浙 江 农 林 大 学 学 报，2018，**35**(1)：60–67
*Journal of Zhejiang A&F University*
doi:10.11833/j.issn.2095-0756.2018.01.008

# 板栗细根的空间分布格局及季节动态

谢明明，郭素娟，宋　影，张　丽，孙慧娟

（北京林业大学 省部共建森林培育与保护教育部重点实验室，北京 100083）

**摘要**：为探明板栗 *Castanea mollissima* 细根的空间分布和季节变化，以河北省迁西县北京林业大学经济林(板栗)育种与栽培实践基地 6 年生板栗树为研究对象，生长季内(4–10 月)，采用连续根钻法(内径为 8 cm)，分别在距树干 50 cm 和 100 cm 设取样点，各个样点处垂直方向分 3 层(0~20 ，20~40 和 40~60 cm)钻取土芯。研究了板栗细根根长密度和根质量密度的月动态变化及空间分布特征。结果表明：在生长过程中板栗细根季节变化差异显著($P<0.05$)，板栗细根根长密度月平均为 1 274.9 m·m$^{-3}$，在 6 月和 10 月有 2 个生长高峰，相比前 1 个月分别增加了 203.0 m·m$^{-3}$ 和 524.6 m·m$^{-3}$。细根根质量密度月平均值为 184.7 g·m$^{-3}$，有 2 个生长阶段(4–6 月和 9–10 月)，10 月增长较多，与 9 月相比增长了 39.5 g·m$^{-3}$。在垂直方向上，20~40 cm 土层中细根根长密度和根质量密度最大且季节变化最显著($P<0.05$)。水平方向上，距树干 100 cm 处根长密度和根质量密度大于距树干 50 cm 处。整体研究表明：板栗细根的空间分布和季节变化不仅受土壤垂直格局影响，还与树种生长规律密切相关。图 2 表 2 参 36

**关键词**：经济林学；板栗；细根；根长密度；根质量密度；空间分布；季节动态
**中图分类号**：S718.4；S664.2　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：2095-0756(2018)01-0060-08

# Spatial distribution and seasonal dynamics of fine roots of *Castanea mollissima*

XIE Mingming, GUO Sujuan, SONG Ying, ZHANG Li, SUN Huijuan

(Key Laboratory for Silviculture and Conservation of the Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

**Abstract**: To confirm the spatial distribution and seasonal dynamics of fine roots in the non-timber forest products breeding and cultivation practice base for *Castanea mollissima* (chestnut) of Beijing Forestry University in Qianxi, Hebei Province, the monthly dynamics and spatial distribution characteristics of fine root length density and dry weight density in a six-year-old chestnut plantation for the 0–20, 20–40, and 40–60 cm soil layers were studied using the soil coring method. Soil cores with a diameter of 8 cm were taken each month during the growing period (from April to October) about 50 and 100 cm away from the chestnut tree stem. Results showed that the fine root length density with a monthly average value of 1 274.9 m·m$^{-3}$ had two growth peaks. Compared to the previous month, June and October both had significant difference ($P<0.05$), which increased 203.0 m·m$^{-3}$ and 524.6 m·m$^{-3}$ separately. The fine root dry weight density had a monthly average value of 184.7 g·m$^{-3}$ and two growing periods from April to June and from September to October. The fine root dry weight density in October was 39.5 g·m$^{-3}$ higher compared to that in September ($P<0.05$). The value of the fine root length density and dry weight density reached a maximum and changed with the seasons most noticeably in the vertical direction of the 20–40 cm soil layer ($P<0.05$). Also, the fine root length density and dry weight density in the horizontal direction about 100 cm were greater than those about 50 cm ($P<0.05$). This

收稿日期：2017-01-20；修回日期：2017-03-04
基金项目："十二五"国家科技支撑计划项目(2013BAD14B0402)；国家林业公益性行业科研专项重大项目(201204401)
作者简介：谢明明，从事经济林(果树)栽培与利用研究。E-mail：1176410736@qq.com。通信作者：郭素娟，教授，从事经济林(果树)栽培与利用研究。E-mail：gwangzs@263.net

study indicated that spatial distribution and seasonal dynamics of fine roots likely resulted from spatial soil properties and the growth rule of *C. mollissima*. [Ch, 2 fig. 2 tab. 36 ref.]

