



郭岩山不同海拔丝栗栲细根功能性状及其与土壤因子的关系

陈逸飞, 林晨蕾, 张硕, 郑德祥, 靳少非, 卢丰林, 林建东

引用本文:

陈逸飞, 林晨蕾, 张硕, 郑德祥, 靳少非, 卢丰林, 林建东. 郭岩山不同海拔丝栗栲细根功能性状及其与土壤因子的关系[J]. 热带亚热带植物学报, 2022, 30(3): 413–422.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11926/jtsb.4452>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

毛竹细根分布特征研究

Fine Root Biomass Distribution of Moso Bamboo at Different Ages

热带亚热带植物学报. 2017, 25(5): 472–479 <https://doi.org/10.11926/jtsb.3714>

井冈山鹿角杜鹃群落灌木层植物叶功能性状对海拔梯度的响应

Response of Leaf Functional Traits of Shrubs to Altitude in *Rhododendron latoucheae* Communities in Mt. Jinggangshan, Jiangxi, China

热带亚热带植物学报. 2019, 27(2): 129–138 <https://doi.org/10.11926/jtsb.3930>

黔中喀斯特9种木质藤本叶功能性状研究

Studies on Leaf Functional Traits of Nine Woody Lianas in the Karst Area of Central Guizhou Province

热带亚热带植物学报. 2021, 29(5): 455–464 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4328>

莽山不同海拔华南五针松径向生长对气候因子的响应

Response of Radial Growth of *Pinus kwangtungensis* at Different Elevations to Climate Factors in Mangsha

热带亚热带植物学报. 2021, 29(6): 605–615 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4381>

木麻黄和桉木离体根瘤和立地土壤的固氮酶与N₂O还原酶活性的研究

Nitrogenase and N₂O Reductase Activities of Detached Nodules and Site Soils of *Casuarina cunninghamiana* and *Alnus trabeculosa*

热带亚热带植物学报. 2019, 27(2): 121–128 <https://doi.org/10.11926/jtsb.3963>

向下翻页，浏览PDF全文

郭岩山不同海拔丝栗栲细根功能性状及其与土壤因子的关系

陈逸飞¹, 林晨蕾¹, 张硕¹, 郑德祥^{1*}, 靳少非², 卢丰林³, 林建东³

(1. 福建农林大学林学院, 福州 350002; 2. 闽江学院地理科学系, 福州 350108; 3. 顺昌县国有林场, 福建 南平 353200)

摘要: 为揭示丝栗栲(*Castanopsis fargesii*)细根功能性状对环境变化的适应机制, 对郭岩山 500、700、900 m 海拔处丝栗栲细根功能性状及其与土壤因子的关系进行研究。结果表明, 丝栗栲细根生物量与细根根长密度、表面积密度、组织密度及体积密度呈正相关, 细根根长密度、体积密度、表面积密度和比根长 4 个性状间均呈极显著正相关关系, 且均与细根组织密度呈显著负相关。根际土含水量、C 和 N 含量与细根比根长、根长密度、体积密度、表面积密度均存在显著正相关关系, 而土壤容重与细根组织密度呈正相关。海拔 700 m 的细根生物量、根长密度、表面积密度及体积密度显著大于海拔 500 和 900 m 的。500 和 900 m 海拔的根长密度、表面积密度与土壤深度呈负相关, 而 500 m 海拔细根的组织密度与土壤深度呈正相关。因此, 郭岩山丝栗栲通过改变细根功能性状来适应海拔和土壤的变化。

关键词: 丝栗栲; 细根; 功能性状; 海拔; 生态适应; 土壤

doi: 10.11926/jtsb.4452

Functional Characteristics of *Castanopsis fargesii* Fine Roots and Their Relationship with Soil Factors at Different Elevations in Guoyan Mountain

CHEN Yifei¹, LIN Chenlei¹, ZHANG Shuo¹, ZHENG Dexiang^{1*}, JIN Shaofei², LU Fenglin³, LIN Jiandong³

(1. College of forestry, Fujian agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 2. Department of geography, Minjiang University, Fuzhou 350108, China; 3. State owned forest farm of Shunchang County, Nanping 353200, Fujian, China)

Abstract: In order to reveal the adaptation mechanism of fine root functional characters of *Castanopsis fargesii* to environmental changes, the relationship between functional traits of fine roots and soil factors of *C. fargesii* at 500, 700 and 900 m altitude in Guoyanshan was studied. The results showed that the fine root biomass was positively correlated with fine root length density, surface area density, tissue density and volume density. Fine root length density, volume density, surface area density and specific root length had significantly positive correlations each other, and which had significantly negative correlations with fine root tissue density. The contents of rhizosphere soil water, C and N had significant positive correlation with fine root specific root length, root length density, bulk density and surface area density, while those had positive correlation with soil bulk density and fine root tissue density. The fine root biomass, root length density, surface area density and volume density at altitude 700 m were significantly higher than those at 500 and 900 m. The root length density and surface area density were negatively correlated with soil depth at altitude 500 and 900 m; while the tissue density of fine roots at 500 m altitude was positively correlated with soil depth. Therefore, *Castanopsis fargesii* in Guoyanshan could change its fine root

收稿日期: 2021-05-15

接受日期: 2021-11-04

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(32071760)资助

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 32071760).

作者简介: 陈逸飞(1997~), 男, 在读研究生, 从事森林经理学研究。E-mail: 349001095@qq.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: fjzdx@126.com

function traits in order to adapt to the changes in altitude and soil.

