

# 黄土区辽东栎群落细根生物量对物种多样性及气候的响应

邓 磊<sup>1,3</sup>,关晋宏<sup>2\*</sup>,高万里<sup>4</sup>,杜 盛<sup>2</sup>,张文辉<sup>2</sup>,朱春云<sup>1,3</sup>

(1. 青海大学 农林科学院,青海 西宁 810016;2. 西北农林科技大学 林学院,陕西 杨陵 712100;  
3. 青海高原林木遗传育种重点实验室,青海 西宁 810016;4. 青海省大通县东峡林场,青海 西宁 810104)

**摘要:**以陕西黄龙、甘肃子午岭、宁夏六盘山和青海孟达辽东栎(*Quercus liaotungensis*)次生中龄林为研究对象,采用根钻取土芯法收集细根,分析群落细根生物量分布的差异,以及与群落物种多样性和气候的相互关系。结果表明,黄土区辽东栎分布中心的黄龙和子午岭地区群落细根生物量显著高于分布边缘的六盘山和孟达地区( $P<0.05$ );群落细根主要集中在0~20 cm 表层土壤中,占细根总生物量的60%~80%。黄龙地区细根生物量最大( $821.58 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ )、孟达地区细根生物量最小( $495.30 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ )。分析还表明,辽东栎林0~20 cm 活细根生物量、0~20 cm 死细根生物量与群落丰富度指数、Shannon-Wiener 多样性指数、Simpson 多样性指数、Pielou 均匀度指数和年均温呈正相关;与较高的降雨量、海拔呈负相关。不同地区辽东栎群落细根分布的差异表明群落地下生物量分配模式不同,需要在今后研究中深入探索分配差异的机理,为物种多样性影响生态系统碳循环的激发效应提供基础。

**关键词:**辽东栎;细根生物量;群落物种多样性;黄土区;经度变化

**中图分类号:**S792.18      **文献标志码:**A      **文章编号:**1001-7461(2018)05-0016-07

Effects of Species Diversity and Environmental Gradients on Fine Root Biomass of  
*Quercus liaotungensis* Forest in the Loess Region

DENG Lei<sup>1,3</sup>, GUAN Jin-hong<sup>2\*</sup>, GAO Wan-li<sup>4</sup>, DU Sheng<sup>2</sup>, ZHANG Wen-hui<sup>2</sup>, ZHU Chun-yun<sup>1,3</sup>

(1. Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Qinghai University, Xining, Qinghai 810016, China;  
2. College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;  
3. Qinghai Plateau Key Laboratory of Tree Genetics and Breeding, Xining, Qinghai 810016, China;  
4. Dongxia Forestry Farm in Datong County of Qinghai Province, Xining, Qinghai 810104, China)

**Abstract:**Fine roots (diameter $\leqslant 2 \text{ mm}$ ) contribute significantly to carbon cycling in forest ecosystems because they compromise a large fraction of annual net primary production. However, effects of both species diversity and environmental gradients on fine root biomass have less been investigated. In this contribution, a set of 12 sample plots were conducted in middle-aged *Quercus liaotungensis* forest in 4 regions of Huanglong Mountains (Shaanxi), Ziwuling Mountains (Gansu), Liupanshan Mountains (Ningxia) and Mengda Nature Reserve (Qinghai) across the Loess region. Fine roots were collected using a cylindrical (9 cm diameter) soil corer in each sample plot. The vertical distribution of fine root biomass in different sites and their relationships with community diversity and environmental factors were analyzed. The results showed that the total fine root biomass of the central distribution area in Huanglong Mountains and Ziwuling Mountains were significantly higher than those in the marginal distribution area in Liupanshan Mountains and Mengda ( $P<0.05$ ). Fine root biomass was mainly distributed in 0—20 cm soil layers, which accounted

收稿日期:2017-12-01 修回日期:2018-03-14

基金项目:中国博士后科学基金(2015M580877);国家重点研发计划“高寒丘陵区林草植被的结构优化与功能提升技术”(2017YFC0504604);青海省农林科学院创新基金(2017-NKY-02)。

作者简介:邓 磊,男,博士,助理研究员,研究方向:森林培育和森林生态恢复。E-mail:pebbledeng@sina.com

\* 通信作者:关晋宏,女,博士,研究方向:全球变化生态学。E-mail:cocogjh@163.com

for 60%—80% of the total fine root biomass. The highest fine root biomass was existed in Huanglong Mountains ( $821.58 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ) while the lowest was in Mengda ( $495.30 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ). Redundancy analysis showed that there was a significant relationship between species richness, Shannon-Wiener index, Simpson index, Pielou index and 0—20 cm fine root biomass and necromass, whereas a negative relationship between precipitation, elevation and 0—20 cm fine root biomass. We concluded that patterns of belowground biomass allocation differed from regions, more attention should be paid to the mechanism about the effects of species diversity on the priming effect in forest ecosystem carbon cycling.