Key words: cash forestry; *Castanea mollissima*; fine root; length density; biomass density; spatial distribution; seasonal dynamic

根系是植物吸收土壤水分和养分的重要营养器官，并通过自身周期性的衰老死亡和分解作用参与土壤生态过程[1]。根系的空间分布决定了林木吸收土壤水分和营养空间的大小[2]。林木新根数量、长度和有效吸收面积等决定了根系吸收水分和养分的能力[3-4]。而直径≤2 mm 的根，由于吸收表面积大、生理活性强等特点，在水分和养分吸收上发挥着重要的作用[5]。VOGT 等[6]研究表明：在植物生长季中，粗根变化不明显，细根的变化较为明显。对于经济林来说，根系是果树栽培的基础。果园改土、灌溉、施肥等基本栽培措施都要通过根系对地上部分产生影响[7]。根系对于提高果实品质也有影响。目前，对果树根系进行了大量研究，张劲松等[8]对太行山低山丘陵区石榴 *Punica granatum* 吸水根的研究表明：石榴吸水根在垂直方向上主要集中在 0~80 cm，水平方向上主要集中在 0~100 cm。云雷等[9]对晋西黄土区核桃 *Juglans regia*-花生 *Arachis hypogaea* 复合系统核桃根系的研究表明，核桃根系垂直方向上主要集中在 0~60 cm，水平方向上主要集中在距核桃 1.5 m 的区域内。高琛稀等[10]对 1 年生矮化自根砧苹果 *Malus pumila* 苗木的研究表明：地下根系在 6 月和 9 月生长旺盛，7 月和 8 月死亡较多。这一系列的研究对指导果树施肥和灌溉发挥了重要的作用。板栗 *Castanea mollissima* 原产中国，在中国分布范围较广，是中国重要的木本粮食作物之一，其抗病能力强、果实含糖量高、糯性强和易剥离等优点，深受广大消费者喜爱。提高板栗的产量和品质是许多学者比较关心的问题，而目前的研究主要集中在修剪、施肥、授粉等方面[11-13]，对板栗根系的研究却鲜有报道。因此，本研究通过对板栗细根季节性动态及空间分布特征的研究，以期为生产中确定合理的施肥和灌溉制度，提高果树产量和质量提供科学依据。

## 1　材料与方法

### 1.1　试验样地概况

研究区域位于河北省迁西县北京林业大学经济林(板栗)育种与栽培实践基地。该地区地势平坦，属于东部季风暖温带半湿润气候，年平均气温为 10.9 ℃，最冷月(1 月)平均气温-6.5 ℃，最热月(7 月)平均气温 25.4 ℃，年平均降水量为 744.7 mm，主要集中在 7 月和 8 月。全年日照时数为 2 581.5 h，无霜期为 176 d。试验地成土母质为片麻岩，土壤质地为沙壤土，土壤类型为褐土。试验地土壤理化性质见表1。

**表 1　试验地土壤理化性质**

Table 1　Physical and chemical properties of the soils at the experiment site

| 土层深度/cm | 容重/(g·m$^{-3}$) | 总孔隙度/% | pH 值 | 有机质/(g·kg$^{-1}$) | 碱解氮/(mg·kg$^{-1}$) | 有效磷/(mg·kg$^{-1}$) | 速效钾/(mg·kg$^{-1}$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0~20 | 1.51 | 43.07 | 6.48 | 6.11 | 51.42 | 22.53 | 157.61 |
| 20~40 | 1.42 | 46.37 | 6.68 | 6.55 | 46.55 | 18.72 | 125.51 |
| 40~60 | 1.47 | 44.41 | 7.59 | 5.56 | 38.85 | 16.58 | 123.12 |

### 1.2　研究方法

1.2.1　根系取样　研究对象是位于示范园内的 6 年生板栗，林带内植株密度为 2 m × 3 m(株距为 2 m，行距为 3 m)，平均树高 2.4 m，平均地径 6.6 cm，采用中等强度的管理措施。在研究区域内设置 3 个 40 m × 40 m 的标准地，选择标准木(接近平均树高和平均地径的树木)21 株·样地$^{-1}$。采用连续根钻法，土钻内径为 8 cm，于 2016 年 4-10 月生长季内，每月 10-15 日选择样本 3 株·样地$^{-1}$，以样本为中心，东西南北 4 个方向为取样区，距树干 50 cm，100 cm 处钻取土芯，分 3 层(0~20，20~40，40~60 cm)取样。试验为期 6 个月，共计分析 7 次样品。

1.2.2　根系分析　根样取回后先在水中浸泡，然后用水冲洗，过 100 目筛使根系与土壤等分离，重复数次。本研究采用传统的根系分类方法[14]，将直径≤2 mm 的根系归为板栗细根。然后将洗净的根系放在清水中，用镊子捡取所有的细根。根据细根的外形、颜色、弹性区别死根和活根。装入自封袋内放入冰

箱内低温保存。本研究只统计活细根的特征，活细根用 Epson Twain Pro 根系扫描仪扫描获取图像。扫描时将根系放在透明塑料板上，用镊子将各条根系充分展开，扫描后的图像用 WinRhizo 根系分析系统进行分析。分析后的活根置于 80 ℃的烘箱中烘干至恒量，用电子天平称量(精确到 0.001 g)。以此来估算生物量。

