

弓杠岭不同海拔云杉细根生物量及形态特征

苏 宇, 吴世磊, 贺 维, 张 炜, 鄢武先*

(四川省林业科学研究院, 成都, 610000)

摘 要: 海拔变化是多环境因子的梯度效应, 细根作为植物吸收水分与养分的重要器官, 其性状特征在指示植物的生长和分布等方面意义重大。该研究以弓杠岭 2 500~3 300 m 海拔地的云杉(*Picea asperata*)细根为研究对象, 采用根序分级法对云杉 1~5 级根序的生物量及细根形态(平均直径、比根长、根长密度、比表面积)进行测定, 以明确云杉细根生物量及形态性状指标对海拔变化的响应规律以及细根功能间的权衡关系, 为解释森林生态系统结构和功能特征提供依据。结果表明: (1) 不同海拔云杉细根生物量皆随着根序的上升而增加, 且 0~10 cm 土层生物量显著高于 10~20 cm 土层。(2) 在不同海拔条件和不同土层下的 1~5 级细根直径都表现出随着根序的上升而增加的变化趋势, 比根长、根长密度、比表面积都随着根序的上升而下降。(3) 海拔条件对于比根长、根长密度、比表面积有极显著的影响; 在细根性状之间, 直径与比根长、根长密度、比表面积均呈现极显著负相关关系, 而与生物量呈显著正相关关系。研究认为, 研究区土层深度以及云杉根序对直径、比根长、根长密度、比表面积、生物量的影响并不一致, 即根功能性状对于环境条件的响应方式存在着异质性。

关键词: 云杉; 海拔; 细根; 生物量; 形态特征

中图分类号: Q948.112

文献标志码: A

Fine Root Biomass and Its Morphological Characteristics of *Picea asperata* along an Elevation Gradient of Gonggang Mountains

SU Yu, WU Shilei, HE Wei, ZHANG Wei, YAN Wuxian*

(Sichuan Academy of Forestry, Chengdu 610000, China)

Abstract: Altitude change is the gradient effect of multi-environmental factors. The fine root is an important organ for plants to absorb water and nutrients, and its characteristics are of great significance in indicating plant growth and distribution. In this study, the fine roots of spruce (*Picea asperata*) in the Gonggang Mountains at 2 500–3 300 m were taken as the research object. We used the root order classification method to determine the biomass and fine root morphology (average diameter, specific root length, root length density, specific surface area) of spruce to clarify the response of fine root biomass and morphological characters of spruce to altitude changes and the tradeoff between fine root functions. The purpose of this study is to provide a basis for explaining the structure and functional characteristics of a forest ecosystem. The results showed that: (1) the fine root biomass of spruce at different elevations increased with the increase of root order, and the biomass of 0–10 cm soil layer was significantly higher than that of 10–20 cm soil layer. (2) At different elevations and different soil layers, the diameter of 1–5 fine roots increased with the increase of root order, and the specific root length, root length density, and specific sur-

收稿日期: 2021-09-08; 修改稿收到日期: 2021-11-11

基金项目: 亚高山森林优势树种细根构型及生态适应性研究(2020JBKY02); 震后堆积体坡面生态恢复初期植被—土壤耦联关系研究(2022JBKY)

作者简介: 苏 宇(1991—), 女, 助理研究员, 博士, 主要从事生态保护和经济林研究。E-mail: yusu110@163.com

face area decreased with the increase of root order. (3) Altitude had extremely significant effects on specific root length, root length density, and specific surface area, and among fine root traits, diameter had an extremely significant negative correlation with specific root length, root length density, and specific surface area, while had a significant positive correlation with biomass. The study shows that the effects of soil depth and spruce root order on diameter, specific root length, root length density, specific surface area, and biomass are not consistent, that is, there is heterogeneity in the response of root functional traits to environmental conditions.