**Key words:** *Quercus liaotungensis*; fine root biomass; community diversity; Loess region; longitudinal gradient

细根作为植物最活跃和最敏感的功能器官<sup>[1]</sup>,由于具有较大的表面积和较强的生理活性,对植物生长和发育起着重要的作用<sup>[2-4]</sup>。森林生态系统中,水分和养分通常在土壤表层积累较多<sup>[5]</sup>,细根作为植物吸收养分和水分的主要器官,为了获得更多的生长资源,主要分布在土壤表层,并随着土壤深度的增加逐渐减少<sup>[6-7]</sup>。研究表明,细根生物量与植物的年龄、生境和外界干扰等因素有关<sup>[8-11]</sup>。因此,植物细根的分布通常依赖于环境的有效性。

黄土区是一个比较明确的区域概念。在自然状态下,只要地表覆盖有黄土的地域都属于黄土区<sup>[12-14]</sup>。黄土区自东向西,群落物种组成和气候均表现出明显的区域变化特征。辽东栎(*Quercus liaotungensis*)是我国分布范围最广的落叶阔叶树种之一,也是黄土区重要的地带性森林植被<sup>[15]</sup>,具有不可替代的生态价值。黄土区中部向西形成了一个辽东栎群落由分布中心到分布边缘的逐步过渡区,分布中心树体高大通直,分布边缘树体低矮,主干弯曲且多分叉。研究表明,水热的差异是限制黄土区辽东栎群落发育的主要因子<sup>[16-19]</sup>,其中细根对环境感应最直接,但单一区域的研究很难反映辽东栎细根对生态因子的响应状况,关于黄土区辽东栎细根生物量的时空变异性、对群落物种多样性差异的敏感性及大尺度对气候的响应等方面研究并不深入。

区域环境的差异导致了群落物种多样性的差异<sup>[20]</sup>,相同的植被建群种在不同地区有着不相同的群落组成,而这些差异正是物种对特定环境长期适应的结果<sup>[21-22]</sup>。黄土区大尺度经度变化下的辽东栎林有着不同的群落结构,而在群落发育过程中,群落物种多样性起着重要的作用,这是联系森林植被与地下物质循环的关键环节。细根生物量是森林群落和土壤资源共同作用的结果,这也有助于预测森林碳循环。本研究沿 $35^{\circ}\text{N}$ 由辽东栎分布中心(黄龙)经子午岭、六盘山到分布最西端(孟达)设置调查样地,分析辽东栎在经度变化下细根生物量对群落物种多样性及气候的响应,对阐明辽东栎适应力和生

存力具有重要意义,为黄土区植被建设提供理论依据,服务于区域植被管理。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

根据辽东栎分布的生境差异,结合前人的研究资料<sup>[16-17,23]</sup>,通过野外踏查,沿 $35^{\circ}\text{N}$ 在陕西黄龙山林区、甘肃子午岭林区、宁夏六盘山林区和青海孟达林区,选择立地条件较好、林分一致、林相整齐的阴坡地段设置辽东栎群落研究调查样地,具体布设时,充分考虑不同群落组成、生境条件和人为破坏等因素的代表性。

黄龙辽东栎研究区选择在陕西延安黄龙山林区蔡家川林场,地理位置 $35^{\circ}28'\text{N}, 109^{\circ}31'\text{E}$ ,海拔 $1\,412\sim1\,485\text{ m}$ 。属暖温带半湿润与半干旱气候的过渡区,年平均降水量 $563.9\text{ mm}$ ,年平均气温 $8.6^{\circ}\text{C}$ , $\geqslant10^{\circ}\text{C}$ 的有效积温 $2\,953^{\circ}\text{C}$ 。地带性植被是暖温带落叶阔叶林,辽东栎林是当地分布面积最大发育最好的天然次生林之一。林地内主要伴生树种有山杨(*Populus davidiana*)、白桦(*Betula platyphylla*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)等。常见灌木有胡颓子(*Elaeagnus umbellata*)、胡枝子(*Lespedeza dahurica*)、黄蔷薇(*Rosa rugosa*)、葱皮忍冬(*Lonicera ferdinandii*)等。草本有苔草(*Carex lancedata*)、羊茅(*Festuca ovina*)、铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)、紫苑(*Aster tataricus*)等。土壤类型主要是森林褐土。

子午岭辽东栎研究区选择在甘肃庆阳市合水林业总场连家砭林场,地理位置 $35^{\circ}37'\text{N}, 108^{\circ}43'\text{E}$ ,海拔 $1\,345\sim1\,460\text{ m}$ 。属暖温带半湿润与半干旱气候的过渡区,年平均降水量 $608.5\text{ mm}$ ,年平均气温 $7^{\circ}\text{C}$ , $\geqslant10^{\circ}\text{C}$ 的有效积温 $2\,671^{\circ}\text{C}$ 。该区为落叶阔叶林带的北部边缘地带,辽东栎林是当地优势天然次生林之一。林地内主要伴生树种有山杨、白桦、油松等。常见灌木有多花胡枝子(*L. floribunda*)、土庄绣线菊(*Spiraea pubescens*)、黄蔷薇等。草本有苔

