

# 黄土丘陵区油松林细根在坡面的空间分布特征

常恩浩, 李鹏, 刘莹, 徐国策, 柯浩成, 刘琦, 李雄飞

(西安理工大学 西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地, 西安 710048)

**摘要:**以黄土丘陵区人工油松林地坡地为研究对象,采用网格法,距坡顶 10 m(SP<sub>1</sub>),20 m(SP<sub>2</sub>),30 m(SP<sub>3</sub>) 和 40 m(SP<sub>4</sub>)处,分 9 层(20 cm/层)钻取土样,分析了细根形态、生物量的空间分异特征。结果表明:(1)油松细根生物量和根长密度主要分布在 0—100 cm 的土壤中,占 0—180 cm 土壤的 83%和 81%,并随土层深度增加呈指数下降趋势,比根长则随土层深度增加而逐渐增大;(2)SP<sub>1</sub>处细根生物量(1.26 mg/cm<sup>3</sup>)、根长密度(7.21 mm/cm<sup>3</sup>)、根面积密度(13.28 mm<sup>2</sup>/cm<sup>3</sup>)显著小于 SP<sub>2</sub>,SP<sub>3</sub> 和 SP<sub>4</sub>( $p < 0.05$ ),而 SP<sub>1</sub>处比根长(1 099.36 mm/mg)、比根面积(1 075.48 mm<sup>2</sup>/mg)显著大于其他坡位处的( $p < 0.05$ );(3)油松细根在坡面的空间分异性,是由于不同坡位立地条件下土壤水分的显著差异导致,其影响程度达到极显著水平( $p < 0.01$ )。研究结果对于揭示立地条件对根系行为的影响机制具有一定的参考价值,为黄土丘陵区水土保持植物措施的配置提供科学依据。

**关键词:**油松细根;坡位;土层深度;消弱系数;通径分析

中图分类号:S791.254

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2016)05-0028-07

## Spatial Distribution Characteristics of *Pinus tabulaeformis* Fine Root on Sloping Land in Loess Hilly Region

CHANG Enhao, LI Peng, LIU Ying, XU Guoce, KE Haocheng, LIU Qi, LI Xiongfei

(State Key Laboratory Base of Eco-hydraulic Engineering in Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** Root system is sensitive to soil environment and plays an important role in forest ecosystem. Fine root is the core link for mass circulation and energy flow between vegetation and soil environment. Based on the former research about the spatial distribution of fine root, there were significant differences both in vertical and horizontal distribution. Due to different slope positions (SP), the light and heat conditions and soil physicochemical properties were various, which had effects on biological and botanical characteristics of vegetation. These discrepancies could affect the growth and distribution of fine root. Therefore, the study on spatial distribution of fine root on slope is important. Targeting at the artificial *Pinus tabulaeformis* forest in Loess Hilly Region, the grid sampling method was used to analyze the root morphology, biomass spatial variability with 10 m (SP<sub>1</sub>), 20 m (SP<sub>2</sub>), 30 m (SP<sub>3</sub>) and 40 m (SP<sub>4</sub>) from the top of the sloping land. The results showed that: (1) The fine root weight density (FRWD) and fine root length density (FRLD) mainly clustered in the 0—100 cm soil layer which accounted for 83% and 81% of that in the 0—180 cm soil layer, respectively. They decreased exponentially with the increase of soil depth and the specific root length (SRL) added along soil depth, known from the extinction coefficient, the FRWD with 0~2 mm diameter in deep soil layer was less and that with 0~0.5 mm diameter was the least which indicated that the smaller of root diameter, the less FRWD distributed in deep layer; (2) In horizontal direction, the distribution of FRWD, FRLD and fine root area density (FRAD) with various SP showed 'N' type. FRWD, FRLD and SRL had significant difference ( $p < 0.05$ ) with the different SP. FRWD (1.26 mg/cm<sup>3</sup>), FRLD (7.21 mm/cm<sup>3</sup>) and FRAD (13.28 mm<sup>2</sup>/cm<sup>3</sup>) in SP<sub>1</sub> were significantly less than that in SP<sub>2</sub>, SP<sub>3</sub> and SP<sub>4</sub> ( $p < 0.05$ ). The distribution of specific root length (SRL) and specific root area (SRA) with SP showed V-shape. While the SRL (1 099.36 mm/mg) and SRA (1 075.48 mm<sup>2</sup>/mg) in SP<sub>1</sub> were significantly higher than other SP ( $p < 0.05$ ); (3) Fine