Key words: *Castanopsis fargesii*; Fine root; Functional trait; Elevation; Ecological adaptation; Soil

细根通常被定义为直径小于 2 mm 的根, 与植物吸收养分、水分的能力密切相关, 而其功能性状可反映出植物对生长环境的适应性^[1-2]。细根对植物生长和分布等的指示作用使其逐渐成为现今生态学的研究热点^[3]。目前, 已对杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)等植物的细根功能性状进行了研究^[4-6], 结果表明, 细根组织密度、根 N 含量、比根长等性状并不是独立存在的, 而是相互联系的, 且多种细根性状的变化往往与植物在不同生长环境下选择的生物量投资策略密切相关, 可反映出植物在获取型策略及保守型策略间的权衡^[7-9]。在全球气候变暖的背景下, 研究植物细根功能性状间及其与环境因子间的关系, 有助于理解植物根系对环境的适应机制及其对自然资源的利用策略, 为植物资源的保护和利用提供指导, 具有重要的科学意义。

较多在大陆乃至全球尺度上对植物与环境关系的研究表明, 环境因子对植物的生长发育有重要影响^[10], 但大尺度研究往往忽视了较多关键的环境因子, Kraft 等^[11]认为, 小尺度生境能在一定程度上解释大尺度研究中所无法解释的环境过滤效应。海拔变化能够使较小的空间范围存在多种类型的环境, 多种与植物生长发育存在紧密联系的气候因子往往在海拔梯度上呈现梯度性变化^[12]。除海拔外, 土壤作为自然界植物生长的要素之一, 土壤深度、根际土养分含量及含水率等因子同样对植物根系的生长、发育存在重要影响^[13-14]。因此, 在以海拔变化为主导的小尺度空间内研究海拔、土壤深度及多种根际土理化性质与植物细根功能性状间的关系往往能较好的揭示植物及其群落对环境变化的响应^[15]。

我国亚热带地区保存有大量以壳斗科(Fagaceae)植物为主要建群种的常绿阔叶林, 但目前我国对壳斗科的研究主要集中于米槠(*Castanopsis carlesii*)、苦槠(*C. sclerophylla*)和格氏栲(*C. kawakamii*)等树种, 对我国长江以南各地常见的丝栗栲(*C. fargesii*)与环境因子间的关系研究却鲜有报道。丝栗栲又名栲树, 对环境变化有较强适应性, 广泛分布于我国亚热带地区, 更是福建省海拔 1 000 m 以下山地常绿阔叶林中至关重要的优势种和建群种^[16]。

郭岩山自然保护区地处亚热带, 具有明显的植被垂直地带性^[17], 中低海拔处存有大量以丝栗栲为建群种的常绿阔叶林, 是研究亚热带气候条件下环境因子与丝栗栲相关关系的理想地点。本研究旨在通过探究丝栗栲细根生物量、组织密度、比根长、体积密度、表面积密度及根长密度对海拔梯度及土壤特性变化的响应, 进一步揭示郭岩山乃至亚热带丝栗栲天然林群落对环境变化的适应机制, 为我国亚热带地区常绿阔叶林的经营和管理提供一定指导。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

试验地位于福建省郭岩山丝栗栲天然林群落。郭岩山自然保护区是福建省县级自然保护区, 属福建省南平市顺昌县, 位于 27°06'~27°18' N、118°00'~118°30' E, 主峰高 1 383.7 m, 是顺昌县第一高峰。保护区地处亚热带地区, 属海洋性季风气候, 四季分明, 年降雨量和日照充足。郭岩山自然保护区存有多种植物资源, 存在明显的植被垂直地带性^[17]: 海拔 500 m 以下多为杉木人工林为主, 海拔高于 1 000 m 以竹林为主, 海拔 500~1 000 m 主要树种为丝栗栲、木荷(*Schima superba*)、锥栗(*Castanea henryi*)和马尾松(*Pinus massoniana*), 其中丝栗栲为主要建群树种。

1.2 样品采集和收集

样品采集时间为 2020 年 8 月。在海拔高度 500、700、900 m 处随机设置 3 个丝栗栲调查样地, 每个样地设 3 个 30 m×30 m 样方, 在每个样方中随机选取 5 株生长状况良好、树形基本一致的丝栗栲, 记录采样点坐标、海拔、坡度等信息。采取根钻法^[18]对丝栗栲细根进行取样, 以丝栗栲树干为中心, 每 120°沿半径方向等间距(0.5 m)设置取样点, 分土层(0~10 和 10~20 cm)钻取土样, 土样过 16 目筛, 依据根系外形、颜色、气味等特征, 用镊子、游标卡尺等分捞出直径≤2 mm 的所有丝栗栲细根, 将细根放入低温去离子水浸泡 1 d, 随后用 60 目孔径的分样筛反复淘洗过滤, 将洗净的细根分装放入超低温冰箱保存。

在根系取样的同时, 将细根在塑料容器中抖动 1 min, 收集从根上分离的土壤样品(0.5~5 mm)作为根际土。

1.3 细根及土壤指标测定

用 LA2400 扫描仪对收集的新鲜细根进行扫描, 测量长度、表面积和体积等形态学特征, 然后将细根于 75 °C 烘箱烘干并用电子天平称量, 计算功能性状。细根生物量(fine root biomass, FRB)(kg/m³)=细根干质量(kg)/取样体积(m³); 根长密度(root length density, RLD)(cm/m³)=细根长度(cm)/取样体积(cm³); 比根长(specific root length, SRL)(m/g)=细根长度(m)/细根干重(g); 根表面积密度(root surface area density, RSD)(cm²/cm³)=细根表面积(cm²)/取样体积(cm³); 根体积密度(root volume density, RVD)(mm³/cm³)=细根体积(mm³)/取样体积(cm³); 根组织密度(root tissue density, RTD)(g/cm³)=细根干质量(g)/细根体积(cm³)。

将收集的土壤分 2 部分, 一部分放在空旷、阴凉环境中自然风干 15 d 后, 取少量土用 pH 仪测定根际土 pH 值, 余下的根际土研磨后过 100 目网筛后再次研磨过 25 目网筛, 然后进行消煮并用碳氮元素分析仪(Vario MAX, Elementar, 德国)和连续流动分析仪(Skalar San++, Skalar, 荷兰)测定土壤全 C、全 N 和全 P 含量; 另一部分根际土中取部分按海拔和土层放入自封袋中, 采用张中峰等^[19]的方法测定根际土容重; 剩余部分置于 75 °C 烘箱中烘干, 测定根际土含水率。

表 1 丝栗栲细根功能性状的 Pearson 相关性分析

Table 1 Pearson correlation analysis of fine root function traits of *Castanopsis fargesii*

功能性状 Function trait	生物量 Biomass	根长密度 Root length density	根表面积密度 Root surface area density	根体积密度 Root volume density	比根长 Specific root length	根组织密度 Tissue density
生物量 Biomass	1	0.510**	0.588**	0.599**	0.185	0.297*
根长密度 Root length density		1	0.953**	0.840**	0.774**	-0.379**
根表面积密度 Root surface area density			1	0.963**	0.642**	-0.362**
根体积密度 Root volume density				1	0.486**	-0.327*
比根长 Specific root length					1	-0.507**
根组织密度 Root tissue density						1