草、铁杆蒿、艾蒿(*A. argyi*)等。土壤类型主要是石灰性褐土。

六盘山辽东栎研究区选择在宁夏六盘山国家级自然保护区,地理位置 $35^{\circ}17'N, 106^{\circ}11'E$ ,海拔 $1\,840\sim2\,220\text{ m}$ 。属暖温带半湿润与半干旱气候的过渡区,年平均降水量 $676\text{ mm}$ ,年平均气温 $5.8^{\circ}\text{C}$ 。 $\geqslant10^{\circ}\text{C}$ 的有效积温 $1\,846.6^{\circ}\text{C}$ 。本区为森林区向森林草原的过渡地段,辽东栎林是当地主要天然次生林和地带性植被。林地内主要伴生树种有红桦(*B. albo-sinensis*)、白桦、糙皮桦(*B. utilis*)、山杨等。常见灌木有沙棘(*Hippophae rhamnoides*),虎榛子(*Ostryopsis davidiana*)、灰栒子(*Cotongaster acutifolius*)、秦岭小檗(*Berberis cinumsenata*)等。草本

有苔草、铁杆蒿等。土壤类型主要是石灰性褐土。

孟达辽东栎研究区选择在青海孟达国家级自然保护区,地理位置 $35^{\circ}43'N, 102^{\circ}41'E$ ,海拔 $1\,950\sim2\,360\text{ m}$ 。属暖温带半湿润与半干旱气候的过渡区,年平均降水量 $622.7\text{ mm}$ ,年平均气温为 $5.4^{\circ}\text{C}$ 。 $\geqslant10^{\circ}\text{C}$ 的有效积温 $1\,597.2^{\circ}\text{C}$ 。本区为辽东栎在黄土区分布的最边缘,辽东栎林斑块化分布在沟顶,多为次生林。林地内主要伴生树种有山杨、红桦等。常见灌木有虎榛子、灰栒子、陕西莢蒾(*Viburnum schensianum*)、甘肃小檗(*B. kansuensis*)等。草本有苔草、黃精(*Polygonatum sibiricum*)、二裂委陵菜(*Potentilla bifurca*)等。土壤类型主要是灰钙土。

由分布中心到分布边缘的辽东栎林概况见表1。

表 1 样地概况

Table 1 General information of sample plots

| 项目                          | 黄龙                       | 子午岭                       | 六盘山                      | 孟达                       |
|-----------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 坡向                          | NW10~40                  | EW20~50                   | NW35~50                  | NW20~40                  |
| 坡位/(°)                      | 17~27                    | 10~22                     | 7~11                     | 2~21                     |
| 平均高度/m                      | $9.46\pm0.41\text{a}$    | $7.6\pm0.37\text{b}$      | $5.89\pm0.18\text{c}$    | $4.2\pm0.92\text{d}$     |
| 平均胸径/cm                     | $20.07\pm2.33\text{a}$   | $14.6\pm1.97\text{b}$     | $12.2\pm1.26\text{c}$    | $10.2\pm0.79\text{d}$    |
| 平均冠幅/ $\text{m}^2$          | $3.92\times3.69\text{a}$ | $3.66\times3.47\text{ab}$ | $3.15\times2.95\text{b}$ | $2.73\times2.36\text{c}$ |
| 林分密度/(个· $\text{hm}^{-2}$ ) | $939\pm37\text{a}$       | $980\pm43\text{ab}$       | $1013\pm57\text{ab}$     | $964\pm46\text{a}$       |
| 郁闭度                         | $0.66\pm0.02\text{a}$    | $0.65\pm0.03\text{a}$     | $0.57\pm0.08\text{a}$    | $0.61\pm0.05\text{a}$    |
| 林龄/a                        | 63                       | 64                        | 56                       | 60                       |

注:同行相同字母表示无显著性差异,不同字母表示有显著性差异( $P<0.05$ )。

## 1.2 研究方法

1.2.1 样地设置 样地的调查工作在2016年7—8月进行。通过充分的实地踏查,考虑不同群落、生境和干扰等因子的代表性,分别在黄龙、子午岭、六盘山和孟达4个地区,在阴坡选择生长较好、林龄在 $56\sim64\text{ a}$ 的辽东栎次生林设置样地。其中,样地地理坐标和海拔用Magellan GPS315测定;坡向和坡度用手持罗盘测定;土壤类型根据Food and Agriculture Organization (FAO)标准目测确定;利用生长锥对样地内胸径 $>$ 平均胸径的10株辽东栎乔木进行钻芯取样,确定林龄。每个地区设置样地3块,共完成样地12块。样地内分别沿对角线设置5个灌木样方和5个草本样方。样地面积乔木 $20\text{ m}\times20\text{ m}$ ,灌木 $5\text{ m}\times5\text{ m}$ ,草本 $1\text{ m}\times1\text{ m}$ 。

