

# 黄土高原子午岭天然柴松林细根垂直分布特征

韦兰英<sup>1,2</sup>, 上官周平<sup>2</sup>

(1 中国科学院 广西植物研究所, 广西 桂林 541006; 2 西北农林科技大学 水土保持研究所,  
黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

[摘要] 为揭示柴松林的生理生态适应机制, 采用土钻法对黄土高原子午岭林区天然柴松林细根垂直分布特征和土壤物理性质进行了研究。结果表明, 柴松细根生物量、根长密度、根表面积和比根长都集中分布于0~20 cm土层, 总体上均随土壤深度增加而减少。柴松林地最大细根生物量分布在10~20 cm土层, 最大的根长密度、比根长和根表面积均分布在0~10 cm土层; 最小比根长分布在20~30 cm土层, 最小细根生物量、根长密度和根表面积均分布在60~70 cm土层。土壤含水量与柴松细根生物量、根长密度和根表面积相关性达显著水平, 细根生物量与>5 mm和<0.25 mm的水稳性团聚体呈显著正相关关系。说明天然柴松细根分布特征受土壤环境因子的影响, 同时也反映了细根功能的转变。

[关键词] 柴松; 细根特征; 垂直分布; 黄土高原

[中图分类号] S791.254.02

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2007)07-0069-06

## Vertical distribution of the fine root of the natural *Pinus tabulaeformis* f. *shekannensis* forest in Ziwuling Loess Plateau

WEI Lan ying, SH ANGGUAN Zhou ping

(1 Guangxi Institute of Botany, Guangxi Zhuang Autonomous Region and Chinese Academy of Sciences, Guilin, Guangxi 541006, China;  
2 State key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation,  
Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** In order to reveal the physiological adaptation mechanism of the *Pinus tabulaeformis* f. *shekannensis* in Ziwuling Loess Plateau, soil coring was used to investigate the vertical distribution of the fine root (< 2 mm) of *Pinus tabulaeformis* f. *shekannensis* and the soil physical characters in Ziwuling Loess Plateau. The study revealed that the fine root biomass, fine root length density, fine root surface area and specific root length all concentrated on the 0–20 cm soil layer, and then all of them decreased with the increasing of soil depth. The maximum fine root biomass distributed in the 10–20 cm soil layer, and the fine root length density, fine root surface area and specific root length peaked in the uppermost (0–10 cm) soil. In contrast to the distribution of the maximum root parameters, the distribution of the minimum root parameters was different. The minimum specific root length distributed in the 20–30 cm soil layer, the minimum fine root biomass, fine root length density and fine root surface were observed in 60–70 cm soil layer. Fine root biomass was positively correlated with soil water content and had no correlation with soil bulk density; > 5 mm and < 0.25 mm water stable aggregates were positively correlated with fine root biomass. The results indicated that the change of the soil environment and the function of the fine root could

\* [收稿日期] 2006-05-31

[基金项目] 中国科学院西部行动计划项目(KZCX2-XB2-05); 西北农林科技大学拔尖人才培养计划项目和创新团队项目

[作者简介] 韦兰英(1980–), 女, 广西桂林人, 在读硕士, 主要从事森林生态学研究。E-mail: weilanyingccn@163.com

[通讯作者] 上官周平(1964–), 男, 陕西扶风人, 研究员, 博士生导师, 主要从事植物生理生态学研究。

E-mail: shangguan@ms.isw.c.ac.cn

be predicted through the vertical distribution of the fine root of *Pinus tabulaeformis* and there was relationship between soil water content and soil bulk density.