*: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$

2.2 细根功能性状与土壤因子的相关性

由表 2 可见, 郭岩山不同海拔的土壤因子存在差异, 随海拔升高土壤 pH 值和全 P 含量逐渐下降, 而土壤含水率、土壤全 C 和全 N 含量在海拔 700 m

1.4 数据的统计分析

Pearson 相关性分析采用 SPSS 22.0 软件分析细根功能性状间的相关性, 后利用 R 4.1.2 制作相关性热图。所有数据在分析前均进行正态性检验, 若数据不通过正态性检验, 则对其进行对数转化。

采用软件 CANOCO 5 对数据进行 RDA 约束排序研究土壤因子与细根功能性状间的关系, 将丝栗栲细根功能性状及土壤因子作为 RDA 分析所需的物种数据及环境数据。分析前将参数进行标准化处理, 因此在排序图中, 每个环境因子箭头长度所代表的特征向量的长度, 可以看作是环境因子对细根功能性状的解释量的相对大小。排序图中 2 个箭头的夹角可以反映土壤因子和细根功能性状间的相关性, 当夹角为 0°~90°时为正相关关系; 当夹角为 90°~180°时呈负相关; 当夹角为 90°时没有显著的相关关系^[20-21]。

2 结果和分析

2.1 细根功能性状间的相关性

相关性分析表明(表 1), 丝栗栲细根功能性状间存在显著相关关系, 其中细根生物量与根长密度、表面积密度及体积密度有极显著的正相关关系($P < 0.01$), 与组织密度呈显著正相关($P < 0.05$); 根长密度, 体积密度, 表面积密度及比根长 4 个性状间互为极显著正相关($P < 0.01$); 细根组织密度与根长密度、体积密度、表面积密度及比根长均呈显著负相关关系($P < 0.05$)。

最高, 显著高于 500 和 900 m 的($P < 0.05$), 而且, 500 和 900 m 的土壤含水率和 C、N 含量随土壤深度显著下降($P < 0.05$)。

对土壤因子和丝栗栲细根功能性状进行 RDA

表 2 郭岩山不同海拔的土壤特性

Table 2 Soil characteristics at different altitudes in Guoyanshan

海拔 (m) Elevation	深度 Depth (cm)	pH	土壤含水量 Soil moisture content /%	土壤容重 Soil bulk density	全氮 (mg/g) Total nitrogen	全碳 (mg/g) Total carbon	全磷 (mg/g) Total phosphorus
500	0~10	5.01±0.24Aa	16.31±4.68Aa	1.24±0.21Aa	2.10±0.88Aa	34.29±9.74Aa	0.82±0.21Aa
	10~20	4.71±0.11Ba	12.86±3.77Bb	0.97±0.11Ba	1.11±0.31Ba	20.14±6.16Ba	0.74±0.20Aa
700	0~10	4.72±0.21Ab	17.08±6.69Aa	1.44±0.16Ab	3.08±1.91Ab	64.32±32.65Ab	0.48±0.22Ab
	10~20	4.79±0.20Aa	17.57±3.11Ab	1.29±0.20Ab	1.68±0.66Bb	36.54±15.17Bb	0.31±0.11Bb
900	0~10	4.53±0.16Ab	16.79±4.35Aa	1.27±0.044Ac	2.63±1.29Aab	42.36±15.94Aa	0.30±0.13Ab
	10~20	4.79±0.19Ba	12.35±5.47Aa	1.28±0.036Ab	1.52±0.60Bb	25.68±6.63Ba	0.31±0.21Ab

同一土层数据后不同小写字母表示差异显著($P<0.05$); 同一海拔数据后不同大写字母表示差异显著($P<0.05$)。

Data followed different small letters at the same soil layer indicate significant differences at 0.05 level, while different capital letters at the same elevation indicate significant differences at 0.05 level.

约束排序分析及 Pearson 相关性分析(图 1, 2), 结果表明, 土壤因子能够解释 39.4%的功能性状变异, 第 1、2 排序轴的特征值分别为 0.3420 和 0.0481, 前 2 个 RDA 排序轴包括了 98.92% 丝栗栲细根功能性状和土壤因子的信息, 其中第 1 排序轴占到了总信息量的 86.73%。由表 3 可知, 土壤因子影响丝栗栲细根功能性状, 其中影响最大的是土壤 C 含量, 能够解释 18.8% 的细根功能性状变异, 重要性十分突出, 其次是土壤容重、N 含量、含水率、pH 值和 P 含量, 分别解释了 6.4%、6.1%、5.7%、1.2% 和 1.2% 的细根功能性状变异。由图 1, 2 可见, 根际土含水率、土壤 C、N 含量与细根比根长、根长密度、体积密度及表面积密度呈正相关关系($P<0.05$), 而细根组织密度与土壤 pH 值呈显著负相关($P<0.05$), 与土壤容重呈正相关($P<0.05$)。

2.3 不同海拔的细根功能性状

郭岩山丝栗栲的平均细根生物量、根长密度、表面积密度和体积密度均以 700 m 海拔的最大, 且海拔和土壤深度与细根功能性状间表现出相关关系(表 4, 图 3), 700 m 海拔 0~10 cm 土层的细根生物量、表面积密度及体积密度均显著高于 500 m 海拔($P<0.05$), 而 10~20 cm 土层中的根长密度、表面积密度、体积密度及比根长均显著高于 900 m 海拔处($P<0.05$), 但细根组织密度显著低于 900 m 海拔处($P<0.05$)。

同一海拔梯度上丝栗栲的细根生物量、根长密度、表面积密度、体积密度和比根长均随土壤深度逐渐下降, 但仅 500 和 900 m 海拔不同土层的根长密度、表面积密度存在显著差异($P<0.05$), 且 500 m 细根的组织密度与土壤深度成正比($P<0.05$)。