Key words: *Picea asperata*; altitude; fine root; biomass; morphology characteristics

植物根系是陆地生态系统中碳及其他矿物质元素的重要储存库^[1],细根是植物根系吸收养分和水分的重要器官,通常被定义为直径小于 2 mm 的根,尽管细根生物量对森林总生物量的贡献相对较小(通常小于 5%),但很大一部分(估计高达 76%)森林年总净初级生产力(NPP)可能被分配给细根^[2-3]。细根作为植物吸收水分与养分的重要器官,其生产和周转构成了森林生态系统物质循环和能量流动的重要组成部分^[4]。与叶相比,根性状如:根氮含量(RNC)、根磷含量(RPC)、根的氮磷比(N:P)、根组织密度(RTD)、比根长(SRL)和比根面积(SRA)等在采集、测量等方面更复杂和困难,由于其在指示植物的生长和分布等方面的意义重大,正逐渐成为生态学界的研究热点^[5]。细根功能的发挥与其数量分布、形态和构型相关,虽然这些特征受植物自身遗传特性的影响,但同时土壤资源状况及环境变化的反应也较为敏感^[6]。研究植物细根功能性状之间的关联,将使人们对植物细根各性状间相互作用的机理有更加深入的了解,有助于进一步理解植物在其生长发育的过程中,是怎样针对不一样的环境去合理利用与分配资源的^[7-8]。

川西亚高山森林是中国西部林区的主体,在水源涵养、水土保持、生物多样性保育等方面具有十分重要的作用和地位。同时,亚高山森林往往地处高山峡谷区,具有明显的垂直海拔分布特征,其优势树种的根系功能及捕食差异性的分异特征及影响机制有待进一步的研究。因此,本研究以弓杠岭不同海

拔地云杉为研究对象,试图探讨以下两个问题:(1)以根序分级方法研究云杉细根生物量及形态性状指标对海拔变化的响应规律;(2)解释细根形态参数之间的相关关系以及细根功能间的权衡关系,以期为解释森林生态系统结构和功能特征提供证据。

1 研究区概况

研究区位于川西九寨沟弓杠岭林区(103°33′~103°44′ E,30°2′~30°21′ N),海拔 2 458~3 478 m,属于青藏高原向四川盆地过渡的高山峡谷区。该区域属气候变化的敏感区,受西风急流和东南季风控制,年均温 6~12 ℃,极端高温 32 ℃,极端低温-16 ℃。年均降雨量 718 mm,年平均日照 1 600 h,年平均相对湿度 65%,无霜期 120 d 至 160 d。夏季温凉多雨,冬季寒冷干燥。

2 研究方法

2.1 样地建设

选择 30a 生粗枝云杉人工林,坡向为阴坡,下坡位,造林密度为 1 665 株·hm⁻²,坡度在 20~30 之间,土壤为发育在灰岩、页岩、板岩的棕壤和暗棕壤。在海拔 2 500 m、2 900 m 和 3 300 m 处,按照样地选择标准,分别设置实验样地,并建立 20 m×20 m 固定样地(表 1)。

2.2 根系样品采集

2020 年的 6 月,依平均胸径和平均树高在样地内选取 3 株标准木,在距树干基部 50~100 cm 范围

表 1 粗枝云杉人工林样地设置表
Table 1 Sample plot of *Picea asperata* plantation

样地号 No. of sample	海拔 Elevation /m	土壤类型 Soil category	地理位置 Geographical coordinate	树高 Height /m	胸径 DBH /cm	郁闭度 Canopy density	林下灌草层主要物种 Main species of shrub and herb layer under forest
1	2 500	棕壤 Brown soil	103°41'5"E, 33°31'42"N	22.7	27.0	0.9	毛叶插田泡;四川忍冬;唐松草 <i>Rubus coreanus</i> ; <i>Lonicera szechuanica</i> ; <i>Thalictrum aquilegifolium</i>
2	2 900	棕壤 Brown soil	103°37'21"E, 33°27'13"N	17.0	24.0	0.8	毛叶插田泡;四川忍冬;荨麻 <i>R. coreanus</i> ; <i>L. szechuanica</i> ; <i>Urtica fissa</i>
3	3 300	暗棕壤 Dark brown soil	103°33'35"E, 33°21'28"N	7.1	11.5	0.6	毛叶插田泡;沙棘;南川绣线菊 <i>R. coreanus</i> ; <i>Hippophae rhamnoides</i> ; <i>Spiraea rosthornii</i>

内用平板铲刨取 0~10 cm、10~20 cm 土壤深度的根系。在土壤中小心分拣出根系,轻轻清理掉根系表面土壤迅速将根系装入准备好的封口袋,将封口袋编号,而后放入保鲜箱带回实验室。同时用直径为 7 cm 的根钻在各模式“S”形采取 0~10 cm、10~20 cm 土壤,带回实验室。

2.3 土壤样品采集

固定样地中采集土壤样品。首先,样方中随机选取 9 个点,并将每 3 个点的样品等比例混合。每个固定样地采集 6 个样品,总共 30 个样品。样品采集使用土钻法:在选点处,去除掉凋落物层,用土钻采集 0~10 cm 的土壤。

