150 m 细根 C 含量均随土层加深呈先减少后增加的趋势,各海拔不同土层间细根 C 含量差异不显著($P>0.05$)。

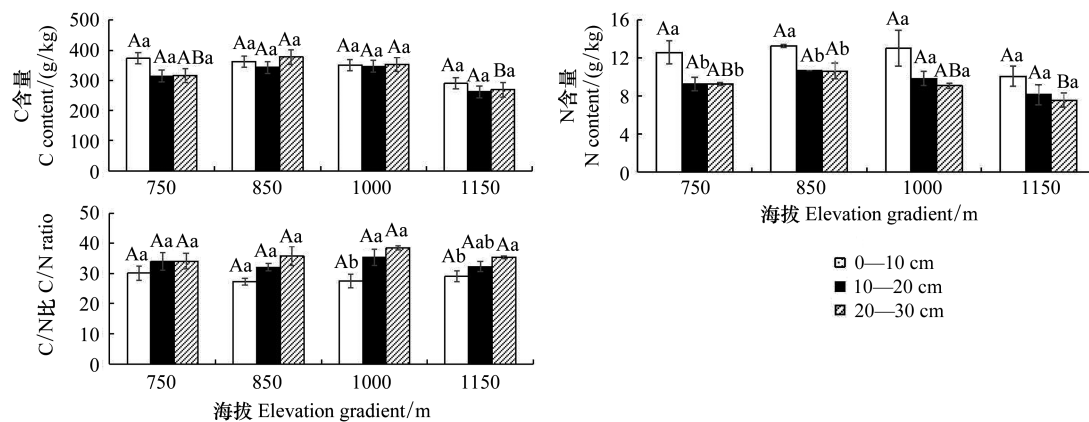


图 2 不同海拔杉木细根 C、N 含量和 C/N 比

Fig.2 The C and N Concentrations and C/N ratio in fine root of Chinese fir along the elevation gradient

2.2.2 氮含量

海拔梯度上 0—30 cm 土层细根平均 N 含量在 850 m 最大,1150 m 最小,两者之间差异极显著($P<0.01$)。0—10 cm 和 10—20 cm 土层细根 N 含量为海拔 1150 m<750 m<1000 m<850 m, 20—30 cm 土层细根 N 含量为海拔 1150 m<1000 m<750 m<850 m。同一海拔不同土层细根 N 含量随土层加深呈减少的趋势(图 2)。750 m 和 850 m 海拔细根 N 含量变化基本一致,即 10—20 cm 与 20—30 cm 差异不显著($P>0.05$),但都与 0—10 cm 差异显著($P<0.05$)。1000 m 和 1150 m 处土层间无显著差异($P>0.05$)。

2.2.3 C/N 比

由图 2 可以看出,0—30 cm 土层细根平均 C/N 比在海拔 1000 m 最大,海拔 850 m 最小。0—10 cm 土层

细根 C/N 比在海拔 750 m 最大,10—20 cm 和 20—30 cm 土层细根 C/N 比在海拔 1000 m 最大。同一海拔不同土层下,细根的 C/N 比均随土层深度增加呈缓增趋势。其中,海拔 1000 m,0—10 cm 与 10—20 cm、20—30 cm 土层细根 C/N 比均差异显著($P<0.05$)。海拔 1150 m 处 0—10 cm 与 20—30 cm 土层间细根 C/N 比存在显著差异($P<0.05$)。

2.3 细根形态和功能特征与土壤水分的关系

对杉木细根生物量、形态指标、碳氮含量与土壤含水量进行 Pearson 相关分析(表 3)。结果表明:土壤含水率与细根生物量、根长密度、比根长呈极显著正相关关系($P<0.01$),与表面积密度、体积密度呈显著正相关关系($P<0.05$);与细根 C 含量、C/N 比呈负相关关系,但均不显著($P>0.05$),与细根 N 含量呈正相关关系,也不达到显著水平($P>0.05$)。对不同海拔梯度杉木细根在不同土层深度中各形态指标与土壤含水率进行回归分析(图 3)。结果表明:细根各形态指标随土壤含水率的升高呈二项式型增长趋势,但拟合度均不高,其中根长密度的回归方程拟合度相对较高($R^2=0.445$),与体积密度的拟合度最低($R^2=0.182$)。