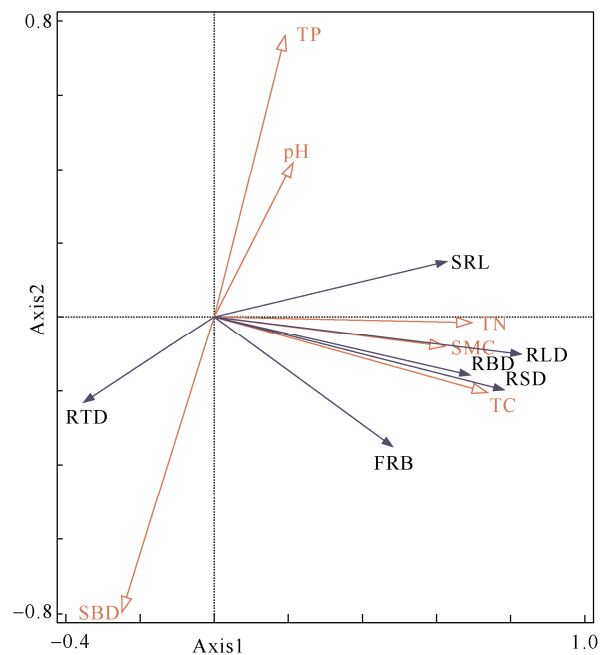


图 1 功能性状与地形因子和土壤因子的 RDA 分析图。FRB: 细根生物量; RLD: 根长密度; RSD: 根表面积密度; RTD: 根组织密度; RBD: 根体积密度; SRL: 比根长; SBD: 土壤容重; TC: 全碳; TN: 全氮; TP: 全磷; SMC: 土壤含水量。

Fig. 1 RDA analysis of functional characters, topographic factors and soil factors. FRB: Fine root biomass; RLD: Root length density; RSD: Root surface area density; RTD: Root tissue density; RBD: Root volume density; SRL: Specific root length; SBD: Soil bulk density; TC: Total carbon; TN: Total nitrogen; TP: Total phosphorus; SMC: Soil moisture content.

3 结论和讨论

3.1 细根功能性状间存在紧密关联性

植物功能性状间普遍存在紧密的相关关系, 且有多种植物细根功能性状是根经济学中的常见指

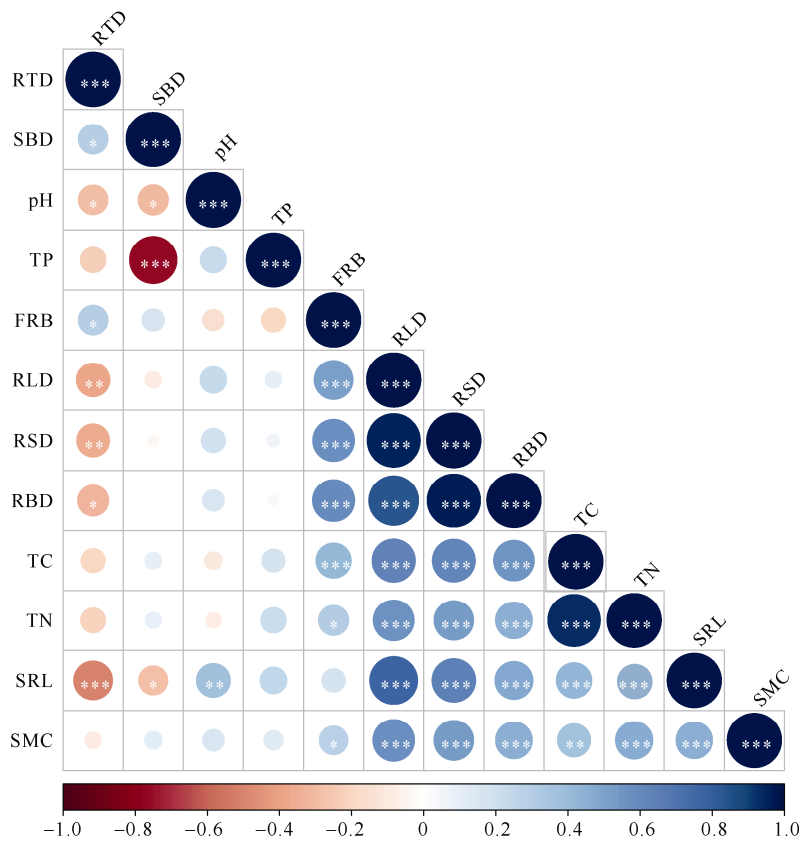


图 2 功能性状、地形因子和土壤因子的相关性热图。*: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$; ***: $P < 0.001$ 。FRB: 细根生物量; RLD: 根长密度; RSD: 根表面积密度; RTD: 根组织密度; RBD: 根体积密度; SRL: 比根长; SBD: 土壤容重; TC: 全碳; TN: 全氮; TP: 全磷; SMC: 土壤含水量。

Fig. 2 Correlation heat map of functional properties, topographic factors and soil factors. *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$; ***: $P < 0.001$. FRB: Fine root biomass; RLD: Root length density; RSD: Root surface area density; RTD: Root tissue density; RBD: Root volume density; SRL: Specific root length; SBD: Soil bulk density; TC: Total carbon; TN: Total nitrogen; TP: Total phosphorus; SMC: Soil moisture content.

表 3 向前引入法分析的土壤因子特征

Table 3 Forward selection analysis of soil factor

土壤因子 Soil factor	解释率 Explain rate /%	贡献率 Contribution rate /%	F	P
全碳 Total carbon (TC)	18.8	47.6	13.4	0.002
土壤容重 Soil bulk density (SBD)	6.4	16.3	4.9	0.014
土壤含水量 Soil moisture content (SMC)	5.7	14.4	4.6	0.010
全磷 Total phosphorus (TP)	6.1	15.6	5.4	0.006
pH	1.2	3.1	1.1	0.368
全氮 Total nitrogen (TN)	1.2	3.0	1.0	0.364

标^[22-23], 这是由于物种间在生长发育及形成适应性机制的过程中相互作用, 表现出相应的生态策略^[15]。比根长、根长密度、体积密度及表面积密度均与细根吸收水分和养分效率密切相关^[24-25], 而比根长更是反映根系投入与根系产出的指标, 当植物单位重量根的长度越长其表面积也越大^[26]。本研究结果表明, 郭岩山丝栗栲细根的比根长、根长密度、体积密度和表面积密度间存在极显著的正相关关系, 使

得丝栗栲细根的比根长、根长密度等性状对环境变化做出相似的响应, 从而呈现出较强的正相关性。Sierra 等^[6]的研究表明, 多种植物的细根比根长与比根面积呈正相关关系; 梅莉等^[27]报道水曲柳 (*Fraxinus mandshurica*) 的细根生物量与根长密度具显著正相关关系。