**Key words:** *Pinus tabulaeformis* f. *shekannensis*; fine root characters; vertical distribution; Loess Plateau

植物对土壤水分和养分的吸收主要是通过细根获取<sup>[1]</sup>。植物细根的空间结构是反映植物地下部分协调生长的重要内容,因此关于植物细根分布特征的研究是目前生态研究的热点之一。为了获取足够的水分和养分,树木必须维持一定的细根生物量<sup>[2]</sup>,因而传统的对根系分布的研究侧重于生物量分布特征方面。Gale 等<sup>[3]</sup>通过对不同演替阶段不同树种根系分布特征的研究,提出了一个关于根系垂直分布的模型,来反映根系的垂直分布特征。Vivek<sup>[4]</sup>研究发现,根系分布和分布深度随林木年龄和生物量的变化而变化,并且细根分布和分布深度可作为生物量的函数。植物根系分布特征不仅受制于本身的遗传特性,还受制于所处的土壤环境,并且具有很大的时空异质性<sup>[5]</sup>。此外,根系分布的最大深度还受土壤结构、土层厚度和土壤水分与养分资源状况的影响<sup>[6]</sup>,因此对植物根系分布特征的研究,还应该与其所处的环境条件结合起来。

柴松(*Pinus tabulaeformis* f. *shekannensis*)是油松在黄土高原发生的变异生态型<sup>[7]</sup>。由于柴松树体高大、干形通直、单株及林分的高、径、蓄积生长都高于油松,因而是黄土高原上的优良造林树种。目前对黄土高原柴松细根分布特征的研究还未见报道。本试验对黄土高原子午岭天然柴松林细根生物量、根长密度、细根表面积、细根直径和比根长垂直分布特征进行了研究,以期揭示柴松林根系的垂直分布特征和柴松林的生理生态适应机制及其替演进程提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区自然概况

研究区位于陕西富县大麦秸沟桥北林业局和尚源林场。该区属于暖温带气候区,年平均气温 9℃左右,最低气温-22.7℃,最高气温 35.7℃,全年≥10℃积温 2 800℃,年平均降雨量 600 mm 左右,6~8 月降雨量占全年降雨量的 50%,年相对湿度 60%,无霜期 165 d。柴松生长于西北坡、东坡和北坡,海拔 1 200~1 450 m,林内坡度多为 30°~40°。土壤为灰褐色森林土,土层深厚;枯枝落叶层以针叶为主,一般厚度为 5 cm,局部可达 10 cm;林下土壤 pH 值为 7.4~7.9,土壤腐殖质含量为 36~75 g/kg,土壤氮含量为 1~2.2 g/kg。

天然柴松林乔木层盖度多为 60%~70%,其中柴松占绝对优势,混生有极少的辽东栎(*Quercus liaotungensis*)、茶条槭(*Acer ginnala*)、山杏(*Prunus aneniaca*)、山杨(*Populus davidiana*)和漆树(*Toxicodendron vernicifluum*);灌木层盖度为 5%~55%,约 20 种,优势种为胡枝子(*Lespedeza durica*)、虎榛子(*Ostryopsis davidiana*)和水栒子(*Cotoneaster multiflorus*)等;草本层盖度为 5%~25%,约 40 种,优势种为大披针苔(*Carex lanceolata*)、异叶败酱(*Patrinia heterophy*)、野菊(*Dendranthema indicum*)等。在柴松林随机选取 3 个 10 m×10 m 样地,其基本特征如表 1 所示。

表 1 天然柴松林样地基本情况

Table 1 General situation of the experimental plots in *Pinus tabulaeformis* f. *shekannensis*

样地号 Plot No.	坡向 Aspect	坡度/(°) Slope	海拔/m Altitude	平均林龄/年 Average age	平均胸径/cm Average DBH	平均树高/m Average height	林下灌木 Shrubs		林下草本 Grass	
							主要种类 Main species	盖度 Cover/%	主要种类 Main species	盖度 Cover/%
1	东南 ES	12~13	1 409	48	11.02	10.89	茶条槭, 黄蔷薇 <i>Acer ginnala</i> , <i>Rosa hugonis</i>	40	披针苔草, 达乌里胡枝子 <i>Carex lancifolia</i> , <i>L. dahuwicus</i>	19
2	东北 EN	12~13	1 400	48	11.72	10.68	漆树, 黄蔷薇 <i>Toxicodendron vernicifluum</i> , <i>Rosa hugonis</i>	45	披针苔草 <i>Carex lancifolia</i>	15
3	正东 E	13~14	1 410	48	10.98	11.10	绣线菊, 黄蔷薇 <i>Spiraea wilsonii</i> , <i>Rosa hugonis</i>	35	披针苔草 <i>Carex lancifolia</i>	13