1.2.2 群落细根生物量测定 在样地的上、中、下部用内径为 $9\text{ cm}$ 土钻随机布设9个采样点,每个样地采集 $0\sim20\text{ cm}, 20\sim40\text{ cm}$ 的土芯9个,取好的样品按样地分装并标记。将样品置于孔径为 $0.2\text{ mm}$ 筛内,用流动水浸泡、漂洗,后用游标卡尺分拣出直径 $\leqslant2\text{ mm}$ 的细根,根据外形、颜色、弹性、根皮与中柱分离的难易程度区分死根和活根,将各组细根在 $70^{\circ}\text{C}$ 烘箱中烘干至恒重,换算出单位面积细根现存量<sup>[24]</sup>。

1.2.3 群落物种多样性测定 以样地为单位,根据样地调查所得不同物种相对盖度、相对多度和相对频度计算林下物种的重要值,再统计出同一种群中各物种的重要值平均值,计算群落物种的丰富度指数、多样性指数和均匀度指数。以重要值作为物种多样性的测度依据<sup>[25~26]</sup>,避免以单一的物种个体数来测度物种多样性指标导致的偏差。本研究采用以下几种常用的测度方法。各指数计算公式如下:

Species richness 丰富度指数( $S$ )=出现在样地中的物种数 (1)

Shannon-Wiener 多样性指数( $H'$ ):

$$H' = -\sum P_i \ln P_i \quad (2)$$

Simpson 多样性指数( $D$ ):

$$D = 1 - \sum n_i(n_i - 1)/N(N-1) \quad (3)$$

Pielou 均匀度指数( $J_{sw}$ ):

$$J_{sw} = (-\sum P_i (\ln P_i / \ln S)) \quad (4)$$

Alatalo 均匀度指数( $E_a$ ):

$$E_a = (1 / \sum P_i - 1 / [(\exp(\sum P_i / \ln S))] \quad (5)$$

式中, $P_i$ 为种*i*的相对重要值; $N_i$ 为种*i*的重要值; $N$ 为种*i*所在样方的各物种重要值之和。

1.2.4 数据分析 按地理区域将同一地区样地数据合并,取平均值。采用Microsoft Excel进行数据

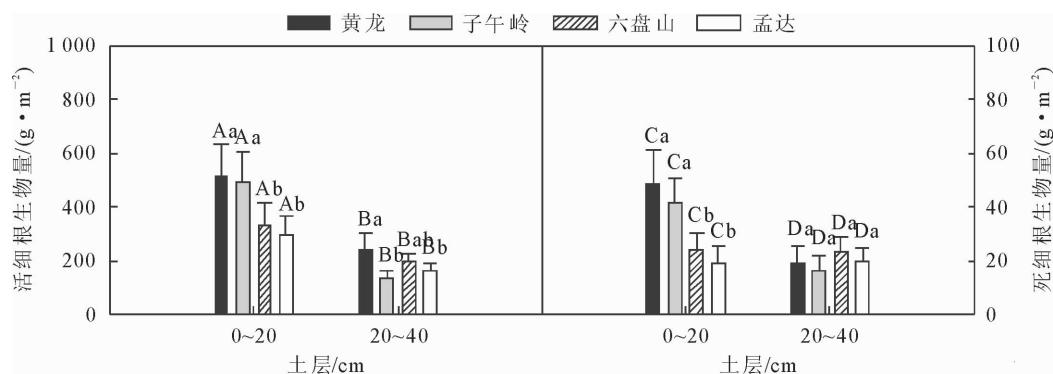
的初步计算及处理(平均数、标准差等)。采用 SigmaPlot 软件进行图形处理。SPSS 软件对不同地区不同深度的细根进行单因素方差分析(one-way ANOVA), CANOCO for Windows 软件进行 RDA 分析(Redundancy Discriminate Analysis)。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同地区辽东栎群落细根生物量的变化

不同地区辽东栎林群落活细根生物量、死细根生物量均随土壤深度的增加逐渐降低;活细根生物量和死细根生物量在同一地区不同土层间均有显著

差异( $P<0.05$ )。黄龙地区和子午岭地区在 0~20 cm 土层中活细根生物量和死细根生物量显著高于六盘山地区和孟达地区( $P<0.05$ );黄龙地区 20~40 cm 土层中活细根生物量显著高于孟达地区( $P<0.05$ ),但与子午岭地区和六盘山地区辽东栎活细根生物量无显著差异;4 个地区 20~40 cm 土层中死细根生物量无显著差异。不同地区辽东栎林均有 60%~80% 的细根生物量集中在 0~20 cm 土层中,黄龙、子午岭、六盘山和孟达辽东栎林 0~20 cm 土层细根生物量占 0~40 cm 土层细根总生物量的比例依次是 68.57%、78.04%、61.44% 和 63.30%(图 1)。



注:不同小写字母表示同一深度不同地区细根生物量差异显著( $P<0.05$ );不同大写字母表示同一地区不同深度细根生物量差异显著( $P<0.05$ )。

图 1 不同地区细根生物量的垂直分布(平均值±标准偏差, $n=9$ )

Fig. 1 Vertical distribution of fine root biomass in different regions (mean±SD,  $n=9$ )