与细根比根长、根长密度等性状间的关系不同, 郭岩山丝栗栲细根组织密度与比根长呈现显著

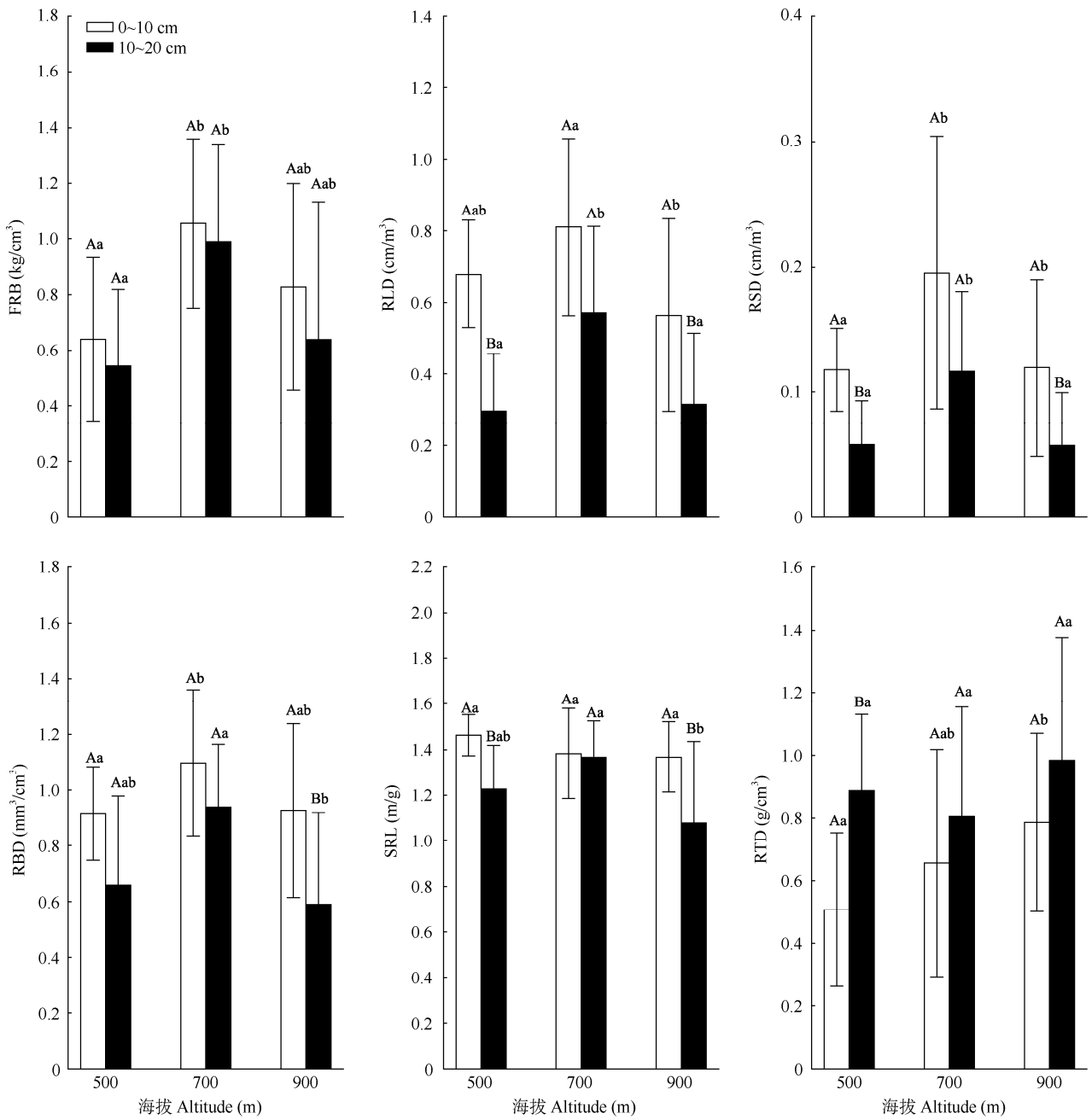


图 3 不同海拔丝栗栲的细根功能性状。FRB: 细根生物量; RLD: 根长密度; RSD: 根表面积密度; RBD: 根体积密度; SRL: 比根长; RTD: 根组织密度。
 Fig. 3 Changes in fine root functional traits of *Castanopsis fargesii* at different altitude. FRB: Fine root biomass; RLD: Root length density; RSD: Root surface area density; RBD: Root volume density; SRL: Specific root length; RTD: Root tissue density.

表 4 海拔梯度和土壤层次对细根功能性状影响的方差分析

Table 4 Variance analysis of effects of altitude and soil layer on fine root functional traits

因子 Factor	FRB	RLD	RSD	RBD	SRL	RTD
海拔 Elevation (A)	0.002**	0.002**	0.002**	0.007**	0.039*	0.049*
土层 Soil layer (B)	0.529	<0.001**	<0.001**	0.003**	<0.001**	0.007**
A × B	0.989	0.826	0.845	0.579	0.188	0.512

*: P < 0.05; **: P < 0.01; FRB: 细根生物量; RLD: 根长密度; RSD: 根表面积密度; RBD: 根体积密度; SRL: 比根长; RTD: 根组织密度。

*: P < 0.05; **: P < 0.01; FRB: Fine root biomass; RLD: Root length density; RSD: Root surface area density; RBD: Root volume density; SRL: Specific root length; RTD: Root tissue density.