2.4 根系形态测定

在实验室内,先将根系用蒸馏水浸泡一定时间使根系和土壤剥离,而后把根系放在土壤套筛上,用蒸馏水轻轻把根系表面附着物洗去,保持细根的完整性。放入盛有低温(2~4 ℃)去离子水的玻璃皿中。用 Fitter 的根系分级命名方法^[7]对细根分级,位于根轴最远端没有分支的根为 1 级细根,1 级细根生于 2 级细根,2 级细根生于 3 级细根上,依次分到 5 级细根。对于生于高级细根上没有分支的根也分为 1 级细根。对每一个根段用镊子仔细分离出 1、2、3、4、5 级细根。不完整的细根根段用同样的方法进行测定。

将分级后各模式不同等级细根应用 Epson 数字化扫描仪(Expression 10000 XL 110)扫描,用 WinRHIZO (Pro 2004b)根系图像分析系统软件对细根扫描图像进行定量分析形态指标。

2.5 根系生物量测定

将分级后的不同模式不同根序细根样品分别包

裹并标记,尽快在 65 ℃烘干至恒重,测生物量。

2.6 指标测定

根长密度 $RLD(\text{cm} \cdot \text{cm}^{-3}) = \text{总根长}(\text{cm}) / \text{土柱体积}(\text{cm}^3)$

比根长 $SRL(\text{m} \cdot \text{g}^{-1}) = \text{总根长}(\text{m}) / \text{干重}(\text{g})$

比表面积 $SAR(\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}) = \text{细根表面积}(\text{cm}^2) / \text{干重}(\text{g})$

生物量 $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}) = \text{干重}(\text{kg}) / \text{土柱横截面积}(\text{m}^2)$

2.7 数据分析

对细根各功能性状及细根的构型指标进行单因素方差分析(one-way ANOVA),比较不同海拔间、不同土层在 1~5 级根序性状指标的作用。用 SPSS 20.0 统计软件完成统计分析。

3 结果与分析

3.1 不同海拔云杉细根形态性状变化

在不同的海拔条件和不同土层下的 1~5 级细根直径都表现出随着根序的上升而增加的变化趋势(表 2)。其中 1、2 级根的直径皆小于 1 mm,4、5 级根皆大于 1 mm,直径在环境条件下的异质性集中在 3 级根。对于不同根序的细根基本表现为处于 3 300 m 海拔处的直径最小,而处于 2 900 m 海拔处的直径最大。0~10 cm 土层和 10~20 cm 土层中细根直径间无显著性差异。

在不同的海拔条件和不同土层下云杉细根比根长在不同根序之间变化规律相似(图 1),皆随着根序的上升而下降。不同海拔条件下云杉细根比根长具有差异,其中 3 300 m 海拔下 0~10 cm 土层中 1 级根的比根长最大($52.37 \pm 4.56 \text{ m} \cdot \text{g}^{-1}$),随着海

表 2 不同海拔云杉细根在不同根序上的平均直径变化

Table 2 Vertical distribution of average fine root diameter of different elevation gradients among soil layers/mm