1.2.3 根系指标计算 根长密度($m \cdot m^{-3}$)=$L/[\pi r^2 h \cdot 10^{-4}]$；根质量密度($g \cdot m^{-3}$)=$m_{土芯}/[\pi r^2 h \cdot 10^{-4}]$。其中：$L$ 为土芯根长；$m_{土芯}$为土芯根质量；$r$ 为土钻半径，为 4 cm；$h$ 为土层深，为 20 cm。

### 1.3 统计方法

使用 SPSS 20.0 软件进行数据统计分析，采用单因素方差分析(one-way ANOVA)和 Duncan 法比较不同土层深度、不同距离的差异性及不同月份的差异性，应用 Excel 2007 进行图表制作。

## 2 结果与分析

### 2.1 板栗细根空间分布特征

从 4–10 月板栗细根根长密度和根质量密度的总平均值来看(表 2)，随着土层的变化，细根根长密度和根质量密度均表现出明显的变化趋势。在 0~60 cm 土层中，总细根根长密度为 3 824.6 $m \cdot m^{-3}$，其中 20~40 cm 土层中最多，占总细根根长密度的 43.03%。细根的总根质量密度在 0~60 cm 土层为 554.2 $g \cdot m^{-3}$，与细根的根长密度相同，在 20~40 cm 土层中也是最多的，占总细根根质量密度的 45.35%。细根根长密度和根质量密度的最大值均出现在距树干 100 cm 处的 20~40 cm 土层中。方差分析表明：随着土层的加深，细根的根长密度和根质量密度的变化差异显著($P<0.05$)。

**表 2 板栗细根空间分布特征**

Table 2 Spatial distribution characteristics of fine root of *Castanea mollissima*

| 土层深度/cm | 根长密度/($m \cdot m^{-3}$) | | 根质量密度/($g \cdot m^{-3}$) | |
|---|---|---|---|---|
| | 50 cm | 100 cm | 50 cm | 100 cm |
| 0~20 | 1 352.8 ± 82.3 a | 1 174.7 ± 65.0 b* | 194.4 ± 10.5 a | 141.4 ± 9.7 b* |
| 20~40 | 1 246.5 ± 76.4 a | 2 044.6 ± 124.3 a* | 211.8 ± 14.7 a | 290.8 ± 18.4 a* |
| 40~60 | 824.0 ± 72.5 b | 1 006.9 ± 98.3 c* | 140.2 ± 8.4 b | 129.7 ± 7.3 b |

说明：数值为平均值±标准差。同列不同小写字母表示同一列不同土层细根差异显著($P<0.05$)，* 表示相同土层距树干不同距离细根差异显著($P<0.05$)。

板栗细根在水平距离上也表现出一定的分布特征。通过对这 2 个水平距离的细根进行统计分析，结果表明(表 2)：在相同的土层处，这 2 个水平距离的细根根长密度差异显著，而细根的根质量密度除 40~60 cm 土层外，都差异显著($P<0.05$)。在同一水平距离处，随土层的变化差异显著，尤其在 100 cm 的变化更为明显，其中 100 cm 处的 20~40 cm 土层中细根根长密度和根质量密度都明显高于其他层($P<0.05$)。而在 50 cm 处，0~20 cm 土层和 20~40 cm 土层的细根差异不明显。

### 2.2 板栗细根根长密度的季节变化

在 0~60 cm 土层中，板栗细根根长密度的季节变化范围为 88.4~4 166.3 $m \cdot m^{-3}$，细根根长密度的月平均值为 1 274.9 $m \cdot m^{-3}$。其中 10 月细根根长密度最大，4 月细根根长密度最小。板栗在生长季中，细根根长密度有 2 次生长高峰，分别是 6 月和 10 月，10 月增长最多，为 524.6 $m \cdot m^{-3}$。

从图 1 可以看出：20~40 cm 土层的细根根长密度季节性变化最明显。在这一土层中，距树干 50 cm 和 100 cm 处的细根根长密度的季节性变化都显著($P<0.05$)，但它们的变化趋势不相同。在距树干 100 cm 处，细根根长密度的最大值出现在 10 月，且显著高于其他各月份 ($P<0.05$)，最小值是 4 月。在距树干 50 cm 处，细根根长密度的最大值出现在 5 月，最小值出现在 7 月。方差分析结果表明：5 月的细根根长密度，除与 6 月差异不明显外，都显著高于其他月份($P<0.05$)。