表 3 杉木人工林细根形态和功能特征相关性

Table 3 Correlations between fine root morphological characteristics and its function for Chinese fir plantations

	土壤 含水率 Soil moisture	生物量 Biomass	根长密度 Root length density	比根长 Specific root length	表面积 密度 Surface area density	体积密度 Volume density	C 含量 C Content	N 含量 N Content	C/N 比 C/N Ratio
土壤含水率 Soil moisture	1								
生物量 Biomass	0.366 *	1							
根长密度 Root length density	0.607 **	0.811 *	1						
比根长 Specific root length	0.529 **	-0.210	0.332	1					
表面积密度 Surface area density	0.440 *	0.626 **	0.763 **	0.250	1				
体积密度 Volume density	0.393 *	0.812 **	0.865 **	0.138	0.777 **	1			
C 含量 C content	-0.076	-0.020	0.010	0.060	-0.228	-0.103	1		
N 含量 N content	0.078	0.382 *	0.427 *	0.065	0.220	0.374 **	0.700 **	1	
C/N 比 C/N ratio	-0.192	-0.592 **	-0.621 **	-0.004	-0.557 **	-0.652 **	0.79	-0.644 **	1

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

3 讨论

3.1 不同海拔杉木细根生物量与形态指标的变异特征

本研究结果表明马鬃岭天马自然保护区杉木成熟林 0—30 cm 土层细根在不同海拔梯度的平均生物量为 3.13 mg/cm^3 (313.70 kg/m^2), 介于 Jackson 等^[22]综述的世界上有关亚热带森林细根的生物量范围内 ($1.1\text{—}5.8 \text{ t/ha}^{-1}$)。略高于刘聪^[23]对亚热带杉木细根生物量的研究结果 (268.75 g/m^2), 但远低于权伟等^[15]对武夷山针叶林细根生物量 (7.45 kg/m^3), 本研究取样时间为根系生长旺盛季, 植被所处生态环境更优质可能造成了生物量估算值偏高。刘聪的研究结果, 而武夷山的针叶林的细根主要由竹根组成是造成本研究与其差异过大的重要原因。研究发现各海拔梯度细根生物量存在差异, 这种差异与其所在土壤类型、坡向、坡度、气候带、以及自身遗传特性等有关^[24]。郭炳桥^[25]对黄山松细根在海拔梯度 (1400—2000 m) 的适应研究发现不同海拔细根生物量存在差异, 最大值和最小值分别出现在 1800 m 和 1400 m。本研究中海拔 750 m 细根生物量最高, 这是因为低海拔处林分综合生境适宜, 根系分布性好。另有关人工林研究中发现细根生物量随林分密度增加呈现出逐渐减少的趋势^[26-27], 850 m 细根生物量最低, 林分密度最高, 这是因为高密度林分中, 林冠挤压遮挡, 导致林木对光照利用率降低, 分配到地下部分的地下产物减少^[28]; 林下根系生长空间压缩, 竞争力增加, 导致生物量偏低, 因此本研究生生物量出现先减少后增加的趋势。