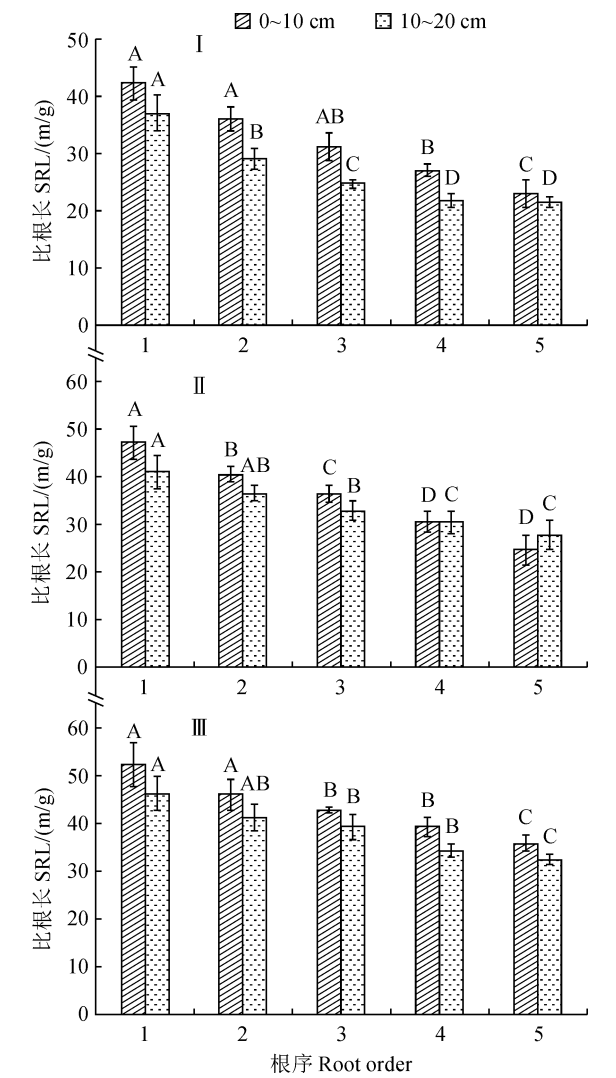
海拔 Elevation /m	土层 Soil layer	根序 Root order				
		1 级根 First-order root	2 级根 Second-order root	3 级根 Third-order root	4 级根 Fourth-order root	5 级根 Fifth-order root
2 500	0~10 cm	0.495±0.004a	0.761±0.011a	0.965±0.005a	1.049±0.000a	1.516±0.004a
	10~20 cm	0.501±0.009a	0.741±0.003a	0.857±0.008a	1.302±0.001a	1.668±0.007a
2 900	0~10 cm	0.552±0.011a	0.718±0.008a	1.341±0.001a	1.394±0.005a	1.793±0.007a
	10~20 cm	0.568±0.005a	0.746±0.002a	1.049±0.008a	1.634±0.005a	2.235±0.001a
3 300	0~10 cm	0.386±0.009a	0.746±0.000a	1.275±0.006a	1.495±0.006a	2.270±0.003a
	10~20 cm	0.394±0.012a	0.530±0.013a	0.669±0.005a	1.014±0.000a	1.869±0.005a

注:不同小写字母表示同一海拔不同土层间差异显著($P < 0.05$)

Note: The different lowercase letters represent significant differences ($P < 0.05$) among different soil layers at the same altitude treatment

拔的降低在 2 500 m 海拔条件下,这一数值下降到了 $(42.26 \pm 2.85) \text{ m} \cdot \text{g}^{-1}$ 。

在不同的海拔条件和不同土层下云杉细根根长密度在不同根序之间变化规律相似(图 2)。不同海拔条件下云杉细根根长密度具有差异,其中 3 300 m 海拔下 0~10 cm 土层中 1 级根的根长密度最大 $(127.53 \pm 9.65 \text{ cm} \cdot \text{cm}^{-3})$,随着海拔的降低而降低,在 2 500 m 海拔条件下,这一数值下降到了 $(106.53 \pm 2.85) \text{ cm} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。在 3 个海拔条件下不同根序的细根根长密度都表现为 0~10 cm 高于 10~20 cm。



不同大写字母表示各根序间差异显著($P < 0.05$),下同
图 1 2 500 (I)、2 900 (II)和 3 300 (III) m 海拔下云杉细根根长

The different capital letters represent significant differences ($P < 0.05$) among different root orders. The same as below
Fig. 1 Specific root length (SRL) for branching orders of 2 500 (I), 2 900 (II) and 3 300 (III) m altitude in *P. asperata* plantation

在不同的海拔条件和不同土层下云杉细根比表面积在不同根序之间变化规律相似,都随着根序的上升而下降(图 3)。不同海拔条件下云杉细根比表面积具有差异,其中 3 300 m 海拔下 0~10 cm 土层中 1 级根的比表面积最大 $(249.08 \pm 14.52 \text{ cm}^2 \cdot \text{g}^{-1})$,随着海拔的降低而降低。在 3 个海拔条件下不同根序的细根比表面积都表现为 0~10 cm 高于 10~20 cm。

3.2 云杉细根生物量

不同海拔云杉细根生物量皆随着根序的上升而增加,且 0~10 cm 土层生物量显著高于 10~20 cm 土层(表 3)。在 0~10 cm 土层,各根序细根生物量随着云杉分布海拔的上升而降低,在 10~20 cm 土层,各级细根生物量异质性较低。在 2 900 m 与 3 300 m