距树干 50 cm 处，细根根长密度呈波动变化，6 月的细根根长密度最大，且明显大于其他月份($P<0.05$)。在 7 月，细根根长密度有明显的下降，相比 6 月减少了 904.4 $m \cdot m^{-3}$。距树干 100 cm 处，细根根长密度的变化不同于距树干 50 cm 处的，在 7 月和 10 月有 2 个生长高峰，其中 10 月细根根长密度最大。方差分析表明：10 月的细根根长密度显著大于其他月份($P<0.05$)。

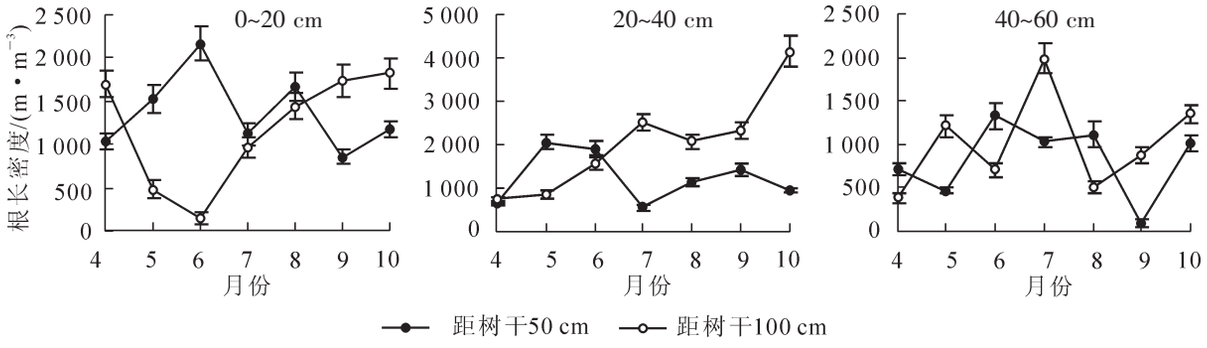


图 1　不同位置板栗细根根长密度季节性变化

Figure 1　Seasonal dynamics of fine root length density of *Castanea mollissima* at different locations

### 2.3　板栗细根根质量密度的季节变化

板栗细根根质量密度随着季节的变化也产生相应的变化。在 0~60 cm 的土层中，其生长季的波动范围为 29.9~498.1 g·m$^{-3}$，细根根质量密度的月平均值为 184. 0 g·m$^{-3}$。在生长过程中，细根的根质量密度有 2 个生长阶段，分别是 4–6 月和 10 月，其中 4–6 月生长相对较少，10 月生长较为旺盛，与 9 月相比增长了 39.5 g·m$^{-3}$。

在不同的土层中，细根根质量密度的季节性变化有所不同(图 2)。与细根根长密度相同，20~40 cm 的细根根质量密度相对较大，且变化较明显。在这一土层中，距树干 50 cm 处的细根根质量密度在 5 月有明显的增加，其中 5 月和 6 月的细根根质量密度明显大于其他月份($P$<0.05)。距树干 100 cm 处，细根根质量密度在 7 月增加明显。方差分析表明：10 月的细根根质量密度除与 9 月差异不明显外，都显著大于其他月份($P$<0.05)。

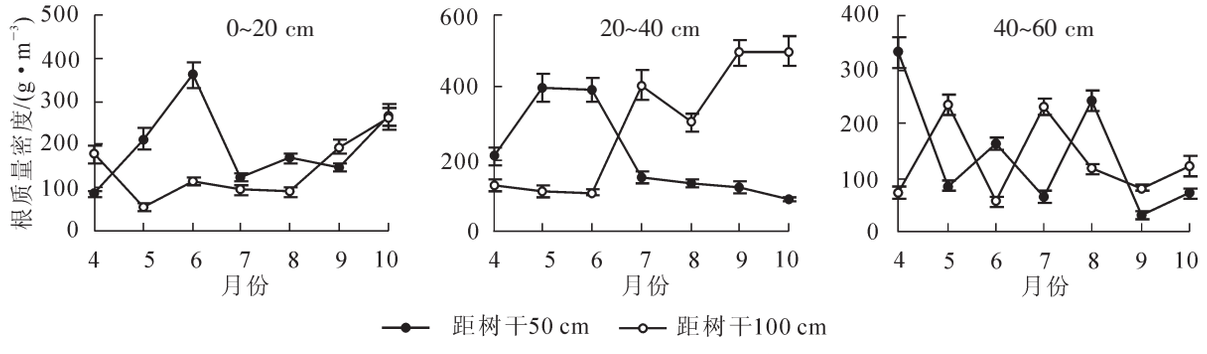


图 2　不同位置板栗细根根质量密度季节性变化

Figure 2　Seasonal dynamics of fine root biomass density of *Castanea mollissima* at different locations