构型可塑性的响应是植物适应外界环境变化的一种重要模式^[29]。本研究发现细根表面积密度在海拔

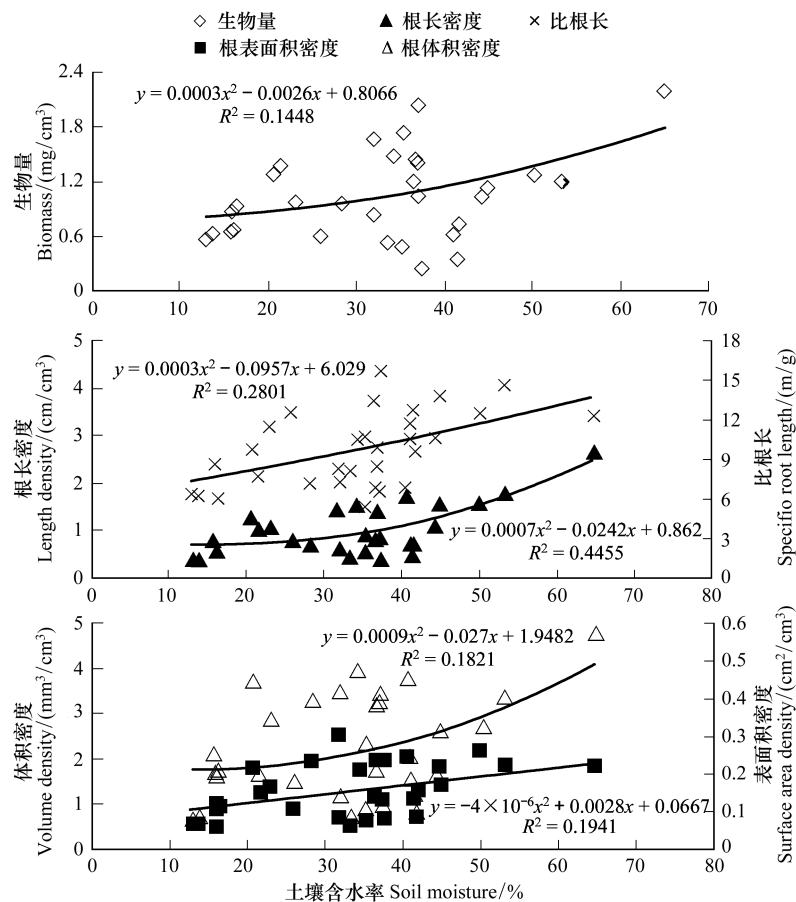


图3 杉木细根各指标与土壤含水率的关系

Fig.3 Regression analysis of fine root indices and soil moisture in Chinese fir plantation

1150 m 显著高于低海拔,与 Girardin 等^[30]在亚马逊海拔 1000 m 以上得出的森林细根表面积明显大于 Metcalfe 等^[31]在低地所获取的数据的结果一致,也与燕辉^[32]在研究中指出的土壤含水量与细根各形态参数之间存在不同程度的正相关性的结果一致。这是因为细根表面积作为与土壤直接接触面,受土壤水分影响明显。有研究显示当生物量低时,其比根长更长,以便更好的吸收水分和养分,本研究显示细根比根长与生物量呈负相关关系但不显著,与 Alvarezurria 等^[33]对阿尔卑斯山 3 种树线 8 种树木的研究中,针叶树种比根长并未随海拔梯度的变化发生明显变化的结果相一致,可见,细根比根长与生物量之间的具体联动机制尚需成为之后的研究关注点。在海拔 850 m 细根各形态指标均较低,与此处林地坡度较陡,土壤含水率和温度低,限制了细根的高速周转有关。Vanguelova 等^[34]指出在偏酸性土壤条件下根系生长的相关指标会更高,也印证了本研究区 850 m 海拔处土壤 pH 相对较高的现象。

森林土壤具有高度的空间异质性^[35],不同土层之间养分差异明显,使得根系在不同土层间可以表现出不同的生理活性^[36-37]。本研究结果显示细根生物量随土层深度增加呈减少趋势,这与韩畅^[8]、郭忠玲^[38]、辛福梅^[39]的研究结果一致。这源于根系趋肥特点,表层土壤腐殖质丰富,温度适宜,水分充足,养分含量高,有利于获取充足的水分和养分^[40-41]。比根长是反映细根吸收能力的最直接指标,本研究中,0—10 cm 到 10—20 cm 土层细根比根长呈降低趋势,主要与土壤含水率极显著相关。土层深度 20 cm 以下,各海拔细根比根长 20—30 cm 均高于 10—20 cm,取样时发现,研究区土质层较薄,石砾增加,土壤孔隙度增大,根系盘结,故细根根长相对增加。土壤含水与细根根长密度、表面积密度和体积密度呈显著正相关,故随着土层的加深,土壤含水率降低,细根根长密度,表面积密度,体积密度也降低。