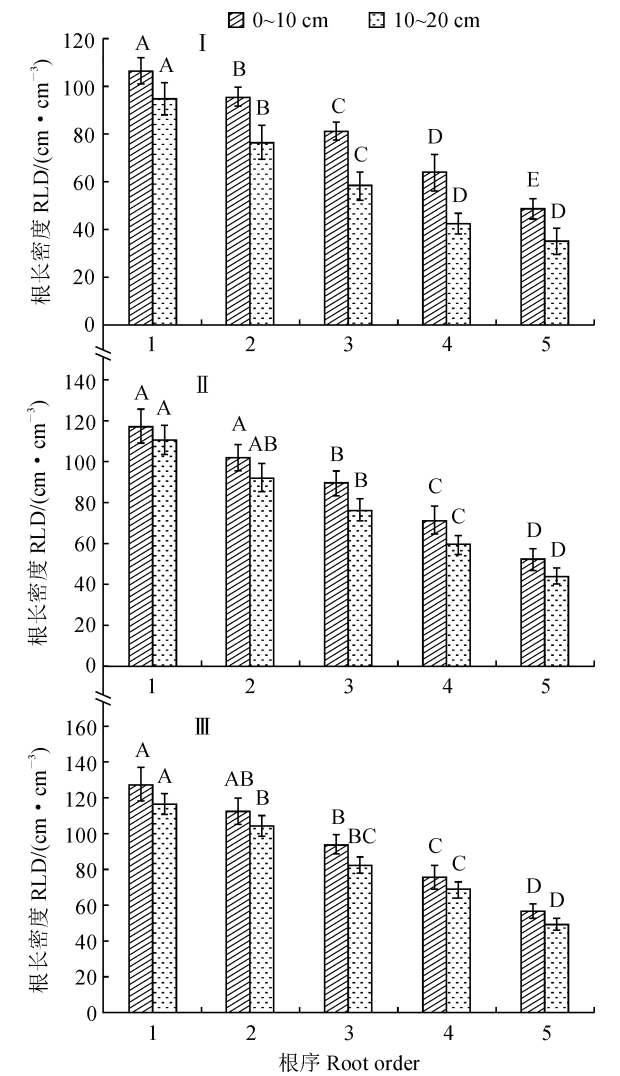


图 2 2 500 (I)、2 900 (II)和 3 300 (III) m 海拔下细根根长密度

Fig. 2 RLD for branching orders of 2 500 (I), 2 900 (II) and 3 300 (III) m altitude in *P. asperata* plantation

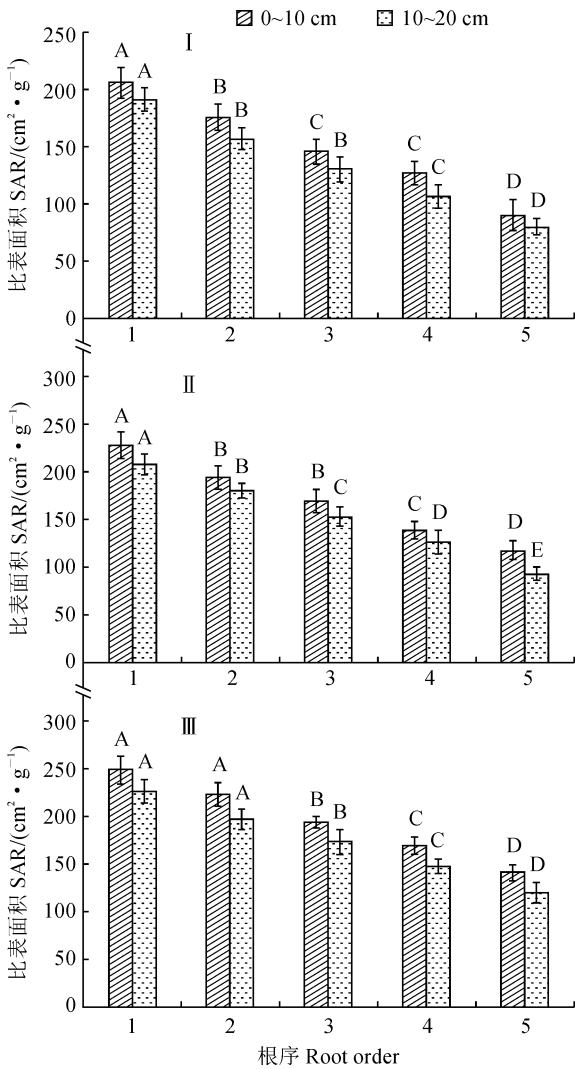


图3 2 500(Ⅰ)、2 900(Ⅱ)和3 300(Ⅲ) m海拔下
细根比表面积

Fig. 3 SAR for branching orders of 2 500(Ⅰ), 2 900(Ⅱ)
and 3 300(Ⅲ) m altitude in *P. asperata* plantation