距树干 50 cm处，细根根质量密度季节变化明显，其中 6 月细根根质量密度显著大于其他月份($P$<0.05)。距树干 100 cm 处，整体上细根根质量密度是呈上升趋势的。与距树干 50 cm 不同，细根根质量密度在 7 月明显上升。10 月和 6 月与其他月份相比差异均达显著水平($P$<0.05)。

## 3　讨论

### 3.1　板栗细根的空间分布特征

根系在空间分布上受多方面影响，除树种遗传因素外，还在很大程度上受土壤空间异质性影响。根系通过根长密度和生物量的改变来适应不同的条件，这是根系适应土壤空间异质性的策略[15]。长期以来，人们对细根分布研究仅局限于生物量[16-17]，而细根在生长中受各种生态因子的影响，反映细根功能的各个指标也会随之发生变化[18]。CRAINE[19]的研究发现：根长密度能反映树体对水分和养分的吸收能力，在反映根系生理生态功能方面比根质量密度更有价值。因此，本研究还考虑到细根的根长密度这一指标，发现这 2 个指标在空间分布上有所不同。研究中发现，在垂直方向上，20~40 cm 的土层中细根根长密度和根质量密度较多。而有研究表明，土壤表层 0~20 cm 处细根较多，且随着土层深度的增加，

根系数量减少[20-21]。这与本研究结果不一致。他们的研究对象大多数属于浅根性树种，本研究中板栗属于经济林，根系分布范围较深。田寿乐等[22]在半干旱半湿润山地果园的研究表明：20~40 cm 土层是板栗根系的富集区。此外，试验地土壤性质差异也会导致根系分布差异。表 1 可以看出：在 20~40 cm 土层中，总孔隙度和有机质质量分数相对较高。在适宜的土壤水分条件下，孔隙度越大，越有利于细根的生长[23]。土壤有机质质量分数对细根也有显著影响。为了获取更多的有机质，细根通常趋向于养分质量分数高的区域[24]。

目前，关于细根在水平方向的分布，有不同的结论。有研究表明：细根分布与距树干位置有关[25]。但也有一些研究表明：细根分布与距树干位置没有显著关系[26]。李陆生等[27]和甘卓亭等[28]的研究发现：幼龄林根系在水平方向上随径向距离增大而降低，成熟林则没有显著关系。本研究发现：整体上，距树干 100 cm 的细根根长密度和根质量密度大于距树干 50 cm 的，各个月份和不同土层之间也存在差异，这与土壤的垂直变化和板栗的生长规律有关。

### 3.2 板栗细根的季节性变化

对于经济林来说，根系的作用尤为质量要，能吸收水分和养分，并调控地上部分的果实产量，与地上部分相辅相成。由于自身生长特性以及受到环境因素的影响，地上部分和地下部分呈交替生长的规律，即地上部分生长旺盛时，地下部分生长缓慢，地上部分生长迟缓时，地下部分生长旺盛[8, 29]。土壤水分与养分在垂直上的差异，使得在不同季节，甚至是同一季节不同层的细根发生变化[30]。0~20 cm 土层处于表层，水热条件受季节变化影响较大。距树干 50 cm 处，4–6 月细根根长密度和根质量密度都呈上升趋势，而距树干 100 cm 处，细根根长密度和根质量密度基本上呈下降趋势。这是由于在这段时间降雨较少，气候干旱，地表温度逐渐升高，而 50 cm 处位于树冠内，100 cm 处位于树冠外，导致这 2 个距离产生了不同的变化趋势。在生长季前期，地上部分枝条和叶片生长旺盛，冠幅不断扩大，而根系也随之扩张，林分逐渐郁闭。在 7 月和 8 月，试验地区降雨增多，进入雨季，此时距树干 100 cm 位于树冠线边缘，树冠对于降水的再分配及降水的化学性质，改变了树冠下土壤湿度及化学性质，同时这个距离的光照条件相对较好，细根向有利的营养空间聚集，以获取水分和养分[31]，使这一距离的细根根长密度和根质量密度逐渐上升。