3.2 不同海拔细根碳氮养分含量的变异特征

植物根系的生理生态功能除与其形态特征有关外,还与根系组织中的 C 和 N 浓度有着密切的联系^[2]。本研究杉木细根 C、N 含量、C/N 比平均值分别为 329.70 g/kg、10.30 g/kg、32.01,其中 C 含量、C/N 比平均值低于中国植物细根 C 含量、C/N 比平均值(473.9 g/kg、59.15)^[42],但细根 N 含量平均值高于中国植物细根 N 含量平均值(9.16 g/kg),这可能是亚热带地区长期大气氮沉降,使土壤中 N 有效性增加,从而影响到植物细根 N 含量。此现象与 Kerkhoff 等^[43]研究发现的亚热带和热带地区大部分表现出高 N 结果一致。研究中杉木细根 C、N 含量和 C/N 比均显示高海拔低于低海拔,这与陈晓萍等^[14]对于武夷山不同海拔黄山松细根的研究结果基本一致,主要是随着海拔的升高,温度降低,限制了植物体养分和水分的吸收^[44]。

林木根系分布深度决定了林木对地下空间的占有量和对土壤水分和养分的利用率,进而影响地上植被产量^[45]。本研究垂直分布中细根养分含量存在差异,细根 N 含量变化与刘佳等^[38]研究结果相似,随土层的加深逐渐降低,这可能与土层加深土壤温度降低有关,马玉珠等^[43]研究也表明植物细根 N 含量受温度影响显著。细根 C 含量在土层间差异不显著也跟土壤养分含量、树种生物学特性等综合因素有关。研究中发现不同海拔、不同土层杉木细根 C/N 比差异均不显著,这是因为碳氮作为重要结构性成分,紧密相连,二者在积累与消耗的过程中具有相对稳定性^[46]。土壤各层次细根养分含量的差异可反映出细根功能转换及土壤资源有效情况。

4 结论

山地海拔梯度的变化造成的环境异质性对植物根系形态和功能特征产生重要影响^[14]。本研究分析了不同海拔梯度上杉木成熟林细根生物量、形态特征和碳氮含量的变异特征,结果表明:随海拔梯度增加,细根生物量和形态特征均呈先减少后增加的趋势;细根 C 含量和 N 含量呈先增加后减少变化趋势,C/N 比呈先减少后增加再减少变化趋势;细根 C 含量与各形态指标没有相关性,N 含量与生物量、根长密度和体积密度极显著正相关,C/N 比与生物量、根长密度、表面积密度和体积密度极显著负相关;土壤含水率对细根形态特征指标有重要影响。不同海拔梯度间杉木细根的形态特征和化学含量均存在差异,这种差异不仅与其自身的遗传特性有关^[39],更是植物细根调整自身生理生态状态以更好适应生存环境的结果。因此研究海拔梯度上杉木细根的形态和功能特征的变异特征可以更好的了解森林植被与环境因子之间的关系,同时对研究环境梯度上森林生态系统格局和功能差异具有重要借鉴。

参考文献(References):