表3 不同海拔云杉细根生物量在不同土层的分布

Table 3 Vertical distribution of fine root biomass of different elevation gradients among soil layers/(kg·m⁻²)

海拔 Elevation /m	土层 Soil layer	根序 Root order				
		1 级根	2 级根	3 级根	4 级根	5 级根
		First-order root	Second-order root	Third-order root	Fourth-order root	Fifth-order root
2 500	0~10 cm	0.146±0.021aE	0.232±0.011aD	0.335±0.016aC	0.522±0.010aB	0.622±0.014aA
	10~20 cm	0.003±0.000bE	0.006±0.000bD	0.014±0.000bC	0.025±0.000bB	0.030±0.000bA
2 900	0~10 cm	0.122±0.003aD	0.157±0.008aD	0.329±0.012aC	0.455±0.045aB	0.571±0.056aA
	10~20 cm	0.008±0.000bE	0.026±0.000bD	0.040±0.000bC	0.045±0.000bB	0.051±0.000bA
3 300	0~10 cm	0.104±0.005aD	0.138±0.014aD	0.234±0.041aC	0.355±0.026aB	0.442±0.053aA
	10~20 cm	0.008±0.000bE	0.033±0.000bD	0.057±0.000bC	0.067±0.000bB	0.071±0.000bA

注:不同小写字母表示同一海拔不同土层各根序间差异显著($P < 0.05$)。不同大写字母表示同一海拔同一土层各根序间差异显著($P < 0.05$)

Note: The different lowercase letters represent significant differences ($P < 0.05$) among different soil layers at the same altitude treatments. The different capital letters represent significant differences ($P < 0.05$) among different root orders in the same soil layer at the same altitude

海拔处的0~10 cm土层下1、2级细根生物量均没有显著的变化,而在2 500 m海拔下的2级细根生物量则显著高于1级细根。

3.3 细根各形态特征指标与生物量间的关系

由表4可知,在细根性状之间,直径与比根长、根长密度、比表面积呈现极显著的负相关关系,而与生物量呈现显著的正相关关系;比根长与根长密度、比表面积呈现极显著的正相关关系;根长密度则与比表面积呈现显著的正相关关系。

分析海拔、土层深度以及根序对直径、比根长、根长密度、比表面积、生物量的影响,由表5可知,海拔条件对于比根长、根长密度、比表面积有极显著的影响,土层深度对比根长、根长密度、比表面积、生物量有极显著的影响,而根序对于直径、比根长、根长密度、比表面积、生物量均有极显著的影响。

4 讨论

细根是乔木吸收水分与养分的重要器官,细根的形态性状反映了植物的养分获取策略。植物根系在发育过程中形成的不同分枝结构,是由各个根序构成的复杂分枝体系^[9],了解不同根序细根形态对于认识根系结构和功能具有重要意义^[10-12]。本研究发现云杉细根平均直径表现出随着根序的上升而增加的变化趋势,在热带、亚热带常绿或落叶阔叶林树种的大量研究发现,随着根序增加细根木质化程度增加、直径越大^[12-14],支持了本研究的结论。随着根序增加,细根直径越大,初生结构被次生结构取代,细根的直接吸收能力降低,运输功能增强。在2 900和3 300 m海拔下的0~10 cm土层3级根序

表 4 细根各形态特征指标与生物量间的相关系数

Table 4 Correlation coefficients between morphological characteristics of fine roots and biomass

	直径 D	比根长 SRL	根长密度 RLD	比表面积 SAR	生物量 Root biomass
直径 D	1.000	−0.590 **	−0.811 **	−0.773 **	0.419 *
比根长 SRL		1.000	0.911 **	0.949 **	−0.250
根长密度 RLD			1.000	0.979 **	−0.251
比表面积 SAR				1.000	−0.292

注: * 和 ** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平(双侧)上显著相关
Note: *, Significant correlation at 0.05 level (bilateral). **, Significant correlation at 0.01 level (bilateral)

表 5 海拔、土层深度对直径、比根长、根长密度、比表面积、生物量的影响

Table 5 Effects of elevation and soil depth on fine-root diameter (D), root length density (RLD), specific root length (SRL), specific root surface area (SRA) and fine-root biomass