地域差异显著影响辽东栎群落细根生物量( $P<0.05$ )。本研究中群落细根总生物量在黄龙地区最大,为  $821.58 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ,并随着辽东栎分布中心到分布边缘有所减少,最低在孟达地区,为  $495.30 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ,降低了 39.71%;活细根生物量在黄龙地区最大,为  $753.99 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ,分布边缘的孟达地区只有  $456.67 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ,降低了 39.43%;死细根生物量在分布中心的黄龙地区为  $67.59 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ,分布边缘的孟达地区只有  $38.64 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ,降低了 42.84%。辽东栎由分布中心到分布边缘细根周转速率降低,这可能与植株内部生物量分配比例有关,是植物对不同环境的一种适应策略(图 2)。

### 2.2 不同地区辽东栎群落物种多样性的变化

$S$  指数、 $H'$  指数、 $D$  指数和  $J_{sw}$  指数表现出从分布中心到边缘逐渐减小的变化趋势。 $E_a$  指数呈现出先升高再减小的趋势,六盘山地区  $E_a$  指数最高(图 3)。 $J_{sw}$  指数和  $E_a$  指数的变化出现分异现象,主要与群落内种群的绝对数量及其在群落的分布有关。均匀度指数强调个体在群落内的分布,群落内个体数分布越均匀,均匀度指数越高。 $J_{sw}$  指数的大小与物种丰富度( $S$  指数)有关,当  $S$  指数高时, $J_{sw}$  指数也高。不同地区辽东栎群落  $S$  指数分别为

23.5、21.5、18.5 和 18, $J_{sw}$  指数分别为 0.7876、0.7822、0.7756 和 0.7367。而  $E_a$  指数与物种丰富度无关,依次为 0.6100、0.6773、0.7139 和 0.6080。 $J_{sw}$  指数和  $E_a$  指数差异原因与其分布地生境有关,子午岭和六盘山辽东栎群落位于坡度较缓的山坡下部,立地条件较好,林分密度大(表 1),使得  $E_a$  指数相对较大。

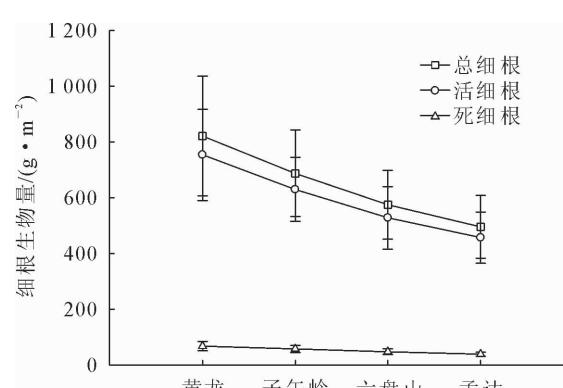


图 2 不同地区辽东栎林群落细根总生物量(平均值±标准偏差, $n=27$ )