### 1.2 方法

1.2.1 根系参数的测定 在每样地内用土钻(Φ=

9 cm)从 0~80 cm 土层(每 10 cm 为 1 层)钻取土样,从各土层钻取的土样中拣出所有根系,编号后装

入塑料袋带回实验室。采集的根系样品,用自来水清洗干净后,按直径  $\Phi \leq 2 \text{ mm}$  和  $(\Phi > 2 \text{ mm})$  分为两级。然后用根系扫描仪及根系形态学和结构分析应用系统 DT-SCAN [Delta T Devices Ltd, UK] 对直径  $(\Phi \leq 2 \text{ mm})$  的根系进行根长密度 RLD (Fine Root Length Density,  $\text{mm}/\text{cm}^3$ )、根表面积 RSA (Fine Root Surface Area,  $\text{mm}^2/\text{cm}^3$ ) 和细根直径 FD (Fine Root Diameter,  $\text{mm}$ ) 等指标的测定分析。扫描后的根系样品置入  $80 \text{ }^\circ\text{C}$  烘箱中烘干至恒重,再分别称重和记录,计算细根生物量 FRB (Fine Root Biomass,  $\text{mg}/\text{cm}^3$ )。细根比根长 SRL (Specific Fine Root Length,  $\text{m}/\text{g}$ ) = 细根根长/细根生物量。

1.2.2 土壤含水量的测定 在每个样地随机布设 3 个取样点,用小铝盒采集 0~ 300 cm 土层土样,1 m 土层以上每 10 cm 为 1 层取样,1 m 土层以下每 20 cm 为 1 层取样。土壤含水量采用烘干法测定,土样在  $105 \text{ }^\circ\text{C}$  烘箱中烘干至恒重后称重计算。各个样地土壤含水量为 3 次重复的平均值。

1.2.3 土壤容重的测定 在每个样地随机挖 1 个剖面,分 3 层取土样,即 0~ 20, 20~ 40 和 40~ 60 cm,每土层重复 3 次。土壤容重采用环刀法测定,土样在  $105 \text{ }^\circ\text{C}$  烘箱中烘干至恒重后称重计算,各个样地土壤容重均为 3 次重复的平均值。

1.2.4 土壤团聚体的测定 从 0~ 10, 10~ 20, 20~ 30, 30~ 40 和 40~ 50 cm 土层采集原状土样,样品带回室内风干后用萨维诺夫湿筛法测定  $> 5, 2\sim 5, 1\sim 2, 0.5\sim 1, 0.25\sim 0.5$  和  $< 0.25 \text{ mm}$  的各级水稳性土壤团聚体含量。根系参数与各级水稳性土壤团聚体含量均为各个样地 3 次重复的平均值。

1.3 数据分析

采用 SPSS 分析软件包 (SPSS 11.0 for Windows, Chicago, USA) 对试验数据进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 柴松林地土壤物理特征的变化