	自由度 df	直径 D	比根长 SRL	根长密度 RLD	比表面积 SAR	生物量 Root biomass
海拔 Elevation/m	2	0.069	0.000 **	0.000 **	0.000 **	0.585
土层 Soil layer	1	0.381	0.000 **	0.000 **	0.000 **	0.000 **
根序 Root order	4	0.000 **	0.000 **	0.000 **	0.000 **	0.001 **

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

平均直径都达到了 1 mm,较 2 500 m 处平均直径有显著的增加。平均直径在 3 级根序上的异质化程度最高,这正是初生结构中薄壁细胞消失,周皮形成的开始,而应对环境的异质性,细根在不同的根序条件下逐步形成具有周皮的次生结构。

比根长和根长密度、比表面积是衡量细根吸收能力大小的功能参数,可以反映细根的吸收能力与生理活性。本研究中,随着根序的上升,比根长、根长密度和比表面积都表现出下降趋势,并在不同海拔、土层条件下表现出一致的规律性。并且,细根比根长和比表面积分布随土层深度增加而减少,这与大多数研究的规律一致^[15]。随着海拔的升高,比根长和比表面积增大,且随着根序上升的变化程度在降低,在 2 500 m 海拔处 1 级根序 SRL 为 (42.26 ± 2.85) m/g,5 级根序 SRL 为 (22.96 ± 2.43) m · g^{−1},降幅为 45.68%;当海拔上升到 3 300 m 这一降幅降至 29.94%。比根长和比表面积决定着植物对土壤资源的吸收效率和策略,与植物的生长节律密切相关,并且受环境条件所控制^[16],高 SRL 可能通过更快地获取土壤资源促进植物更快生长。

林木细根生物量的分布特征与土壤水分、养分、物理性质以及细根发生过程中的生物学、生态学密切相关^[17-18]。本研究表明,不同海拔云杉细根生物量皆随着根序的上升而增加,低海拔条件下,林地表

层覆有一层较厚的凋落物,表层土壤的有机质含量高,土壤有效养分多,因而具有相对较高的细根生物量。

细根的生长和分布与林地的气候类型、土壤特性、林分结构等有关^[19]。植物经济学谱理论表明,植物器官的功能性状之间存在着多种关系,这种植物功能的权衡反映了植物的生态适应策略。本研究中,随着海拔变化,环境条件和资源有效性也随之变化,由于高海拔地区气温急速下降,低温限制了植物体养分和水分的供应,光合产物更多地转移向了植物地下部分^[20]。细根平均直径与比根长、根长密度、比表面积呈现极显著的负相关关系,而与生物量呈现显著的正相关关系。海拔、土层深度以及根序对直径、比根长、根长密度、比表面积、生物量的影响并不一致。也就是说,细根功能性状对于环境条件的响应方式也存在着异质性。

综上所述,随着海拔因子的变化,作为植物生长指示性状的细根也随之变化。2 500~3 300 m 海拔上的云杉细根比根长、根长密度、比表面积都随着根序的上升而下降,生物量皆随着根序的上升而增加,且 0~10 cm 土层生物量显著高于 10~20 cm 土层。本研究采用根序分级法对云杉 1~5 级细根性状的探索可以进一步解释细根在植物养分获取策略中的意义。

参考文献:

- [1] WAN S, NORBY R J, PREGITZER K S, *et al.* CO₂ enrichment and warming of the atmosphere enhance both productivity and mortality of maple tree fine roots[J]. *New Phytologist*, 2004, **162**(2): 437-446.
- [2] GILL R A, JACKSON R B. Global patterns of root turnover for terrestrial ecosystems[J]. *The New Phytologist*, 2000, **147**(1): 13-31.
- [3] YUAN Z Y, CHEN H Y H. Fine root biomass, production, turnover rates, and nutrient contents in boreal forest ecosystems in relation to species, climate, fertility, and stand age: literature review and meta-analyses[J]. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2010, **29**(4): 204-221.
- [4] EISSENSTAT D M, YANAI R D. The ecology of root lifespan[J]. *Advances in Ecological Research*, 1997, 27: 1-60.
- [5] 陈晓萍,郭炳桥,钟全林,等.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[J].生态学报,2018, **38**(1): 273-281.
- CHEN X P, GUO B Q, ZHONG Q L, *et al.* Response of fine root carbon, nitrogen, and phosphorus stoichiometry to soil nutrients in *Pinus taiwanensis* along an elevation gradient in the Wuyi Mountains[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, **38**(1): 273-281.
- [6] 胡瑞芝,杜自强,刘爽,等.不同海拔华北落叶松细根形态特征[J].生态学杂志.2016, **35**(5): 1 248-1 253.
- HU R Z, DU Z Q, LIU S, *et al.* Fine root morphology characteristics of *Larix principis-rupprechtii* along an elevation gradient[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, **35**(5): 1 248-1 253.
- [7] FITTER A H, STICKLAND TR. Architectural analysis of plant root systems. III. Studies on plans under field conditions [J]. *New Phytologist*,1992,**121**(2): 243-248.
- [8] 胡慧,包维楷,李芳兰.岷江上游4个栽培树种细根功能性状垂直分布的差异性[J].生态学杂志. 2020, **39**(1): 46-56.
- HU H, BAO W K, LI F L. Differential vertical distribution of functional traits of fine roots of four cultivated tree species in the upper reaches of Minjiang River[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, **39**(1): 46-56.
- [9] PREGITZER KS, DEFOREST JL, BURTON AJ, *et al.* Fine root architecture of nine North American trees[J]. *Ecological Monographs*, 2002, **72**(2): 293-309.
- [10] GUO D, XIA M, WEI X, *et al.* Anatomical traits associated with absorption and mycorrhizal colonization are linked to root branch order in twenty-three Chinese temperate tree species[J]. *New Phytologist*, 2008, **180**(3): 673-683.
- [11] EISSENSTAT DM, WELLS CE, YANAI RD, *et al.* Building roots in a changing environment: implications for root longevity[J]. *New Phytologist*, 2000,147: 33-42.
- [12] FITTER A H. Rapid changes in flowering time in british plants[J]. *Science* (Washington D C), 2002, **296**(5 573): 1 689-1 691.
- [13] 刘思泽,张小国,陈露蔓,等.覆盖对雷竹细根碳氮磷化学计量特征的影响[J].西北植物学报,2019, **39**(12): 2 253-2 262.
- LIU S Z, ZHANG X G, CHEN L M, *et al.* Effect of mulching management on C, N, P stoichiometry characteristics of fine roots of *Phyllostachys praecox* [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2019, **39**(12): 2 253-2 262.
- [14] 刘运科,苏宇,李德会,等.川中丘陵区3个树种的细根形态和功能异质性分析[J].西北植物学报,2016,**36**(5): 1 012-1 020.
- LIU Y K, SU Y, LI D H, *et al.* Morphological and functional heterogeneity of fine roots among three tree species in the hilly region of Central Sichuan[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2016,**36**(5): 1 012-1 020.
- [15] 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, (4): 611-619.
- AN H, WEI L Y, LIU Y, *et al.* Distribution characters of fine root of artificial *Pinus tabulaeformis* and natural *Betula platyphylla* forests and their relation to soil nutrients in Hilly Loess Regions[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2007, (4): 611-619.
- [16] SCHIPPERS P, OIFF H. Biomass partitioning, architecture and turnover of six herbaceous species from habitats with different nutrient supply[J]. *Plant Ecology*, 2000, **149**(2): 219-231.
- [17] 李凌浩,林鹏,邢雪荣.武夷山甜槠林细根生物量和生长量研究[J].应用生态学报,1998, (4): 2-5.
- LI L H, LIN P, XING X R. Fine root biomass and production of *Castanopsis eyrie* forests in Wuyi Mountains[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1998,(4): 2-5.
- [18] 胡建利,杨万勤,张健,等.川西亚高山冷杉和白桦细根生物量与碳储量特征[J].应用与环境生物学报,2009, **15**(3): 313-317.
- HU J L, YANG W Q, ZHANG J, *et al.* Characteristics of biomass and carbon stock of fir and birch fine roots in subalpine forest of Western Sichuan, China[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2009, **15**(3): 313-317.
- [19] 白世红,丁新景,马风云,等.黄河三角洲盐碱地人工刺槐混交林细根分布研究[J].中国生态农业学报,2018, **26**(1): 116-124.
- BAI S H, DING X J, MA F Y, *et al.* Fine root distribution in mixed *Robinia pseudoacacia* plantations in saline soils of the Yellow River Delta[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, **26**(1): 116-124.
- [20] 李爱琴,张莎莎,王会荣,等.杉木成熟林细根形态与功能特征的海拔梯度变异特点[J].生态学报,2020, **40**(2): 719-727.
- LI A Q, ZHANG S S, WANG H R, *et al.* Fine root morphological characteristics and its functions in mature Chinese fir plantations along an elevation gradient in Dabie Mountains [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, **40**(2): 719-727.

(编辑:潘新社)