Fig. 2 Total fine root biomass of *Q. liaotungensis* forest in different regions

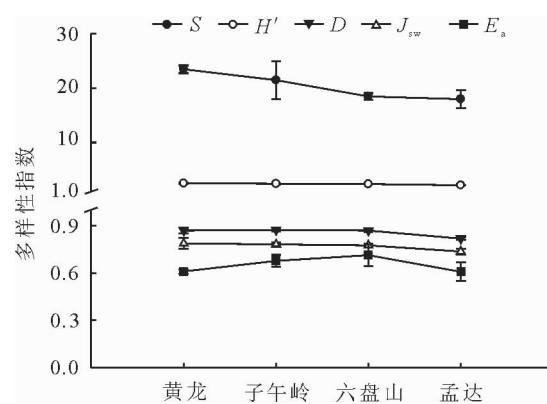


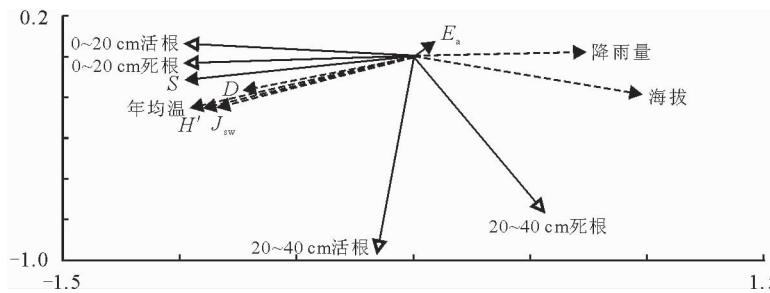
图 3 不同地区辽东栎林物种多样性指数

Fig. 3 Diversity indices of *Q. liaotungensis* in different regions

### 2.3 辽东栎群落细根生物量与物种多样性的关系

对不同地区辽东栎群落细根生物量与生态因子进行冗余分析(RDA)见图 4, RDA 分析结果对变量的解释量达到了 99%, 其中前两轴分别解释 81.7%

和 17.3%。对第 1 主分量贡献较高的生态因子包括海拔(矢量值 0.981 3)、 $S$ (-0.980 1)、年均温(-0.952 7)、 $H'$ (-0.907 2)、 $J_{sw}$ (-0.838 3)、降雨量(0.737 8)以及  $D$ (-0.730 2);而  $H'$ (-0.254 7)、年均温(-0.252 8)和  $J_{sw}$ (-0.251 7)对第 2 主分量贡献较大。通过 RDA 双序轴发现,  $S$ 、 $H'$ 、 $D$ 、 $J_{sw}$  和年均温与 0~20 cm 活细根生物量与 0~20 cm 死细根生物量的向量方向一致, 夹角较小, 表明具有较强的正相关; 而降雨量和海拔分别与 0~20 cm 活细根生物量与 0~20 cm 死细根生物量有较强的负相关。年均温和降雨量变化对群落细根生长出现的分异现象, 可能与不同地区生境差异有关。辽东栎群落由分布中心到边缘, 随着海拔的增高, 年均温和有效积温呈现降低的趋势, 与水分因素(降雨量)相比, 较好的温度条件更能促进植物发育, 进而承载较大的群落细根生物量。



注:向量的长度表示影响强度;箭头方向相同表示正相关, 方向相反表示负相关。

图 4 辽东栎细根生物量与生态因子分析双序图

Fig. 4 Biplots of the redundancy analysis (RDA) of fine root biomass and ecological factors

## 3 结论与讨论

### 3.1 不同地区辽东栎群落细根生物量变化的特点

黄土区由分布中心到分布边缘, 土壤 0~20 cm 表层细根生物量总体呈现减少的趋势。在辽东栎分布中心的黄龙地区和子午岭地区土壤表层聚集大量细根, 显著高于辽东栎分布边缘的六盘山地区和孟达地区。不同地区辽东栎细根生物量为 4.9~8.2 t·hm<sup>-2</sup>(图 2), 与单建平<sup>[27]</sup>等对温带阔叶林测定的细根生物量结果相符; 但高于耿鹏飞<sup>[28]</sup>等对小兴安岭森林细根生物量结果。原因是本研究只选择了 1 个生长周期中细根生物量最大的生长旺盛期, 因此存在对细根生物量高估的研究结果。同时, 各研究区域的群落结构、气候、林分密度、林龄和干扰因素不同<sup>[8-11, 29-30]</sup>, 进而导致不同地区林木细根生物量的差异。黄土区辽东栎细根分布具有明显的垂直特点, 随着土壤深度增加细根生物量逐渐减少(图 1), 这主要是受生境资源有效性在大尺度区域差异的影响。与深层相比, 表层土壤具有容重小和水分含量

高的特性, 这也为细根的生长提供了适宜的环境<sup>[31]</sup>。本研究与其他森林生态系统细根生物量垂直分布研究结果一致<sup>[6, 32-33]</sup>。

### 3.2 不同地区辽东栎群落物种多样性变化的特点

森林群落的结构是由物种间竞争和环境差异共同影响的<sup>[34-35]</sup>, 环境差异也会影响不同地理区域植物器官和物种多样性的差异<sup>[36-37]</sup>。本研究中, 4 个地区种群结构及群落物种多样性存在着很大的差异。辽东栎群落物种多样性指数黄龙和子午岭地区显著高于六盘山和孟达地区(图 3)。对辽东栎细根生物量与生态因子冗余分析表明, 黄土区 35°N 限制辽东栎生长和群落物种多样性的主要因素是温度; 但与张仰渠<sup>[18]</sup>对辽东栎林生长研究结果相反, 主要原因是纬度变化下辽东栎生长的主导因子是水分。大尺度环境的改变导致物种具有适应所处环境的独特生存策略<sup>[38]</sup>, 这也就解释了黄龙、子午岭、六盘山和孟达 4 个地区物种多样性差异的原因。本研究中, 较大的林分密度导致子午岭和六盘山辽东栎群落  $E_a$  指数增高。说明立地条件可改变辽东栎群

落数量,但不能改变群落多样性的分布格局。这与张小鹏<sup>[39]</sup>等对小陇山林区华山松林下植物多样性研究中,发现林下植物多样性和均匀度未随坡向变化表现出明显的规律性结论相符。

### 3.3 辽东栎群落细根生物量与物种多样性的关系分析

黄土区沿 35°N 大尺度经度变化下生态因子的差异,导致了辽东栎群落物种多样性的不相同。本研究表明,不同地区辽东栎群落物种多样性和气候的差异能够解释辽东栎群落细根生物量的差异。通过 RDA 分析,对辽东栎细根生物量贡献率较高的生态因子是群落丰富度指数(S)、Shannon-Wiener 多样性指数( $H'$ )、Simpson 多样性指数(D)、Pielou 均匀度指数( $J_{sw}$ )、年均温、降雨量和海拔。辽东栎林 0~20 cm 活细根生物量、0~20 cm 死细根生物量与群落丰富度指数(S)、Shannon-Wiener 多样性指数( $H'$ )、Simpson 多样性指数(D)、Pielou 均匀度指数( $J_{sw}$ )和年均温呈正相关;与较高的降雨量、海拔呈负相关(图 4)。这与耿鹏飞<sup>[28]</sup>等对小兴安岭森林细根生物量研究中发现群落丰富度高的森林类型其细根生物量高结论相符。植物根系与群落物种组成相互影响,不同物种多样性的群落充分利用空间获取资源<sup>[40-41]</sup>。不同地区辽东栎林细根分布的差异性表明群落地下生物量分配模式不同,需要在今后研究中深入探索分配差异的机理,为物种多样性影响生态系统碳循环的激发效应提供基础。