由图 1 可见,在 0~ 60 cm 土层,天然柴松林地土壤容重变化不大,为  $1.02\sim 1.20 \text{ g}/\text{cm}^3$ 。林地土壤含水量在 0~ 60 cm 土层内随着土层加深而减少,50~ 60 cm 土层土壤含水量最低,为  $98.79 \text{ g}/\text{kg}$ ;之后随着土层加深土壤含水量有所增加,140 cm 土层以下土壤水分状况得到明显改善,到 300 cm 土层土壤含水量几乎达到地表水平。表 2 表明,柴松林地各级水稳性团聚体含量从地表向下各不相同,其中  $> 1 \text{ mm}$  粒级的水稳性团聚体含量基本上随土层加深而递减; $0.25\sim 1 \text{ mm}$  和  $< 0.25 \text{ mm}$  水稳性团聚体含量则基本上随土层加深而增加。

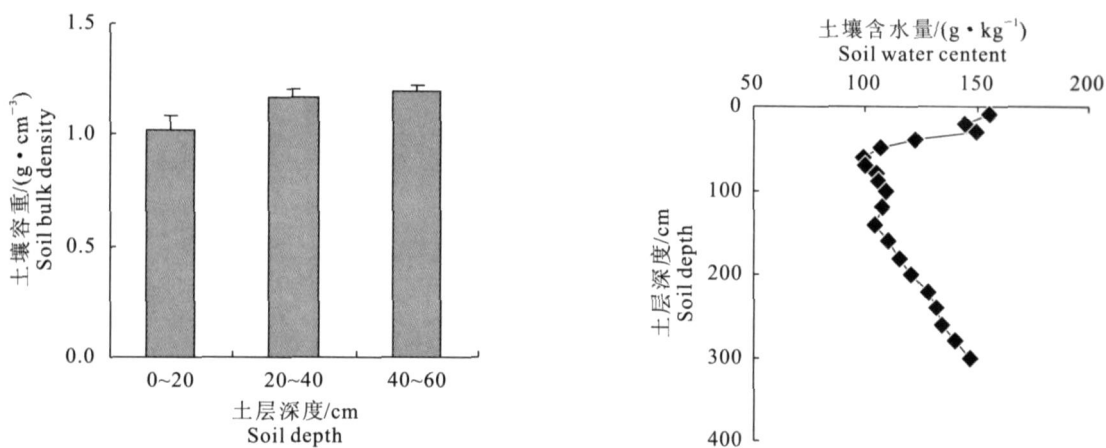


图 1 柴松林地不同土层土壤容重和土壤含水量的变化

Fig. 1 Change of soil bulk density and soil water content in different soil depth in *Pinus tabulaeformis* f. *shekannensis* forest

表 2 柴松林地不同土层土壤水稳性团聚体的含量

Table 2 Percentage of different water stable aggregates of soil in *Pinus tabulaeformis* f. *shekannensis* forest %

土层深度/cm Soil depth	各级水稳性团聚体/mm Different level of water stable aggregates					
	> 5	5~ 2	2~ 1	1~ 0.5	0.5~ 0.25	< 0.25
0~ 10	30.3	11.9	15.3	7.4	6.5	28.6
10~ 20	31.3	17.3	12.6	9.2	4.1	25.5
20~ 30	22.7	15.1	9.8	7.3	7.1	38.0
30~ 40	19.8	14.8	13.0	8.9	5.4	38.1
40~ 50	7.2	13.1	11.1	13.2	13.4	42.0

## 2.2 柴松林细根垂直分布特征

2.2.1 根系生物量垂直分布特征 表 3 表明, 柴松林 0~ 10 cm 土层细根生物量略低于 10~ 20 cm 土层; 20 cm 土层以下, 细根生物量基本随土层深度的增加而逐渐减少。其中 10~ 20 cm 土层细根生物量最高, 60~ 70 cm 土层细根生物量最低, 前者为后者的 8 倍; 70~ 80 cm 土层细根生物量与 50~ 60 cm 土层相等, 约为 60~ 70 cm 土层的 2 倍, 占细根总生物量的 5.6%。柴松林约有 52% 的细根生物量分布在 0~ 20 cm 土层, 即 0~ 20 cm 是细根生物量集中分布的土层。