20~40 cm 土层中，板栗根系的季节性变化主要与营养生长和生殖生长的矛盾有关。根据对研究区域板栗的生长特征研究，其物候期可以分为叶芽萌发期(4 月)、展叶期(5 月)、授粉期(6 月初)、坐果期(6 月中旬)、幼果期(7 月)、果实膨大期(8 月)、果实成熟期(9 月)和落叶期(10 月)[32]。在展叶期(5 月)，细根根质量密度和根长密度明显增大。由于在这段时间，板栗主要进行营养生长，根系横向生长和纵向生长同时进行。在 6 月板栗进入生殖生长期，此时细根根长密度增加明显而根质量密度没有变化，这一时期地上部分需要大量营养供应，根系主要通过纵向伸长来获取更多的养分和水分。进入到幼果期(7 月)，果实营养物质积累少，营养生长和生殖生长的矛盾得到缓和，叶片逐渐成熟，光合作用增强[33]，因此细根根长密度下降而根质量密度上升。在 8 月(果实膨大期)和 9 月(果实成熟期)，板栗对氮、磷、钾的营养的需求较高[34]，细根根长密度不断增大。进入到生长季末(10 月)，地上部分生长基本结束，地下部分生长旺盛，细根根长密度大幅度增加，但是研究中发现细根根质量密度变化不明显，这主要是由于在根系横向生长的过程中，一部分细根进入到了下一个径级，而本研究并未考虑其他径级的根系。在 40~60 cm 土层距树干 50 cm 和 100 cm 处交替增长，因为这一层次的土壤受外界影响较小，土壤几乎是同质性的，细根的季节变化主要与树种本身根系生长特点有关。

## 4 结论与展望

板栗细根垂直分布差异明显，20~40 cm 土层中细根根长密度和根质量密度最大。水平方向上，距树干 100 cm 处的细根根长密度和根质量密度大于 50 cm 处。板栗细根表现出明显的季节波动性，其中 20~40 cm 土层的细根季节变化较明显。根长密度在 6 月和 10 月有 2 个生长高峰，根质量密度在 10 月增长较多，5 月和 6 月也有增长。板栗细根的空间分布和季节变化与土壤分布差异和树种生长规律密切相关。

影响根系变化和分布的因素是多种多样的，不同根序[35]以及不同年龄[36]等的根系变化和分布都有所

不同。这方面的研究还有待于更为深入和全面的探讨。

## 5　参考文献


[1] 陈莉莉, 袁志友, 穆兴民, 等. 森林细根生产力研究进展[J]. 西北林学院学报, 2015, **30**(3): 70 – 75.
CHEN Lili, YUAN Zhiyou, MU Xingmin, *et al.* A review of fine root productive of forest [J]. *J Northwest For Univ*, 2015, **30**(3): 70 – 75.

[2] 席本野, 王烨, 贾黎明, 等. 宽窄行栽植模式下三倍体毛白杨根系分布特征及其与根系吸水的关系[J]. 生态学报, 2011, **31**(1): 47 – 57.
XI Benye, WANG Ye, JIA Liming, *et al.* Property of root distribution of triploid *Populus tomentosa* and its relation to root water uptake under the wide-and-narrow row spacing scheme [J]. *Acta Ecol Sin*, 2011, **31**(1): 47 – 57.

[3] OSMONT K S, SIBOUT R, HARDTKE C S. Hidden branches: developments in root system architecture [J]. *Ann Rew Plant Biol*, 2007, **58**(58): 93 – 113.

[4] SCHMIDT W. Root systems biology [J]. *Front Plant Sci*, 2014, **5**(5): 215. doi: 10.3389/fpls.2014.00215.

[5] 张小全, 吴可红, MURACH D. 树木细根生产与周转研究方法评述[J]. 生态学报, 2000, **20**(5): 875 – 883.
ZHANG Xiaoquan, WU Kehong, MURACH D. A review of methods for fine-root production and turnover of trees [J]. *Acta Ecol Sin*, 2000, **20**(5): 875 – 883.

[6] 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 Soil*, 1995, **187**(2): 159 – 219.

[7] 杨洪强, 范伟国. 苹果根系构型及其调控研究进展[J]. 园艺学报, 2012, **39**(9): 1673 – 1678.
YANG Hongqiang, FAN Weiguo. Advances in research of apple root system architecture and it's regulation [J]. *Acta Hortic Sin*, 2012, **39**(9): 1673 – 1678.

[8] 张劲松, 孟平. 石榴树吸水根根系空间分布特征[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2004, **28**(4): 89 – 91.
ZHANG Jinsong, MENG Ping. Spatial distribution characteristics of fine roots of pomegranate tree [J]. *J Nanjing For Univ Nat Sci Ed*, 2004, **28**(4): 89 – 91.

[9] 云雷, 毕华兴, 马雯静, 等. 晋西黄土区核桃花生复合系统核桃根系空间分布特征[J]. 东北林业大学学报, 2010, **38**(7): 67 – 70.
YUN Lei, BI Huaxing, MA Wenjing, *et al.* Spatial distribution characteristics of root system of walnut trees in the walnut-peanut intercropping system in the loess region of western Shanxi [J]. *J Northeast For Univ*, 2010, **38**(7): 67 – 70.