的负相关关系。细根组织密度与林木根系机械性和抗干扰能力密切相关,通常细根组织密度越大根系抗干扰能力和机械性越强,而比根长作为根经济学中的重要指标,在多数情况下与植物根系吸收水分和养分的能力有正相关关系,这使得自然环境中二者间的关系往往呈现出反比,可在一定程度上反映植物在不同环境中对资源的分配策略^[6,23]。戚德辉等^[4]对铁杆蒿细根功能性状的研究表明,铁杆蒿的比根长与组织密度呈负相关(基于功能性状的铁杆蒿对环境变化的响应与适应);而 Sierra 等^[6]对生长于乞力马扎罗山的多种植物的细根进行研究,认为细根组织密度与比根长呈负相关。

3.2 细根功能性状与根际土理化性质的关系

冗余分析表明,根际土理化性质能在一定程度上解释郭岩山丝栗栲细根功能性状的变异,其中根际土含水率重要性最为突出,能显著促进比根长、根长密度等性状的增大。除根际土含水率外,根际土 C、N 含量与细根比根长、根长密度、体积密度及表面积密度均呈正相关关系,这可能是因为在土壤含水率高、有机质含量丰富的环境下,丝栗栲采取了获取型的生长策略,通过增大比根长、根长密度、体积密度等性状进一步提高自身对水分及养分的吸收能力,从而更好的生长发育。而根际土作为细根生长过程中必不可少的因素,其资源有效性的变化影响着植物所需各营养元素的分配格局及植物根系的生理特性^[6]。李陆生等^[18]的研究表明,红枣(*Ziziphus jujuba*)细根比根长随土壤水分的增加而增加;梅莉等^[27]的研究表明,水曲柳细根根长密度在较肥沃的表层土壤更大,且与土壤 N 含量及含水量成正比,这均与本研究结果相似。根际土 P 含量和 pH 对丝栗栲细根影响较小,仅能解释 1.2% 的细根功能性状变异,与尹元萍等^[28]对大豆(*Glycine max*)的研究结果不同,可能是因为郭岩山地区土壤 P 含量相对丰富,且土壤酸碱度适宜植物生长,致使根际土 P 含量及 pH 没有成为制约丝栗栲生长的主要限制性因子。郭岩山丝栗栲细根的组织密度则与土壤容重呈正相关关系,而组织密度与细根的机械性直接相关。往往容重越高的土壤硬度也越大,这也使得植物细根在容重较高的土壤环境中需要更强的机械性^[29]。Materechera 等^[30]对多种植物根系对坚硬土壤的适应性进行了探究,结果表明高容重土壤环境可使植物根变短变粗,这与本研究结

果相似。

3.3 细根功能性状对海拔梯度的响应特征

丝栗栲细根的比根长、根长密度、体积密度及表面积密度在海拔梯度上的变化相似,均以 700 m 海拔为最大,而在 500 和 900 m 海拔随土壤深度而显著降低。细根作为植物对土壤资源有效性反应最敏感的器官具有较强的可塑性^[31],可根据生境变化不断调整自身生物量分配策略^[32]。郭岩山根际土含水率和 C、N 含量在 700 m 海拔最大,且随土壤深度逐渐降低。因此,郭岩山丝栗栲选择在水肥条件更好的 700 m 海拔处及表层土壤中投入更多的生物量,以增大细根与土壤的接触面积以更好地获取养分及水分,这导致细根比根长等性状在海拔梯度上存在差异,也使丝栗栲细根生物量、表面积、根长密度及体积密度间呈现出显著的正相关关系。Alvarez-Uria 等^[33]对阿尔卑斯山山地环境植物的研究表明,高海拔地区植物往往具有较大的比根长和更细的细根,这与本文的结论不同。本研究中最高采样点海拔不超过 1 000 m,温度相对较高,且比根长与土壤养分含量密切相关,而郭岩山 700 m 海拔处土壤 C、N 元素含量最高,这都可能导致研究结果不同。

郭岩山丝栗栲细根组织密度在 900 m 海拔最大,在 500 m 海拔随土壤深度显著降低,这与戚德辉等^[4]的研究结果相似。本研究中细根组织密度与比根长及环境因子的关系可表明,在寒冷的中高海拔地区和较为贫瘠的深层土壤中,丝栗栲更倾向于采取保守型的策略,增加自身组织密度以增强自身的抗逆性及机械性,而在高含水量及高养分含量的环境中,丝栗栲更倾向于采取获取型的生长策略,在延长细根上投入更多的生物量并减少了构建和维持单位长度细根的碳水化合物,降低细根机械性以加快周转速率^[22],以增强对水分和养分的吸收能力。甘雅文等^[34]对南疆地区植物根系的分布研究表明,冬小麦(*Triticum aestivum*)、核桃(*Juglans regia*)等多种植物的细根体积密度在 0~20、40~60、60~80 和 80~100 cm 土层中随土壤深度逐渐降低,这些均与本研究结果相似。而 Franssen 等^[35]认为,根系吸收机制是在较肥沃的土壤中投入较多的生物量以增强对养分和水分的吸收能力,这也印证了本研究的结论。

细根生物量在不同海拔梯度和土壤深度的差

异较小, 仅 700 m 海拔显著高于 500 m 海拔。有研究表明, 杉木和杨树(*Populus sp.*)细根生物量随土壤深度下降^[36-37], 与本研究结果不同。郭岩山自然保护区属亚热带海洋气候, 土壤肥沃且降雨量和日照充足, 不同土层的水肥条件虽有差异, 但均可满足丝栗栲的基本生长需求, 故推测郭岩山土壤理化性质在土壤深度上有变化, 但差异较小, 不足以使丝栗栲细根生物量产生显著差异。本文仅选取 0~10 和 10~20 cm 土层, 且以郭岩山丝栗栲天然林作为采样地点, 未来还需在更深层次和更多植物中进行研究。