2.2.2 细根根长密度垂直分布特征 表 3 表明, 在柴松林地 0~ 30 cm 土层, 细根根长密度随土层深度的增加而降低, 且降低的幅度较大; 在 30~ 40 cm 土层细根根长密度又升高, 之后随土层深度增加, 细根根长密度又基本呈降低趋势。其中 0~ 10 cm 土层细根根长密度最大, 其次为 10~ 20 cm 土层, 60~ 70 cm 土层细根根长密度最小。可见, 根长密度集中分布于 0~ 20 cm 土层, 占总根长密度的 75.3%; 只有 24.7% 的根长密度分布于 20 cm 以下土层。总体

而言, 细根根长密度在 0~ 80 cm 土层随土层深度的增加而降低。

2.2.3 细根表面积垂直分布特征 表 3 表明, 在 0~ 40 cm 土层, 柴松林地细根表面积随土层加深而减少, 在 40~ 50 cm 土层略有增加, 在 50~ 80 cm 土层随土层加深呈波动变化趋势。最大根表面积与最小根表面积分布情况与根长密度相同, 分别在 0~ 10 cm 和 60~ 70 cm 土层, 前者约为后者的 19 倍。由表 3 可见, 细根表面积主要分布于 0~ 10 cm 土层, 其所占比例为 39.7%, 10~ 20 cm 土层为 22.7%, 二者共占 62.4%; 20~ 40 cm 土层根系表面积所占比例为 14.9%。可见, 根系表面积与根长密度、根系生物量一样, 主要分布于 0~ 20 cm 土层。

2.2.4 细根比根长垂直分布特征 表 3 表明, 柴松林地 0~ 80 cm 土层细根比根长基本随土层深度的增加而降低, 其中在 0~ 50 cm 土层, 细根比根长与细根根长密度具有相似的分布规律。0~ 10 cm 土层细根比根长最大, 为 19.87 m/g; 其次为 10~ 20 cm 土层, 最小比根长分布在 20~ 30 cm 土层, 为 2.52 m/g。

表 3 柴松林细根生物量、根长密度、细根表面积和比根长在土壤各层的分布

Table 3 Distribution of FRB, RLD, RSA and SRL of fine root in corresponding soil layers

土层深度/cm Soil depth	细根生物量/(mg·cm <sup>-3</sup> ) Fine root biomass	根长密度/(mm·cm <sup>-3</sup> ) Fine root length density	细根表面积/(mm <sup>2</sup> ·cm <sup>-3</sup> ) Fine root surface area	比根长/(m·g <sup>-1</sup> ) Specific root length
0~ 10	0.89 b	17.75 a	13.34 a	19.87 a
10~ 20	1.11 a	8.11 b	7.64 b	7.30 b
20~ 30	0.59 c	1.49 cd	2.54 cd	2.52 c
30~ 40	0.38 d	2.51 c	2.46 cd	6.59 bc
40~ 50	0.32 d	1.61 cd	4.12 c	5.02 bc
50~ 60	0.22 de	1.37 d	1.34 d	6.18 bc
60~ 70	0.13 e	0.69 d	0.69 d	5.18 bc
70~ 80	0.22 de	0.82 d	1.44 d	3.78 c

注: 同列数据后标相同字母者表示差异不显著 ( $P > 0.05$ ), 标不同字母者表示差异显著 ( $P < 0.01$ )。

Note: The same letters in each column indicate in significant difference at 5% level. The different letters in each column indicate significant difference at 1% level.