### 参考文献:

- [1] VOGT K A, VOGT D J, PALMIOTTO P A, et al. Review of root dynamics in forest ecosystems grouped by climate, climatic forest type and species[J]. *Plant and Soil*, 1995, 187(2): 159-219.
- [2] EISSENSTAT D M, YANAI R D. The ecology of root lifespan [J]. *Advances in Ecological Research*, 1997, 27: 1-60.
- [3] PREGITZER, KURT S. Fine roots of trees – a new perspective[J]. *New Phytologist*, 2002, 154(2): 267-270.
- [4] GUO D, MITCHELL R J, WITHERINGTON J M, et al.. Endogenous and exogenous controls of root life span, mortality and nitrogen flux in a longleaf pine forest: root branch order predominates[J]. *Journal of Ecology*, 2008, 96(4): 737-745.
- [5] BENNETT J N, ANDREW B, PRESCOTT C E. Vertical fine root distributions of western redcedar, western hemlock, and salal in old-growth cedar-hemlock forests on northern Vancouver island[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2002, 32 (7): 1208-1216.
- [6] 荆圣淇,赵传燕,方书敏,等. 陇中黄土高原主要造林树种细根生物量分布[J]. 应用生态学报,2014,25(7):1905-1911.
- [7] GUAN J H, ZHANG K D, DENG L, et al. Soil organic carbon density and relationship with species diversity in pedigree spruce at natural forest and plantation scales[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2016, 23(2): 49-54. (in Chinese)
- [8] LI J, JIANG X M, YIN H J, et al. Root exudates and soil microbes in three *Picea asperata* plantations with different stand ages[J]. *The Journal of Applied Ecology*, 2014, 51(2): 325-332.
- [9] YUAN Z Y, CHEN H Y H. Fine root dynamics with stand development in the boreal forest[J]. *Functional Ecology*, 2012, 26 (4): 991-998.
- [10] LIAO Y, MCCORMACK M L, FAN H, et al. Relation of fine root distribution to soil C in a *Cunninghamia lanceolata* plantation in subtropical China[J]. *Plant and Soil*, 2014, 381(1/2): 225-234.
- [11] ASAYE Z, ZEWIDIE S. Fine root dynamics and soil carbon accretion under thinned and un-thinned *Cupressus lusitanica* stands in southern Ethiopia[J]. *Plant and Soil*, 2013, 366(1/2): 261-271.
- [12] 杨勤业,张伯平,郑度. 关于黄土高原空间范围的讨论[J]. 自然资源学报,1988,3(1):9-15.
- [13] YANG Q Y, ZHANG B P, ZHENG D. On the boundary of the Loess Plateau[J]. *Journal of Natural Resources*, 1988, 3 (1): 9-15. (in Chinese)
- [14] ZHU X, LI Y, PENG X, et al. Soils of the Loess region in China[J]. *Geoderma*, 1983, 29(3): 237-255.
- [15] 刘东生. 黄土与环境[M]. 北京:科学出版社,1985.
- [16] YU X, ZHOU H, LUO T. Spatial and temporal variations in insect - infested acorn fall in a *Quercus liaotungensis* forest in north China[J]. *Ecological Research*, 2003, 18 (2): 155-164.
- [17] 康永祥. 黄土高原辽东栎群落生态研究[D]. 陕西杨陵:西北农林科技大学,2012.
- [18] 邓磊,张文辉,何景峰,等. 不同采伐强度对辽东栎幼苗更新的影响[J]. 西北林学院学报,2011,26(2):160-166.
- [19] DENG L, ZHANG W H, HE J F, et al. Effects of different cutting intensity on seedling regeneration of *Quercus liaotungensis*[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2011, 26 (2): 160-166. (in Chinese)
- [20] MARTEINSÓTTIR B. Seed rain and seed bank reveal that seed limitation strongly influences plant community assembly in grasslands[J]. *Plos One*, 2014, 9(7): 103352.
- [21] DU Y, MI X, LIU X, et al. The effects of ice storm on seed rain and seed limitation in an evergreen broad-leaved forest in east China[J]. *Acta Oecologica*, 2012, 39: 87-93.
- [22] GALÍNEZ G, ORTEGA-BAES P, SCOPEL A L, et al. The