参考文献

- [1] CORNELISSEN J H C, LAVOREL S, GARNIER E, et al. A handbook of protocols for standardised and easy measurement of plant functional traits worldwide [J]. *Aust J Bot*, 2003, 51(4): 335. doi: 10.1071/BT02124.
- [2] KOU L, JIANG L, FU X L, et al. Nitrogen deposition increases root production and turnover but slows root decomposition in *Pinus elliottii* plantations [J]. *New Phytol*, 2018, 218(4): 1450–1461. doi: 10.1111/nph.15066.
- [3] WEI X, ZHANG G Z. Progress and prospect in the main research realms of tree fine roots [J]. *Chin Agric Sci Bull*, 2008, 24(5): 143–147.
- 卫星, 张国珍. 树木细根主要研究领域及展望 [J]. *中国农学通报*, 2008, 24(5): 143–147.
- [4] QI D H, WEN Z M, Y S S, et al. Trait-based responses and adaptation of *Artemisia sacrorum* to environmental changes [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2015, 26(7): 1921–1927. doi: 10.13287/j.1001-9332.20150506.016.
- 威德辉, 温仲明, 杨士梭, 等. 基于功能性状的铁杆蒿对环境变化的响应与适应 [J]. *应用生态学报*, 2015, 26(7): 1921–1927. doi: 10.13287/j.1001-9332.20150506.016.
- [5] QUAN W, YU S N, WANG G B, et al. Seasonal variations of fine root special root length along an elevation gradient in the Wuyi Mountains of southeastern China [J]. *J Nanjing For Univ Nat Sci Ed*, 2011, 35(6): 139–142. doi: 10.3969/j.issn.1000-2006.2011.06.028.
- 权伟, 余少娜, 王国兵, 等. 武夷山不同海拔植被土壤细根比根长季节动态 [J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2011, 35(6): 139–142. doi: 10.3969/j.issn.1000-2006.2011.06.028.
- [6] SIERRA C N, HERTEL D, BECKER J N, et al. Biomass, morphology, and dynamics of the fine root system across a 3000-m elevation gradient on Mt. Kilimanjaro [J]. *Front Plant Sci*, 2020, 11: 13. doi: 10.3389/fpls.2020.00013.
- [7] DING J X, KONG D L, ZHANG Z L, et al. Climate and soil nutrients differentially drive multidimensional fine root traits in ectomycorrhizal-dominated alpine coniferous forests [J]. *J Ecol*, 2020, 108(6): 2544–2556. doi: 10.1111/1365-2745.13407.
- [8] YAO J, LI Y, WEI L P, et al. Changes of allometric relationships among leaf traits in different ontogenetic stages of *Acer mono* from different types of forests in Donglingshan of Beijing [J]. *Acta Ecol Sin*, 2013, 33(13): 3907–3915. doi: 10.5846/stxb201210011367.
- 姚婧, 李颖, 魏丽萍, 等. 东灵山不同林型五角枫叶性状发育速生关系随发育阶段的变化 [J]. *生态学报*, 2013, 33(13): 3907–3915. doi: 10.5846/stxb201210011367.
- [9] ZHOU Y J, CHENG L, WANG M T, et al. Seasonal changes of fine root traits in *Pinus taiwanensis* Hayata at different altitudes in the Wuyi Mountains [J]. *Acta Ecol Sin*, 2019, 39(12): 4530–4539. doi: 10.5846/stxb201806211367.
- 周永姣, 程林, 王满堂, 等. 武夷山不同海拔黄山松细根性状季节变化 [J]. *生态学报*, 2019, 39(12): 4530–4539. doi: 10.5846/stxb201806211367.
- [10] YANG H M, WANG D M. Advances in the study on ecological stoichiometry in grass-environment system and its response to environmental factors [J]. *Acta Pratac Sin*, 2011, 20(2): 244–252.
- 杨惠敏, 王冬梅. 草-环境系统植物碳氮磷生态化学计量学及其对环境因子的响应研究进展 [J]. *草业学报*, 2011, 20(2): 244–252.
- [11] KRAFT N J B, VALENCIA R, ACKERLY D D. Functional traits and niche: Based tree community assembly in an Amazonian forest [J]. *Science*, 2008, 322(5901): 580–582. doi: 10.1126/science.1160662.
- [12] HONG T. $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ Traits of dominant trees and their responses to elevations in Lingshi Mountain of southeastern coastal zone [D]. Fuzhou: Fujian agriculture and Forestry University, 2013: 1–138.
- 洪滔. 东南海岸带灵石山优势树种种氮、碳同位素的海拔结构与海拔环境响应 [D]. 福州: 福建农林大学, 2013: 1–138.
- [13] YU L Z, DING G Q, ZHU J J, et al. Effects of fertilization on fine root biomass of *Larix kaempferi* plantation [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2007, 18(4): 713–720.
- 于立忠, 丁国泉, 朱教君, 等. 施肥对日本落叶松人工林细根生物量的影响 [J]. *应用生态学报*, 2007, 18(4): 713–720.
- [14] YANG L Y, LUO T X, WU S T. Fine root biomass and its depth distribution across the primitive Korean pine and broad-leaved forest and its secondary forests in Changbai Mountain, northeast China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2007, 27(9): 3609–3617. doi: 10.3321/j.issn:1000-0933.2007.09.008.
- 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 [J]. *生态学报*, 2007, 27(9):