## 2.3 细根参数与土壤物理特征间的相关性分析

植物根系的分布特征不仅受制于本身的遗传特性, 而且在很大程度上还受制于所处的土壤环境, 土壤因子对根系参数的影响有差异。表 4 表明, 土壤含水量与柴松细根生物量的相关性达极显著水平, 与根长密度、根表面积均呈正相关关系, 且相关性达显著水平, 可见土壤含水量是影响细根垂直分布的一个主要环境因子。柴松林各细根参数之间也具有不同程度的相关性, 细根生物量与根长密度和根表面积均呈显著的正相关关系, 但与比根长无显著相关性; 根长密度与根表面积、根表面积与比根长均呈极显著正相关关系。这说明细根各参数之间是相互

影响和相互制约的。

表 5 表明, 土壤物理特性和根系分布参数与各级水稳性团聚体存在着不同程度的相关关系, 其中土壤含水量与土壤中  $> 5$  mm 粒级的水稳性团聚体含量呈显著的正相关关系, 与土壤中 0.5~ 1 mm 粒级的水稳性团聚体含量呈显著的负相关关系, 与其他粒级的水稳性团聚体含量无显著相关关系。细根生物量与  $< 0.25$  mm 的水稳性团聚体含量呈极显著的正相关关系, 与  $> 5$  mm 的水稳性团聚体含量呈显著的正相关关系, 比根长只与 1~ 2 mm 的水稳性团聚体含量呈显著正相关关系。可见, 细根能显著提高土壤中  $< 0.25$  mm 粒径的水稳性团聚体含

量,从而使土壤结构的稳定性增加。

表4 柴松林地细根根系参数与土壤物理性质的相关性分析

Table 4 Correlation analysis of the root parameters and soil characters in experiment plot in

*Pinus tabulaeformis* f. *shekannensis* forest

测定项目 Item	土壤容重 Soil bulk density	土壤含水量 Soil water content	细根生物量 Fine root biomass	根长密度 Fine root density	根表面积 Root surface area
土壤含水量 Soil water content	- 0.787	1			
细根生物量 Fine root biomass	- 0.242	0.878* *	1		
根长密度 Fine root density	- 0.967	0.713*	0.758*	1	
根表面积 Root surface area	- 0.944	0.739*	0.811*	0.977* *	1
比根长 Specific root length	- 0.944	0.510	0.526	0.948*	0.891* *

注: \* \* 表示相关性达极显著水平( $P < 0.01$ ); \* 表示相关性达显著水平( $P < 0.05$ )。下表同。

Note: \* \* indicates that correlation is significant at the 0.01 level; \* indicates that correlation is significant at the 0.05 level. The same as below.

表5 柴松林地细根根系参数和土壤物理性质与各级水稳性团聚体的相关性分析

Table 5 Correlation analysis of the root parameters and soil properties with different level water stable aggregates

in experimental plot in *Pinus tabulaeformis* f. *shekaannensis* forest

测定项目 Item	各级水稳性团聚体/mm Different level water stable aggregates					
	< 0.25	0.25~ 0.5	0.5~ 1	1~ 2	2~ 5	> 5
土壤含水量 Soil water content	0.711	- 0.681	- 0.892*	0.310	0.107	0.894*
细根生物量 Fine root biomass	0.973* *	- 0.648	- 0.482	0.433	0.364	0.891*
根长密度 Root density	0.761	- 0.348	- 0.436	0.863	- 0.386	0.687
根表面积 Root surface area	0.747	- 0.225	- 0.297	0.813	- 0.397	0.610
比根长 Specific root length	0.577	- 0.217	- 0.347	0.921*	- 0.581	0.514

## 4 讨论

林木根系的空间分布特征往往是土壤环境因子共同作用的结果,也是反映植物地下部分协调生长的重要内容。林木细根生物量一般随土壤深度的增加而减少<sup>[8-11]</sup>。在本试验中,柴松林不仅细根生物量随土壤深度的增加而减少,而且表征细根垂直分布特征的根长密度、比根长和根表面积均基本随土壤深度的增加而呈减少趋势。植物根系的生长发育及其分布特征与根系所处的土壤结构特征和根系周围的微立地环境相关<sup>[1]</sup>。Farish<sup>[12]</sup>研究发现,土壤局部条件的不适,常引起该部位根系密度的大幅度降低,导致根系分布的不均匀性。土壤缺氧或者含铝或重金属过高,均会导致根系生长受阻,从而使根系分布较浅<sup>[13-14]</sup>。本研究发现,柴松细根生物量、根长密度、比根长和根表面积均集中分布于0~ 20 cm土层,这可能是由于土壤表层具有较好的适合根系生长的条件,也可能是因为阻碍根系向下生长的阻力增大。本研究中,柴松林地表层土壤水分条件优