收稿日期:2016-01-14

修回日期:2016-01-23

资助项目:国家自然科学基金重点项目“黄土高原生态建设的生态—水文过程响应机理研究”(41330858);国家自然科学基金“基于能量过程的坡沟系统侵蚀产沙过程调控与模拟”(41471226);国家自然科学基金“黄土区退耕生态系统植被根系行为特征与土壤水资源响应”(41271290);水利部公益性行业科研专项经费“生产建设项目水土保持生态效应监测与评价技术研究”(201501045)

第一作者:常恩浩(1991—),男,陕西西安人,硕士研究生,黄土高原植被生态建设。E-mail:123\_cek@163.com

通信作者:李鹏(1974—),男,山东烟台人,教授,水土保持与生态环境建设。E-mail:lipeng74@163.com

root growth on SP<sub>1</sub> were significantly different from other SP ( $p < 0.05$ ), soil water and nutrients were also different from other SP. The spatial difference of fine root was caused by the soil properties of various site conditions with four SP. The direct and indirect effect of soil water, total nitrogen, total phosphorus and total organic carbon on the spatial distribution of fine root was determined by the path coefficient analysis. Regression analysis showed that the main factor of spatial distribution of fine root is the soil water, which had extremely significant effect ( $p < 0.01$ ) on fine root of *Pinus tabulaeformis*. The results will supply references for the influence mechanism of site conditions on root behaviors, and provide scientific basis for the arrangement of soil and water conservation vegetation measures in the loess hilly region.

**Keywords:** *Pinus tabulaeformis*; fine root; slope position; soil layer; extinction coefficient; path analysis

细根对土壤环境响应敏感,在森林生态系统的能量流动、物质循环以及对植物生长、生态环境修复中起着重要作用<sup>[1]</sup>。细根在地下的分布不仅影响林木的生长发育和生产力<sup>[2-3]</sup>,也可以反映植物对环境的适应情况和竞争能力<sup>[4]</sup>。细根作为生态学领域的研究热点之一<sup>[5-7]</sup>,国内外对其分布特征以及生长特性已有相关报道。Jackson 等认为,土壤空间异质性是导致细根分布空间异质性的主要原因<sup>[8]</sup>;Gill 等认为,细根集中在土壤表层并且随土层深度增加而减少主要是受土壤理化性质、土壤水分以及温度的影响<sup>[9]</sup>;国内学者研究发现细根在不同土层的生长也受自身遗传特征影响<sup>[10]</sup>。以往对林木细根研究,多以距树干不同距离、不同林龄等作为水平分布特征<sup>[11-13]</sup>,而以坡位作为细根水平分布的研究鲜见。光热条件和土壤的理化性质会因坡位不同存在空间分异,进而影响植被的生理生长特性<sup>[14-17]</sup>,这些差异同样会影响细根的生长发育和分布,了解细根在坡面的生理生长和形态特征对于优化水土保持退耕还林的配置具有实践意义。因此研究细根坡面空间分布特征具有重要意义。

黄土丘陵区气候干旱少雨,且受到人类活动的强烈影响,原始天然林的破坏殆尽,加速了水土流失,区域生态环境十分脆弱。因此植被建设对于改善黄土丘陵区的生态环境及实现可持续发展等方面发挥着重要作用。油松是一种深根性乔木树种,具有良好的水土保持等生态功能<sup>[18]</sup>,同时也是黄土丘陵地区水土保持植物措施中最常见的树种。本文以 26 a 生人工油松林的坡面细根为对象,研究内容为:(1) 不同坡位和不同土层深度的细根生物量、根长、根面积等特征指标的空间分异性;(2) 影响细根分布差异的主要因素;(3) 各因素影响细根的直接和间接作用。以期通过此研究,了解该地区油松细根在坡面不同位置的组成、分布规律及其与土壤环境因子的关系,对于揭示立地条件对根系行为的影响机制具有一定的参考价值,为黄土丘陵区水土保持植物措施的配置提供科学依据。