[10] 高琛稀, 刘航空, 韩明玉, 等. 矮化自根砧苹果苗木生长动态及其根系分布特征[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2016, **44**(5): 170 – 176.
GAO Chenxi, LIU Hangkong, HAN Mingyu, *et al.* Growth dynamic and characteristics of root distribution of dwarfing self-rooted rootstock apply nursery [J]. *J Northwest A&F Univ Nat Sci Ed*, 2016, **44**(5): 170 – 176.

[11] 彭晶晶, 郭素娟, 王静, 等. 修剪强度对不同密度板栗叶片质量与光合特征的影响[J]. 东北林业大学学报, 2014, **42**(11): 47 – 50.
PENG Jingjing, GUO Sujuan, WANG Jing, *et al.* Effect of different pruning intensity on leaf traits and photosynthetic characteristics of Chinese chestnut with different plant densities [J]. *J Northeast For Univ*, 2014, **42**(11): 47 – 50.

[12] 郭素娟, 李广会, 吕文君, 等. 锰对板栗实生苗生长及生理效应的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, **18**(6): 1530 – 1536.
GUO Sujuan, LI Guanghui, LÜ Wenjun, *et al.* Influence of manganese on growth, physiological effects of chestnut seedlings [J]. *Plant Nutr Fert Sci*, 2012, **18**(6): 1530 – 1536.

[13] ZHOU Feng, GUO Shujuan, XIE Peng, *et al*. Megasporogenesis and development of female gametophyte in Chinese chestnut (*Castanea mollissima*) cultivar 'Yanshanzaofeng' [J]. *Int J Agric Biol*, 2014, **16**(5): 1001 – 1005.

[14] BLOCK R M A, REES K C J V, KNIGHE J D. A review of fine root dynamics in populus, plantations [J]. *Agrofor Syst*, 2006, **67**(1): 73 – 84.

[15] JACKSON R B, CANDELL J, EHLERI J R, *et al*. A global analysis of root distributions for terrestrial biomes [J]. *Oecologia*, 1996, **108**(3): 389 – 411.

[16] 宋小林, 吴普特, 赵西宁, 等. 黄土高原肥水坑施技术下苹果树根系及土壤水分布[J]. 农业工程学报, 2016, **32**(7): 121 – 128.

SONG Xiaolin, WU Pute, ZHAO Xining, *et al*. Distribution characteristic of soil moisture and roots in rain-fed old apple orchards with water-fertilizer pit on the Loess Plateau [J]. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2016, **32**(7): 121 – 128.

[17] 邸楠, 席本野, PINTO J R, 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.
DI Nan, XI Benye, PINTO J R, *et al*. Root biomass distribution of triploid *Populus tomentosa* under wide- and narrow-row spacing planting schemes and its responses to soil nutrients [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2013, **37**(10): 961 – 971.

[18] 史建伟, 王孟本, 陈建文, 等. 柠条细根的空间分布特征及其季节动态[J]. 生态学报, 2011, **31**(3): 726 – 733.
SHI Jianwei, WANG Mengben, CHEN Jianwen, *et al*. The spatial distribution and seasonal dynamics of fine roots in a mature *Caragana korshinskii* plantation [J]. *Acta Ecol Sin*, 2011, **31**(3): 726 – 733.

[19] CRAINE J M. Competition for nutrients and optimal root allocation [J]. *Plant Soil*, 2006, **285**(1/2): 171 – 185.

[20] 宋曰钦, 翟明普, 贾黎明, 等. 不同年龄三倍体毛白杨纸浆林生长期间细根变化规律[J]. 生态学杂志, 2010, **29**(9): 1696 – 1702.
SONG Yueqin, ZHAI Mingpu, JIA Liming, *et al*. Fine root dynamics of different aged triploid *Populus tomentosa* pulp forests during growth period [J]. *Chin J Ecol*, 2010, **29**(9): 1696 – 1720.

[21] 荐圣淇, 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.
JIAN Shengqi, ZHAO Chuanyan, FANG Shumin, *et al*. Distribution of fine root biomass of main planting tree species in Loess Plateau, China [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2014, **25**(7): 1905 – 1911.

[22] 田寿乐, 沈广宁, 许林, 等. 不同节水灌溉方式对干旱山地板栗生长结实的影响[J]. 应用生态学报, 2012, **23**(3): 61 – 66.
TIAN Shoule, SHEN Guangning, XU Lin, *et al*. Effects of different water-saving irrigation modes on chestnut growth and fruiting in drought hilly land [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2012, **23**(3): 61 – 66.

[23] 张良德, 徐学选, 胡伟, 等. 黄土丘陵区燕沟流域人工刺槐林的细根空间分布特征[J]. 林业科学, 2011, **47**(11): 31 – 36.
ZHANG Liangde, XU Xuexuan, HU Wei, *et al*. Spatial distribution of fine roots of a *Robinia pseudoacacia* plantation in Yangou watershed in the hilly region of Loess Plateau [J]. *Sci Silv Sin*, 2011, **47**(11): 31 – 36.