于底层土壤,而且表层土壤也具有较高的保持水分和养分的条件,从而使细根向表土层集聚<sup>[8,15-16]</sup>。天然柴松林细根的这种垂直分布特征反映了土壤中微环境的变化,同时也反映了根系功能的转变。

Pregitzer等<sup>[17]</sup>研究表明,不同土层之间细根的生长与分布是土壤水分、养分和温度共同作用的结果;程云环等<sup>[18]</sup>通过对土壤水分、土壤温度和有效性N的回归分析表明,土壤水分、土壤温度和有效性N 3个环境因子对细根生物量、根长密度、根表面积有较大影响;赵忠等<sup>[19]</sup>认为,林地土壤水分条件是影响刺槐根系分布的关键因素。本研究发现,柴松林细根生物量和细根密度均与土壤含水量呈显著的正相关关系,表明土壤水分条件是影响柴松细根垂直分布的一个非常重要的因素。但任安芝等<sup>[20]</sup>在研究不同生境下黄柳的根系分布特征时却发现,土壤水分不是制约黄柳根系发育的首要条件,土壤容重和土壤紧实度对根系的影响会更大。本研究中土壤容重对柴松细根的分布具有一定的影响,但不是制约其分布的主要因素。因为在不同土层,土壤

容重变化不大,但是细根分布却随土层加深减少的幅度较大。可见,细根分布特征与研究地自然条件及树种特性等有关。

由于表层土壤一般比深层土壤经历更大的水分和温度等波动,因此根系可能会对其周围的土壤环境变化作出相应的响应。Wraith 等<sup>[21]</sup>认为,根系垂直分布会对土壤水分垂直分布作出积极响应。根系能使土壤中的水分重新分配,从而改变土壤中水分的分配格局<sup>[22]</sup>,土壤水分的重新分配能维持根系在土壤中的分布相对比较均匀。但是反过来,根系对土壤结构、质地、C 和 N 含量及土壤水分、养分、pH 等也会产生深刻影响,根系可明显提高土壤水稳性团粒含量,提高非毛管孔隙度,增加土壤有机质含量,降低土壤的紧实度和容重<sup>[23]</sup>。刘宛秋等<sup>[23]</sup>通过对退化红壤重建森林初期细根特征及其作用的机理研究发现,植物细根能显著提高 > 5 mm 土壤大结构水稳性团聚体及 > 0.25 mm 水稳性团聚体的总量。本研究结果表明,细根生物量与 > 5 mm 和 < 0.25 mm 的水稳性团聚体呈显著的正相关关系,增加了土壤结构的稳定性。

综上所述,林木根系的分布特征受遗传特性和环境条件的影响,但同时又反映了林木对环境条件的适应以及环境资源的变化状况。因此,在对根系进行研究时,应加强对同一立地不同树种、不同立地同一树种根系的分布研究,并与地上部分和林木所处的环境条件的研究结合起来,最大限度地反映根系的分布状况与现实的环境条件状况以及二者之间的相互作用关系。但是人们很少开展这种由于植物根系引起土壤环境的变化,最终土壤环境变化又反过来影响植物根系空间分布变化的研究,因此加强这一方面的研究,将有助于了解植物根系与环境相互作用的机制。