- dynamics of three shrub species in a fire-prone temperate savanna: the interplay between the seed bank, seed rain and fire regime[J]. *Plant Ecology*, 2013, 214(1): 75-86.
- [23] 董瑞. 黄土高原辽东栎种群动态与生殖生态[D]. 西北农林科技大学, 2008.
- [24] 关晋宏. 甘肃森林生态系统固碳特征及与物种多样性关系研究[D]. 北京: 中国科学院, 2015.
- [25] 马克平, 刘玉明. 生物群落多样性的测度方法[J]. *生物多样性*, 1994, 2(4): 231-239.
- MA K P, LIU Y M. Measurement methods of biological diversity[J]. *Chinese Biodiversity*, 1994, 2(4): 231-239. (in Chinese)
- [26] 贺金生, 陈伟烈. 中国中亚热带东部常绿阔叶林主要类型的群落多样性特征[J]. *植物生态学报*, 1998, 22(4): 303-311.
- HE J S, CHEN W L. Community diversity of the main types of the evergreen broad-leaved forest in the eastern part of the middle subtropical China [J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 1998, 22(4): 303-311. (in Chinese)
- [27] 单建平, 陶大立, 王森, 等. 长白山阔叶红松林细根周转的研究[J]. *应用生态学报*, 1993, 4(3): 241-245.
- SHAN J P, THAO D L, WANG M, et al. Fine roots turnover in a broad-leaved Korean pine forest of Changbai Mountain [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1993, 4(3): 241-245. (in Chinese)
- [28] 耿鹏飞, 金光泽. 小兴安岭 4 种森林类型细根生物量的时空格局[J]. *林业科学*, 2016, 52(6): 140-148.
- GENG P F, JIN G Z. Spatial and temporal patterns of fine root biomass in four forest types in Xiaoxing'an Mountains [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2016, 52(6): 140-148. (in Chinese)
- [29] ZHOU Y, SU J, JANSSENS I A, et al. Fine root and litterfall dynamics of three Korean pine (*Pinus koraiensis*) forests along an altitudinal gradient[J]. *Plant and Soil*, 2014, 374(1/2): 19-32.
- [30] 盛浩, 周萍, 李洁, 等. 中亚热带山区深层土壤有机碳库对土地利用变化的响应[J]. *生态学报*, 2014, 34(23): 7004-7012.
- SHENG H, ZHOU P, LI J, et al. Response of deep soil organic carbon storage to land-use changes in subtropical Hilly Region of China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(23): 7004-7012. (in Chinese)
- [31] 董慧霞, 李贤伟, 张健, 等. 退耕地三倍体毛白杨林地细根生物量及其与土壤水稳定性团聚体的关系[J]. *林业科学*, 2007, 43(5): 24-29.
- DONG H X, LI X W, ZHANG J, et al. Biomass of fine root and its relationship with water\_stable aggregate in compound lands of triploid *Populus tomentosa* on lands converted from agricultural lands[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2007, 43(5): 24-29. (in Chinese)
- [32] 关晋宏, 杜盛, 程积民, 等. 甘肃省森林碳储量现状与固碳速率[J]. *植物生态学报*, 2016, 40(4): 304-317.
- GUAN J H, DU S, CHENG J M, et al. Current stocks and rate of sequestration of forest carbon in Gansu Province, China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2016, 40(4): 304-317. (in Chinese)
- [33] LIU C, XIANG W, LEI P, et al. Standing fine root mass and production in four Chinese subtropical forests along a succession and species diversity gradient[J]. *Plant and Soil*, 2013, 376(1/2): 445-459.
- [34] LAVOREL S, GARNIER E. Predicting changes in community composition and ecosystem functioning from plant traits: revisiting the Holy Grail[J]. *Functional Ecology*, 2002, 16(5): 545-556.
- [35] KERN C C, MONTGOMERY R A, REICH P B, et al. Harvest-created canopy gaps increase species and functional trait diversity of the forest ground-layer community[J]. *Forest Science*, 2014, 60(2): 335-344.
- [36] CORNWELL W K, ACKERLY D D. Community assembly and shifts in plant trait distributions across an environmental gradient in coastal California [J]. *Ecological Monographs*, 2009, 79(1): 109-126.
- [37] SWENSON N G. Partitioning the phylogenetic, functional, environmental, and spatial components of community diversity [J]. *Functional and Phylogenetic Ecology in R*: Springer, 2014: 173-187.
- [38] WESTOBY M, WRIGHT I J. Land-plant ecology on the basis of functional traits[J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2006, 21(5): 261-268.
- [39] 张小鹏, 王得祥, 张鹏, 等. 抚育间伐对小陇山林区华山松林下植物多样性的影响[J]. *西北林学院学报*, 2017, 32(2): 37-42.
- ZHANG X P, WANG D X, ZHANG P, et al. Effects of thinning on the diversity of undergrowth of *Pinus armandii* plantation in Xiaolong Mountainous region [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2017, 32(2): 37-42. (in Chinese)
- [40] LEI P, SCHERER-LORENZEN M, BAUHUS J. The effect of tree species diversity on fine-root production in a young temperate forest[J]. *Oecologia*, 2012, 169(4): 1105-1115.
- [41] BRASSARD B W, CHEN H Y H, CAVARD X, et al. Tree species diversity increases fine root productivity through increased soil volume filling[J]. *Journal of Ecology*, 2013, 101(1): 210-219.