- [1] Chen H, Harmon M E, Sexton J, Fasth B. Fine-root decomposition and N dynamics in coniferous forests of the Pacific Northwest, U.S.A. *Canadian Journal of Forest Research*, 2002, 32(2): 320-331.
- [2] Eissenstat D M, Yanai R D. The ecology of root lifespan. *Advances in Ecological Research*, 1997, 27: 1-60.
- [3] Norby R J, Jackson R B. Root dynamics and global change: seeking an ecosystem perspective. *New Phytologist*, 2000, 147(1): 3-12.
- [4] Vitousek P M, Porder S, Houlton B Z, Chadwick O A. Terrestrial phosphorus limitation: mechanisms, implications, and nitrogen-phosphorus interactions. *Ecological Applications*, 2010, 20(1): 5-15.
- [5] 赵妍丽, 许暘, 谷加存, 王政权. 黄波罗细根碳、氮的季节变化. *应用生态学报*, 2011, 22(10): 2546-2552.
- [6] Craine J M. Competition for nutrients and optimal root allocation. *Plant and Soil*, 2006, 285(1/2): 171-185.
- [7] 程滨, 赵永军, 张文广, 安树青. 生态化学计量学研究进展. *生态学报*, 2010, 30(6): 1628-1637.
- [8] Gill R A, Jackson R B. Global patterns of root turnover for terrestrial ecosystems. *New Phytologist*, 2000, 147(1): 13-31.
- [9] 徐侠, 陈月琴, 汪家社, 方燕鸿, 权伟, 阮宏华, 徐自坤. 武夷山不同海拔高度土壤活性有机碳变化. *应用生态学报*, 2008, 19(3): 539-544.
- [10] 马维玲, 石培礼, 李文华, 何永涛, 张宪洲, 沈振西. 青藏高原高寒草甸植株性状和生物量分配的海拔梯度变异. *中国科学: 生命科学*, 2010, 40(6): 533-543.
- [11] 施政, 汪家社, 何容, 方燕鸿, 徐自坤, 权伟, 张增信, 阮宏华. 武夷山不同海拔土壤呼吸及其主要调控因子. *生态学杂志*, 2008, 27(4): 563-568.
- [12] 陈晓萍, 郭炳桥, 钟全林, 王满堂, 李曼, 杨福春, 程栋梁. 武夷山不同海拔黄山松细根碳、氮、磷化学计量特征对土壤养分的适应. *生态学报*, 2018, 38(1): 273-281.