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 研究区自然概况

本研究地位于陕西省绥德县王茂沟(110°20'26"—110°22'46"E,37°34'13"—37°36'03"N),是无定河中游左岸的一条二级支沟。海拔高度 940~1 180 m,流域面积 5.74 km<sup>2</sup>,属大陆季风性气候,四季分明,多年平均气温 10.2℃,多年平均降水量 513 mm。土壤以黄绵土覆盖为主,厚度 20~30 m。油松样地位于流域下游左岸阳坡的油松林,坡度为 30°~36°,油松林龄为 26 a,样地详细调查情况见表 1。

表 1 油松林地概况

| 因子      | 坡位              |                 |                 |                 |
|---------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|         | SP <sub>1</sub> | SP <sub>2</sub> | SP <sub>3</sub> | SP <sub>4</sub> |
| 坡度/(°)  | 36              | 32              | 31              | 33              |
| 海拔/m    | 997             | 986             | 974             | 967             |
| 平均树高/m  | 5.7             | 7.6             | 8.1             | 7.9             |
| 平均胸径/cm | 7.2             | 9.7             | 11.3            | 10.4            |
| 郁闭度     | 0.53            | 0.77            | 0.69            | 0.71            |

### 1.2 研究方法

1.2.1 取样 2014 年 7 月,采取网格法(5 m×5 m)对油松林进行采样,将坡面平均分成 21 个水平点位,再将这 21 个水平分布样点分为四个坡位,分别是 SP<sub>1</sub>(距坡顶 10 m)、SP<sub>2</sub>(距坡顶 20 m)、SP<sub>3</sub>(距坡顶 30 m)和 SP<sub>4</sub>(距坡顶 40 m),并且尽量使每个样点距树干距离相同(图 1)。使用内径 9 cm、筒长 10 cm 根钻采集根系与土壤样品,采集深度为 180 cm,每 20 cm 分为一层,共 189 个样本,其中 SP<sub>1</sub>, SP<sub>2</sub>, SP<sub>3</sub> 和 SP<sub>4</sub> 的样本数依次为 54, 45, 45, 45 个。采集的根系及土壤样品放入冷藏箱低温保存,带回实验室待测。

1.2.2 样品处理 首先,用筛子过滤采集到的土样,取出所有根系用水冲洗,反复数次后放到干净滤纸上直至吸干表面水分。再利用游标卡尺将根系分为 5 个径级,分别是  $0 < D_1 \leq 0.5$  mm,  $0.5 < D_2 \leq 1$  mm,  $1 < D_3 \leq 1.5$  mm,  $1.5 < D_4 \leq 2$  mm,  $2 < D_5 \leq 3$  mm。其次,采用根系扫描仪(EPSON TWAIN PRO, 32

bit)的16位灰度模式扫描,精度为300 DPI。用根系分析软件 WinRHIZO 分析扫描图片,于是得到5个径级的根长和根表面积。最后,将根系放入烘箱中,在65℃恒温条件下烘干48 h后称重,精确到0.001 g。各土层细根根长和根面积除以对应土壤体积即为根长密度和根面积密度,同样方法获取各土层细根生物量,两者比值即为比根长和比根面积。土壤全氮、全磷含量用间断化学分析仪(ADA, Cleverchem200, 德国)测定,土壤有机碳含量采用德国耶拿公司的有机碳分析仪 HT1 300 固体模块测定。土壤水分测试方法为:在采样点0.2 m处安装2 m深的测管1根,2014年7月27日至8月5日,每24 h使用TDR土壤水分测量仪分层(20 cm)监测1次,连续监测240 h。

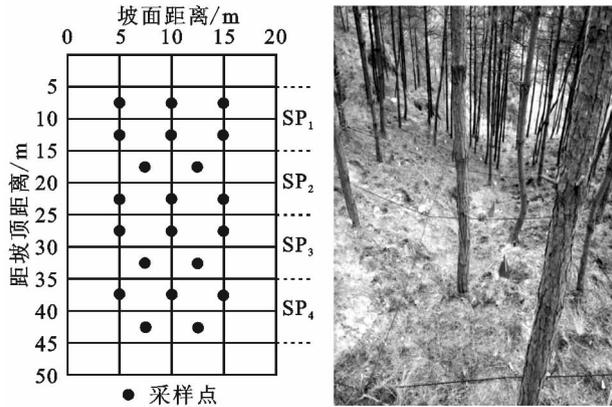


图1 采样点分布

1.2.3 根系垂直分布定量计算 应用根系垂直分布的模型可将细根垂直分布特征进行定量描述<sup>[19]</sup>, $\beta$ 值越大说明根系在深层土壤中分布的百分比越大,反之 $\beta$ 值越小,则说明有更多的根系集中分布于接近地表的土层中,公式如下:

$$Y=1-\beta^h$$

式中: $Y$ 是从地表到一定深度的根系生物量累积的百分比; $h$ 为土层深度(cm); $\beta$ 为根系消弱系数。

### 1.3 数据处理

对同一土层中每个坡位内获得的细根根长密度和生物量等求平均值,获得细根的垂直分布数据;对同一坡位所有土层中的细根根长密度和生物量等相加后求平均值,得到细根的水平分布数据;用指数方程对土层深度与细根生物量、根长密度进行拟合;利用单因素方差分析(ANOVA),对不同处理间细根特征参数的差异显著性进行检验;采用多元回归和通径理论,分析各土壤因子对细根的影响。数据初步统计分析、根系消弱系数计算、作图表,均由Excel 2010软件完成;单因素方差分析(ANOVA)、回归分析、通径分析及回归方程的拟合均由SPSS 20.0软件完成。

## 2 结果与分析

### 2.1 坡面细根垂直分布特征

油松细根的垂直分布特征存在显著差异(图2)。4个坡位中,SP<sub>4</sub>处的0—20 cm土层根长密度(5.51 mm/cm<sup>3</sup>)最大,SP<sub>1</sub>处的80—100 cm土层根长密度(0.30 mm/cm<sup>3</sup>)最小。油松细根根长主要分布于0—100 cm土层中,占总体的81%。20—40 cm,40—60 cm,140—160 cm,160—180 cm土层的不同坡位之间存在显著性差异( $p<0.05$ )。

生物量(1.31 mg/cm<sup>3</sup>)最大出现在SP<sub>3</sub>处的20—40 cm土层中,在SP<sub>1</sub>处的120—140 cm土层中生物量(0.02 mg/cm<sup>3</sup>)最小。油松细根生物量集中分布在0—100 cm土层,占总体的83%。生物量在不同坡位之间无显著性差异( $p>0.05$ )(除20—40 cm土层外),细根根长密度和生物量都随土层深度呈指数下降趋势, $R^2$ 分别为0.96,0.91。

与根长密度和生物量的垂直变化趋势相反,比根长随土层深度增加而增大。在SP<sub>1</sub>处的20—40 cm土层,比根长最大(200.50 mm/mg),而最小值(36.69 mm/mg)出现在SP<sub>1</sub>处的0—20 cm土层中。在20—40 cm,40—60 cm,80—100 cm土层,不同坡位之间比根长存在显著性差异( $p<0.05$ )。

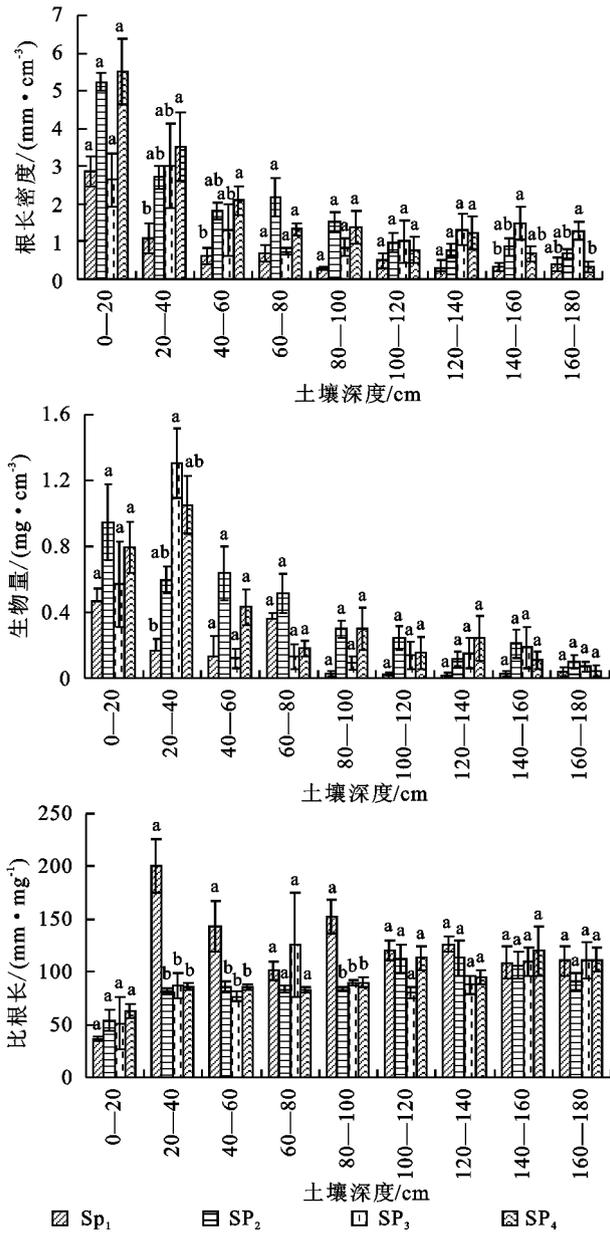
通过对细根生物量的定量研究,可使细根垂直分布特征的描述更为简化和直观。从表2可看出,不同坡位细根生物量的消弱系数存在显著性差异( $p<0.05$ )。在SP<sub>1</sub>处,0< $D$ ≤3 mm生物量 $\beta$ 值为0.978,直径0< $D$ ≤2 mm和0< $D_1$ ≤0.5 mm生物量的 $\beta$ 值分别为0.972,0.955,说明直径小的细根,特别是径级为0< $D_1$ ≤0.5 mm的细根在深层所占比例较少,其余坡位情况基本相同,这一研究结果与李鹏等<sup>[20]</sup>相一致。