#### [参考文献]

- [1] Jackson R B, Mooney H A, Schulze E D. A global budget for fine root biomass, surface area, and nutrient contents[J]. PNAS, 1997, 94: 7362-7366.
- [2] Hendrick R L, Pregitzer K S. The demography of fine root in a northern hardwood forest[J]. Ecology, 1992, 73: 1094-1104.
- [3] Gale M R, Grigal D E. Vertical root distribution of northern tree species in relation to successional status[J]. Can J For Res, 1987, 17: 829-834.
- [4] Vivek K. A representation of variable root distribution in dynamic vegetation models[J]. Earth Interactions, 2003, 7: 1-19.
- [5] Richard J, Norby, Ledford J, et al. Fine root production dominates responses of a deciduous forest to atmospheric CO<sub>2</sub> enrichment[J]. PNAS, 2004, 101: 9689-9693.
- [6] Schenk H J, Jackson R B. The global biogeography of roots[J]. Ecol Mono, 2002, 72: 311-328.
- [7] 刘政鸿. 黄土高原天然柴松林群落学特性的初步研究[J]. 西北植物学报, 2003, 23(9): 1486-1490.
- [8] Hendrick R L, Pregitzer K S. Temporal and depth related patterns of fine root dynamics in northern hardwood forest[J]. Ecology, 1996, 77(1): 167-176.
- [9] Davis J P, Haines B, Coleman D, et al. Fine root dynamics along an elevational gradient in the southern Appalachian Mountains[J]. USA For Ecol Manage, 2004, 187: 19-34.
- [10] Luo Y P, Meyerhoff A, Loomis R S. Seasonal patterns and vertical distributions of fine root of alfalfa[J]. Field Crops Res, 1995, 40: 119-127.
- [11] Schenk H J, Jackson R B. The global biogeography of roots[J]. Ecol Mono, 2002, 72: 311-328.
- [12] Farrish K W. Spatial and temporal fine root distribution in three Louisiana forest soils[J]. Soil Sci Soc Am J, 1991, 55(6): 1752-1757.
- [13] Crawford R. Oxygen availability as an ecological limit to plant distribution[J]. Adv Ecol Res, 1992, 23: 93-185.
- [14] Baligar V C, Fageria N K, Elrashidi M A. Toxicity and nutrient constraints on root growth[J]. Hort Science, 1998, 33: 960-965.
- [15] Dickman D I, Pregitzer K S. The structure and dynamics of woody plant systems[M]// Mitchell C P, Ford J B, Hinckley T, et al. Ecophysiology of Short Rotation Forest Crops. London: Elsevier Applied Science, 1992: 95-123.
- [16] Sundarapandian S M, Swamy P S. Fine root biomass distribution and productivity patterns under open and closed canopies of tropical forest ecosystems at Kodayar in Western Ghats, South India[J]. For Ecol Manage, 1996, 86: 181-192.
- [17] Pregitzer K S, King J S, Burton A J. Response of tree fine roots to temperature[J]. New Phytol, 2000, 147: 105-115.
- [18] 程云环, 韩有志, 王庆成, 等. 落叶松人工林细根动态与土壤资源有效性的研究[J]. 植物生态学报, 2005, 29(3): 403-410.
- [19] 赵忠, 李鹏, 王乃江. 渭北黄土高原主要造林树种根系分布特征的研究[J]. 应用生态学报, 2000, 11(1): 37-39.
- [20] 任安芝, 高玉葆, 王金龙. 不同沙地生境下黄柳(*Salix gordejvili*)的根系分布和冠层结构特征[J]. 生态学报, 2001(3): 399-404.
- [21] Wraith J M, Wright C K. Soil water and root growth[J]. Hort Science, 1998, 33: 951-959.
- [22] Burgess S S O, Adams M A, Turner N C, et al. Tree roots: conduits for deep recharge of soil water[J]. Oecologia, 2001, 126: 158-165.
- [23] 刘宛秋, 罗良兴, 刘亮英, 等. 退化红壤重建森林初期细根特征及其作用机理研究[J]. 应用生态学报, 2005, 16(9): 1735-1739.