- [13] Davis J P, Haines B, Coleman D, Hendrick R. Fine root dynamics along an elevational gradient in the southern Appalachian Mountains, USA. *Forest Ecology and Management*, 2004, 187(1): 19-33.
- [14] 胡瑞芝, 杜自强, 刘爽, 史健伟. 不同海拔华北落叶松细根形态特征. *生态学杂志*, 2016, 35(5): 1248-1253.
- [15] 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.
- [16] 张涛, 车克钧, 王辉. 祁连山青海云杉林不同海拔梯度土壤水分动态变化. *湖北农业科学*, 2009, 48(5): 1107-1111.
- [17] 何宗明, 范少辉, 林光耀, 杨旭静, 应金花. 立地管理措施对二代 2 年生杉木林生长影响. *福建林学院学报*, 2002, 22(1): 17-20.
- [18] 匡冬姣, 雷丕锋. 不同林龄杉木人工林细根生物量及分布特征. *中南林业科技大学学报*, 2015, 35(6): 70-74, 79-79.
- [19] 韩畅, 宋敏, 杜虎, 曾馥平, 彭晚霞, 王华, 陈莉, 苏樑. 广西不同林龄杉木、马尾松人工林根系生物量及碳储量特征. *生态学报*, 2017, 37(7): 2282-2289.
- [20] 廖利平, 陈楚莹, 张家武, 高洪. 杉木、火力楠纯林及混交林细根周转的研究. *应用生态学报*, 1995, 6(1): 5-10.
- [21] 杨克凤, 张鑫童, 汪大林, 方海义, 陈青, 王俊, 杨书运. 马鬃岭自然保护区土壤碳蓄积的研究. *生态环境学报*, 2010, 19(10): 2372-2375.
- [22] Jackson R B, Canadell J, Ehleringer J R, Mooney, H A, Sala O E, Schulze E D. A global analysis of root distributions for terrestrial biomes. *Oecologia*, 1996, 108(3): 389-411.
- [23] 刘聪, 项文化, 田大伦, 方晰, 彭长辉. 中亚热带森林植物多样性增加导致细根生物量“超产”. *植物生态学报*, 2011, 35(5): 539-550.
- [24] Hendrick R L, Pregitzer K S. Applications of minirhizotrons to understand root function in forests and other natural ecosystems. *Plant and Soil*, 1996, 185(2): 293-304.
- [25] 郭炳桥. 黄山松细根主要功能性状对海拔梯度的适应规律研究[D]. 福州: 福建师范大学, 2016.
- [26] 张艳杰, 温佐吾. 不同造林密度马尾松人工林的根系生物量. *林业科学*, 2011, 47(3): 75-81.
- [27] 田宇明, 王庆成. 初植密度对 10 年生水曲柳人工林生物量及根系的影响. *林业科学*, 2011, 47(7): 102-107.
- [28] 谢玲芝, 李俊楠, 王韶仲, 王文娜, 谷加存. 林分密度对水曲柳人工林吸收根生物量和根长密度的影响. *东北林业大学学报*, 2014, 42(9): 1-5.
- [29] Curt T, Prévosto B. Rooting strategy of naturally regenerated beech in Silver birch and Scots pine woodlands. *Plant and Soil*, 2003, 255(1): 265-279.
- [30] Girardin C A J, Aragão L E O C, Malhi Y, Huasco W H, Metcalfe D B, Durand L, Mamani M, Silva-Espejo J E, Whittaker R J. Fine root dynamics along an elevational gradient in tropical Amazonian and Andean forests. *Global Biogeochemical Cycles*, 2013, 27(1): 252-264.
- [31] Metcalfe D B, Meir P, Aragão L E O C, da Costa A C L, Braga A P, Goncalves P H L, de Athaydes Silva Junior J, de Almeida S S, Dawson L A, Malhi Y, Williams M. The effects of water availability on root growth and morphology in an Amazon rainforest. *Plant and Soil*, 2008, 311(1/2): 189-199.
- [32] 燕辉, 苏印泉, 朱昱燕, 张景群. 秦岭北坡杨树人工林细根分布与土壤特性的关系. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2009, 33(2): 85-89.
- [33] Alvarez-Uria P, Körner C. Fine root traits in adult trees of evergreen and deciduous taxa from low and high elevation in the Alps. *Alpine Botany*, 2011, 121(2): 107-112.
- [34] Vanguelova E I, Nortcliff S, Moffat A J, Kennedy F. Morphology, biomass and nutrient status of fine roots of Scots pine (*Pinus sylvestris*) as influenced by seasonal fluctuations in soil moisture and soil solution chemistry. *Plant and Soil*, 2005, 270(1): 233-247.
- [35] 王庆成. 水曲柳落叶松细根对土壤养分空间异质性的反应[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2004.
- [36] 单梦颖, 杨永刚, 吴兆录. 云南省中部 3 种森林土壤含水率、容重和细根重及其垂直分布. *云南地理环境研究*, 2013, 25(4): 38-44.
- [37] 赵忠, 成向荣, 薛文鹏, 王海迪, 袁志发. 黄土高原不同水分生态区刺槐细根垂直分布的差异. *林业科学*, 2006, 42(11): 1-7.
- [38] 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.
- [39] 幸福梅, 刘济铭, 杨小林, 赵垦田. 色季拉山急尖长苞冷杉叶片及细根性状随海拔的变异特征. *生态学报*, 2017, 37(8): 2719-2728.
- [40] 安慧, 韦兰英, 刘勇, 上官周平. 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. *植物营养与肥料学报*, 2007, 13(4): 611-619.
- [41] 黄林, 周立江, 王峰, 黄茹, 田峰, 齐代华, 唐元会. 红壤丘陵区典型植被群落根系生物量及碳储量研究. *水土保持学报*, 2009, 23(6): 134-138.
- [42] 马玉珠, 钟全林, 靳冰洁, 卢宏典, 郭炳桥, 郑媛, 李曼, 陈栋梁. 中国植物细根碳、氮、磷化学计量学的空间变化及其影响因子. *植物生态学报*, 2015, 39(2): 159-166.
- [43] Kerkhoff A J, Enquist B J, Elser J J, Fagan W F. Plant allometry, stoichiometry and the temperature-dependence of primary productivity. *Global Ecology and Biogeography*, 2005, 14(6): 585-598.
- [44] Farley R A, Fitter A H. Temporal and spatial variation in soil resources in a deciduous woodland. *Journal of Ecology*, 1999, 87(4): 688-696.
- [45] 李鹏, 赵忠, 李占斌, 王乃江. 植被根系与生态环境相互作用机制研究进展. *西北林学院学报*, 2002, 17(2): 26-32.
- [46] Ågren G I. Stoichiometry and nutrition of plant growth in natural communities. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2008, 39: 153-170.