SP<sub>1</sub>处的0< $D$ ≤3 mm生物量 $\beta$ 值与其余坡位生物量 $\beta$ 值(0.981,0.981,0.981)无显著性差异( $p>0.05$ ),说明全部细根在深层所占的比例基本一致,但SP<sub>1</sub>处直径0< $D_1$ ≤0.5 mm的细根生物量 $\beta$ 值(0.955)与其他坡位(0.973,0.976,0.974)相比较小( $p<0.05$ ),说明4个坡位中距离坡顶最近距离的细根在深层分布的比例最少。

### 2.2 坡面细根水平分布差异

细根在水平坡面上的分布特征见表3,相同坡位中均是径级为0< $D_1$ ≤0.5 mm细根的根长密度、比根长与比根面积最大( $p<0.05$ )。细根直径在0~2 mm区间内的根长密度随直径增大而减小,说明细根

直径越小,根长越长,该直径区间内细根表面积不随径级变化而变化。比根长与比根面积随细根直径增加而骤减, $0 < D_1 \leq 0.5 \text{ mm}$  的比根长和比根面积最大可达其他径级的 168 倍和 31 倍;径级  $2 < D_5 \leq 3 \text{ mm}$  生物量与根面积密度显著大于其他径级 ( $p < 0.05$ ),说明 2~3 mm 的细根具有较大质量和表面积。比根面积不同径级两两间存在显著性差异 ( $p < 0.05$ )。



注:同一土层中,小写字母相同表示不同坡位间无显著性差异,显著水平  $\alpha=0.05$ 。下同。

图 2 油松细根垂直分布特征

不同坡位上的根长密度、根面积密度和生物量表现为:  $SP_2 > SP_4 > SP_3 > SP_1$ ,其中  $SP_1$  与其他坡位有显著性差异 ( $p < 0.05$ ),说明细根的量随着坡位降低呈现“N”型分布趋势; $SP_1$  处比根长和比根面积显著大于其他坡位 ( $p < 0.05$ ),但总体呈现出先减小后增

大的“V”型分布趋势(表 3)。总之  $SP_1$  处根系形态指标或生物量均与其他坡位存在显著性差异。

表 2 不同径级细根生物量的消弱系数

| 坡位     | $0 < D \leq 3 \text{ mm}$ | $0 < D \leq 2 \text{ mm}$ | $0 < D_1 \leq 0.5 \text{ mm}$ |
|--------|---------------------------|---------------------------|-------------------------------|
|        | 生物量                       | 生物量                       | 生物量                           |
| $SP_1$ | 0.978(0.004)a             | 0.972(0.005)a             | 0.955(0.002)b                 |
| $SP_2$ | 0.981(0.002)a             | 0.981(0.001)a             | 0.973(0.003)a                 |
| $SP_3$ | 0.981(0.005)a             | 0.979(0.005)a             | 0.976(0.009)a                 |
| $SP_4$ | 0.981(0.003)a             | 0.987(0.003)a             | 0.974(0.004)a                 |