[24] FEBRUARY E C, HIGGINS S I. The distribution of tree and grass roots in savannas in relation to soil nitrogen and water [J]. *South Afr J Bot*, 2010, **76**(3): 517 – 523.

[25] 杨秀云, 韩有志, 张芸香. 距树干不同距离处华北落叶松人工林细根生物量分布特征及季节变化[J]. 植物生态学报, 2008, **32**(6): 1277 – 1284.
YANG Xiuyun, HAN Youzhi, ZHANG Yunxiang. Effects of horizontal distance on fine root biomass and seasonal dynamic in *Larix principis-rupprechtil* plantation [J]. *J Plant Ecol*, 2008, **32**(6): 1277 – 1284.

[26] JANSSENS P, DIELS J, VANDERBORGHT J, *et al*. Numerical calculation of soil water potential in an irrigated 'Conference' pear orchard [J]. *Agric Water Manage*, 2015, **148**: 113 – 122.

[27] 李陆生, 赵西宁, 高晓东, 等. 黄土丘陵区不同树龄旱作枣园细根空间分布特征[J]. 农业工程学报, 2015, **31**(20): 140 – 146.
LI Lusheng, ZHAO Xining, GAO Xiaodong, *et al*. Influences of stand age on root patterns in a rain-fed jujube (*Ziziphus jujube*) plantation of Loess Plateau in China [J]. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2015, **31**(20): 140 – 146.

[28] 甘卓亭, 刘文兆. 渭北旱塬不同龄苹果细根空间分布特征[J]. 生态学报, 2008, **28**(7): 3401 – 3407.
GAN Zhuoting, LIU Wenzhao. Distribution of the fine roots of different aged apple trees in Weibei rained tableland of the Loess Plateau [J]. *Acta Ecol Sin*, 2008, **28**(7): 3401 – 3407.

[29] 李楠, 廖康, 成小龙, 等. 库尔勒香梨根系与地上部生长发育动态及相关性[J]. 新疆农业大学学报, 2013, **36**(2): 131 – 135.
LI Nan, LIAO Kang, CHENG Xiaolong, *et al*. Correlation and growth dynamic state of growth and development in root and aboveground organ of Korla fragrant pear [J]. *J Xinjiang Agric Univ*, 2013, **36**(2): 131 – 135.

[30] PREGITZER K S, ZAK D R, MZAIASZ J, *et al*. Interactive effectives of atmospheric $CO_2$ and soil-N availability on fine roots of populous tremuloides [J]. *Ecol Appl*, 2000, **10**(1): 18 – 33.

[31] SOKALSKA D I, HAMAN D Z, SZEWCZUK A, *et al*. Spatial root distribution of mature apple trees under drip irrigation system [J]. *Agric Water Manage*, 2009, **96**(6): 917 – 924.

[32] 张铁如. 板栗无公害高效栽培[M]. 北京：金盾出版社, 2005.

[33] 谢鹏, 郭素娟, 吕文君. 板栗‘燕山早丰’不同类型枝条在花期和幼果期的矿质元素含量比较[J]. 东北农业大学学报, 2014, **45**(4): 41 – 45.
XIE Peng, GUO Sujuan, LÜ Wenjun. Comparison analysis on mineral elements of different shoots in Chinese chestnut ‘Yanshanzaofeng’ during flowering and young fruit period [J]. *J Northeast Agric Univ*, 2014, **45**(4): 41 – 45.

[34] 李广会, 郭素娟, 邹锋, 等. 板栗叶片营养与土壤养分的动态变化及回归分析[J]. 中南林业科技大学学报, 2012, **32**(9): 41 – 46.
LI Guanghui, GUO Sujuan, ZOU Feng, *et al*. Dynamic changes and regression analysis of leaf and soil nutrients of *Castanea mollissima* [J]. *J Cent South Univ For Technol*, 2012, **32**(9): 41 – 46.

[35] 王延平, 许坛, 朱婉芮, 等. 杨树人工林细根数量和形态特征的季节动态及代际差异[J]. 应用生态学报, 2016, **27**(2): 395 – 402.
WANG Yanping, XU Tan, ZHU Wanrui, *et al*. Seasonal dynamics of quantitative and morphological traits of poplar fine roots and their differences between successive rotation plantations [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2016, **27**(2): 395 – 402.

[36] GAN Zhuoting, ZHOU Zhengchao, LIU Wenzhao. Vertical distribution and seasonal dynamics of fine root parameters for apple trees of different ages on the Loess Plateau of China [J]. *Agric Sci China*, 2010, **9**(1): 46 – 55.