- 3609–3617. doi: 10.3321/j.issn:1000-0933.2007.09.008.
- [15] XIANG L, CHEN F Q, GENG M Y, et al. Response of leaf functional traits of shrubs to altitude in *Rhododendron latoucheae* communities in Mt. Jinggangshan, Jiangxi, China [J]. *J Trop Subtrop Bot*, 2019, 27(2): 129–138. doi: 10.11926/jtsb.3930.
- 向琳, 陈芳清, 耿梦娅, 等. 井冈山鹿角杜鹃群落灌木层植物叶功能性状对海拔梯度的响应 [J]. *热带亚热带植物学报*, 2019, 27(2): 129–138. doi: 10.11926/jtsb.3930.
- [16] HUANG L, WENG X Q, HOU L H, et al. Effects of different forms of nitrogen and potassium nutrition on growth and nitrogen absorption of *Castanopsis fargesii* seedlings [J]. *J CS Univ For Technol*, 2019, 39(9): 39–47. doi: 10.14067/j.cnki.1673-923x.2019.09.007.
- 黄玲, 翁贤权, 侯利涵, 等. 不同形态氮及钾营养对栲树苗生长和氮吸收的影响 [J]. *中南林业科技大学学报*, 2019, 39(9): 39–47. doi: 10.14067/j.cnki.1673-923x.2019.09.007.
- [17] XU Y Y, ZHANG S, LI J F, et al. Studies on the species diversity of *Castanopsis fagassii* community at different elevation gradient in Guoyanshan Nature Reserve [J]. *For Prosp Des*, 2019, 39(2): 1–5.
- 许瑶瑶, 张硕, 李剑飞, 等. 郭岩山自然保护区不同海拔梯度栲树群落物种多样性研究 [J]. *林业勘察设计*, 2019, 39(2): 1–5.
- [18] LI L S. Distribution pattern of fine roots and soil moisture characteristics of rain-fed jujube plantation in hilly area of Loess Plateau [D]. Yangling: Northwest Agriculture and Forestry University, 2016: 1–111.
- 李陆生. 山地旱作枣园细根分布格局及其土壤水分生态效应 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016: 1–111.
- [19] JIANG S G. Review on soil bulk density determination method [J]. *Hubei Agric Sci*, 2019, 58(S2): 82–86. doi: 10.14088/j.cnki.issn0439-8114.2019.S2.017.
- 江胜国. 国内土壤容重测定方法综述 [J]. *湖北农业科学*, 2019, 58(S2): 82–86. doi: 10.14088/j.cnki.issn0439-8114.2019.S2.017.
- [20] DING J, WU Q, YAN H, et al. Effects of topographic variations and soil characteristics on plant functional traits in a subtropical evergreen broad-leaved forest [J]. *Biodiv Sci*, 2011, 19(2): 158–167. doi: 10.3724/SP.J.1003.2011.10312.
- 丁佳, 吴茜, 闫慧, 等. 地形和土壤特性对亚热带常绿阔叶林内植物功能性状的影响 [J]. *生物多样性*, 2011, 19(2): 158–167. doi: 10.3724/SP.J.1003.2011.10312.
- [21] MORRIS C. Multivariate analysis of ecological data using Canoco 5, 2nd edition [J]. *Afr J Range For Sci*, 2015, 32(4): 289–290. doi: 10.2989/10220119.2015.1015053.
- [22] SHI Y, WEN Z M, GONG S H. Comparisons of relationships between leaf and fine root traits in hilly area of the Loess Plateau, Yanhe River Basin, Shaanxi Province, China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2011, 31(22): 6805–6814.
- 施宇, 温仲明, 龚时慧. 黄土丘陵区植物叶片与细根功能性状关系及其变化 [J]. *生态学报*, 2011, 31(22): 6805–6814.
- [23] ZHANG Y Q. Effects of environmental factors on plant functional traits and the relationship between functional traits in Taishan woody plants [D]. Ji'nan: Shandong University, 2014: 1–83.
- 张月强. 探究泰山木本植物功能性状间的关系及对环境因子的响应 [D]. 济南: 山东大学, 2014: 1–83.
- [24] PREGITZER K S, KING J S, BURTON A J, et al. Responses of tree fine roots to temperature [J]. *New Phytol*, 2000, 147(1): 105–115. doi: 10.1046/J.1469-8137.2000.00689.X.
- [25] ZHAO G J. Response of root morphological characteristics to soil water change of two native species in Loess Hilly-gully region under intercropping [D]. Yangling: Northwest Agricultural & Forestry University, 2014: 1–54.
- 赵国靖. 黄土丘陵区两乡土草混播下根系形态特征及其对土壤水分变化的响应 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014: 1–54.
- [26] XU Y. Fine root morphology anatomy and tissue nitrogen and carbon of the first five order roots in twenty-seven Chinese tropical hardwood tree species [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2011: 1–63.
- 许旻. 中国热带 27 个阔叶树种不同根序细根的形态特征、解剖结构和碳氮研究 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2011: 1–63.
- [27] MEI L, WANG Z Q, HAN Y Z, et al. Distribution patterns of *Fraxinus mandshurica* root biomass, specific root length and root length density [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2006, 17(1): 1–4.
- 梅莉, 王政权, 韩有志, 等. 水曲柳根系生物量、比根长和根长密度的分布格局 [J]. *应用生态学报*, 2006, 17(1): 1–4.
- [28] YIN Y P, ZHANG Y Q, SHEN Y H, et al. Screening of soybean genotype with high phosphorus efficiency using root morphology and architecture [J]. *Mol Plant Breed*, 2015, 13(5): 999–1008. doi: 10.13271/j.mpb.013.000999.
- 尹元萍, 张雅琼, 申毓晗, 等. 利用根系形态构型筛选磷高效大豆基因型 [J]. *分子植物育种*, 2015, 13(5): 999–1008. doi: 10.13271/j.mpb.013.000999.
- [29] LIU W. Effects of soil bulk density on hydraulic conductivity of maize roots under drying and wet conditions [J]. *Acta Pedol Sin*, 2003, 40(5): 779–782.
- 刘晚. 干湿条件下土壤容重对玉米根系导水率的影响 [J]. *土壤学报*, 2003, 40(5): 779–782.
- [30] MATERECHERA S A, DEXTER A R, ALSTON A M. Penetration of very strong soils by seedling roots of different plant species [J]. *Plant Soil*, 1991, 135(1): 31–41. doi: 10.1007/BF00014776.
- [31] AERTS R, CHAPIN III F S. The mineral nutrition of wild plants

- revisited: A re-evaluation of processes and patterns [J]. *Adv Ecol Res*, 1999, 30: 1–67. doi: 10.1016/S0065-2504(08)60016-1.
- [32] WANG Q C, CHENG Y H. Response of fine roots to soil nutrient spatial heterogeneity [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2004, 15(6): 1063–1068.
王庆成, 程云环. 土壤养分空间异质性与植物根系的觅食反应 [J]. *应用生态学报*, 2004, 15(6): 1063–1068.
- [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 [J]. *Alpine Bot*, 2011, 121(2): 107–112. doi: 10.1007/s00035-011-0092-6.
- [34] GAN Y W, LI L, LI L H, et al. Study of root distribution of walnut/wheat intercropping system in southern Xinjiang [J]. *Acta Agric Bor Sin*, 2015, 24(3): 102–110. doi: 10.7606/j.issn.1004-1389.2015.03.016.
甘雅文, 李隆, 李鲁华, 等. 新疆核桃间作冬麦复合系统根系分布特征研究 [J]. *西北农业学报*, 2015, 24(3): 102–110. doi: 10.7606/j.issn.1004-1389.2015.03.016.
- [35] FRANSEN B, DE KROON H, BERENDSE F. Root morphological plasticity and nutrient acquisition of perennial grass species from habitats of different nutrient availability [J]. *Oecologia*, 1998, 115(3): 351–358. doi: 10.1007/s004420050527.
- [36] YAN H, SU Y Q, ZHU Y Y, et al. Distribution characters of fine root of *Populus* plantation and its relation to properties of soil in the northern slope of Qinling Mountains [J]. *J Nanjing For Univ (Nat Sci)*, 2009, 33(2): 85–89. doi: 10.3969/j.issn.1000-2006.2009.02.021.
燕辉, 苏印泉, 朱昱燕, 等. 秦岭北坡杨树人工林细根分布与土壤特性的关系 [J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2009, 33(2): 85–89. doi: 10.3969/j.issn.1000-2006.2009.02.021.
- [37] 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 Ecol Sin*, 2020, 40(2): 719–727. doi: 10.5846/stxb201901250192.
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. doi: 10.5846/stxb201901250192.