注:同一列小写字母相同表示不同坡位间无显著性差异,显著水平  $\alpha=0.05$ 。

2.3 细根空间分布差异的影响因素

土层深度、坡位的不同,使得土壤性质存在空间变异,进而影响油松细根生物量及各形态指标的空间分布情况。研究区不同坡位土壤养分和含水量差异见图 3, $SP_1$  处养分和含水量均有显著大于其他坡位的情况存在 ( $p < 0.05$ )。

将所有坡位和土层中 ( $N=189$ ) 的细根生物量及形态指标与土壤理化性质进行多元回归分析和通径分析(表 4),表明细根生物量主要受土壤水分影响。从土壤水分影响细根生物量的间接作用中发现,土壤水分通过土壤有机碳对细根生物量的间接作用最大,其间接通径系数为-0.010。虽然土壤水分通过全氮(0.008)对细根生物量产生一定逆向的间接作用,但由于直接作用和通过有机碳的作用较大,从而使土壤水分对细根生物量的影响最大,总效应达到了一0.188。因此,土壤水分对细根生物量的影响作用最强。土壤全氮、全磷和有机碳含量的直接和间接通径系数均较小,对细根生物量影响不显著 ( $p > 0.05$ )。

3 讨论

细根在土壤中的空间分布决定植物获取土壤资源的多少以及植物个体间或种群间对土壤资源的竞争能力。比根长可以表征细根收益和花费的关系<sup>[21]</sup>,比根长越大代表着细根吸收土壤资源的效率越高<sup>[22]</sup>,王国梁等<sup>[23]</sup>在研究茵陈蒿细根时表示:比根长随土层深度增加而增大,其认为可能是由于土壤表层养分含量高或者与植物生物学特征有关。而梅莉等<sup>[24]</sup>研究水曲柳比根长时则是径级  $D \leq 1 \text{ mm}$  的细根比根长随土层深度增加无明显变化趋势。本研究细分细根径级后发现,直径处在  $0.5 < D \leq 2 \text{ mm}$  的细根比根长随土层深度增加无明显变化,而  $0 < D_1 \leq 0.5 \text{ mm}$  细根比根长则随土层深度增加而增大。结论差异的原因可能是茵陈蒿细根分布较浅,在表层聚集了大量直径较大的细根;东北地区 17 a 生水曲柳

处于速生期阶段,树高生长速度达到顶峰<sup>[25]</sup>。此时树木需要吸收大量养分、水分来供给地上部分生

长<sup>[11]</sup>,所以各土层之间比根长无明显差异表明各土层的细根均在行使其吸收功能<sup>[26]</sup>。

表 3 不同径级细根形态指标差异(平均值±标准误)

| 坡位  | 径级/mm                 | 生物量/<br>(mg·cm <sup>-3</sup> ) | 根长密度/<br>(mm·cm <sup>-3</sup> ) | 根面积密度/<br>(mm <sup>2</sup> ·cm <sup>-3</sup> ) | 比根长/<br>(mm·mg <sup>-1</sup> ) | 比根面积/<br>(mm <sup>2</sup> ·mg <sup>-1</sup> ) |
|-----|-----------------------|--------------------------------|---------------------------------|------------------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------------------|
| SP1 | 0<D <sub>1</sub> ≤0.5 | 0.13±0.01b                     | 4.80±0.70a                      | 3.32±0.67ab                                    | 945.84±104.59a                 | 609.31±48.63a                                 |
|     | 0.5<D <sub>2</sub> ≤1 | 0.12±0.01b                     | 1.18±0.21b                      | 2.69±0.90ab                                    | 102.47±5.22b                   | 230.39±8.18b                                  |
|     | 1<D <sub>3</sub> ≤1.5 | 0.15±0.02b                     | 0.52±0.12b                      | 2.01±0.81ab                                    | 32.07±1.52b                    | 122.03±5.82c                                  |
|     | 1.5<D <sub>4</sub> ≤2 | 0.10±0.03b                     | 0.21±0.09b                      | 1.16±0.83b                                     | 14.70±3.10b                    | 78.61±17.18cd                                 |
|     | 2<D <sub>5</sub> ≤3   | 0.76±0.38a                     | 0.38±0.12b                      | 4.10±2.34a                                     | 4.28±0.86b                     | 35.14±6.91d                                   |
|     | 总计                    | 1.26±0.43B                     | 7.21±0.51B                      | 13.28±2.48B                                    | 1099.36±104.60A                | 1075.48±41.54A                                |
| SP2 | 0<D <sub>1</sub> ≤0.5 | 0.28±0.05b                     | 12.28±3.00a                     | 9.48±1.87ab                                    | 652.88±45.01a                  | 501.28±14.80a                                 |
|     | 0.5<D <sub>2</sub> ≤1 | 0.43±0.08b                     | 4.47±0.82b                      | 10.1±1.83ab                                    | 99.46±2.99b                    | 223.10±5.54b                                  |
|     | 1<D <sub>3</sub> ≤1.5 | 0.51±0.08b                     | 1.67±0.15b                      | 7.16±1.05bc                                    | 34.73±1.67c                    | 134.73±5.53c                                  |
|     | 1.5<D <sub>4</sub> ≤2 | 0.42±0.04b                     | 0.80±0.07b                      | 4.38±0.38c                                     | 17.14±0.95c                    | 93.66±5.39d                                   |
|     | 2<D <sub>5</sub> ≤3   | 2.02±0.32a                     | 1.28±0.13b                      | 11.64±1.37a                                    | 6.54±0.37c                     | 53.31±2.90e                                   |
|     | 总计                    | 3.66±0.42A                     | 16.84±1.54A                     | 42.76±4.52A                                    | 810.75±43.68B                  | 1006.08±15.49B                                |
| SP3 | 0<D <sub>1</sub> ≤0.5 | 0.19±0.04b                     | 7.62±1.61a                      | 6.12±1.17b                                     | 663.34±50.27a                  | 501.03±11.10a                                 |
|     | 0.5<D <sub>2</sub> ≤1 | 0.30±0.04b                     | 2.98±0.37b                      | 6.74±0.80ab                                    | 100.57±2.48b                   | 223.10±4.72b                                  |
|     | 1<D <sub>3</sub> ≤1.5 | 0.36±0.05b                     | 1.30±0.14b                      | 5.03±0.54b                                     | 31.63±2.13bc                   | 122.07±8.34c                                  |
|     | 1.5<D <sub>4</sub> ≤2 | 0.35±0.03b                     | 0.68±0.06b                      | 3.68±0.31b                                     | 16.47±0.18c                    | 89.12±1.38d                                   |
|     | 2<D <sub>5</sub> ≤3   | 1.58±0.46a                     | 1.06±0.13b                      | 9.71±1.62a                                     | 7.28±0.43c                     | 56.99±3.76e                                   |
|     | 总计                    | 2.77±0.47A                     | 13.65±2.21A                     | 31.27±3.99A                                    | 819.29±49.04B                  | 992.32±19.93B                                 |
| SP4 | 0<D <sub>1</sub> ≤0.5 | 0.20±0.04b                     | 9.90±1.67a                      | 7.76±1.35b                                     | 686.44±49.44a                  | 511.81±14.59a                                 |
|     | 0.5<D <sub>2</sub> ≤1 | 0.30±0.05b                     | 3.44±0.65b                      | 7.78±1.47b                                     | 97.62±3.40b                    | 221.31±7.35b                                  |
|     | 1<D <sub>3</sub> ≤1.5 | 0.33±0.07b                     | 1.37±0.29bc                     | 5.29±1.10b                                     | 37.01±1.57bc                   | 142.36±5.54c                                  |
|     | 1.5<D <sub>4</sub> ≤2 | 0.34±0.06b                     | 0.75±0.13bc                     | 4.09±0.70b                                     | 19.14±1.34c                    | 104.13±7.18d                                  |
|     | 2<D <sub>5</sub> ≤3   | 2.14±0.53a                     | 1.37±0.27c                      | 12.97±2.88a                                    | 6.20±0.43c                     | 50.05±3.35e                                   |
|     | 总计                    | 3.31±0.73A                     | 16.48±2.87A                     | 37.90±7.11A                                    | 846.42±48.02B                  | 1029.67±19.80B                                |

注:同一坡位中具有相同小写字母表示不同径级间无显著性差异;同一列中具有相同大写字母表示不同坡位间无显著性差异,显著水平  $\alpha=0.05$ 。

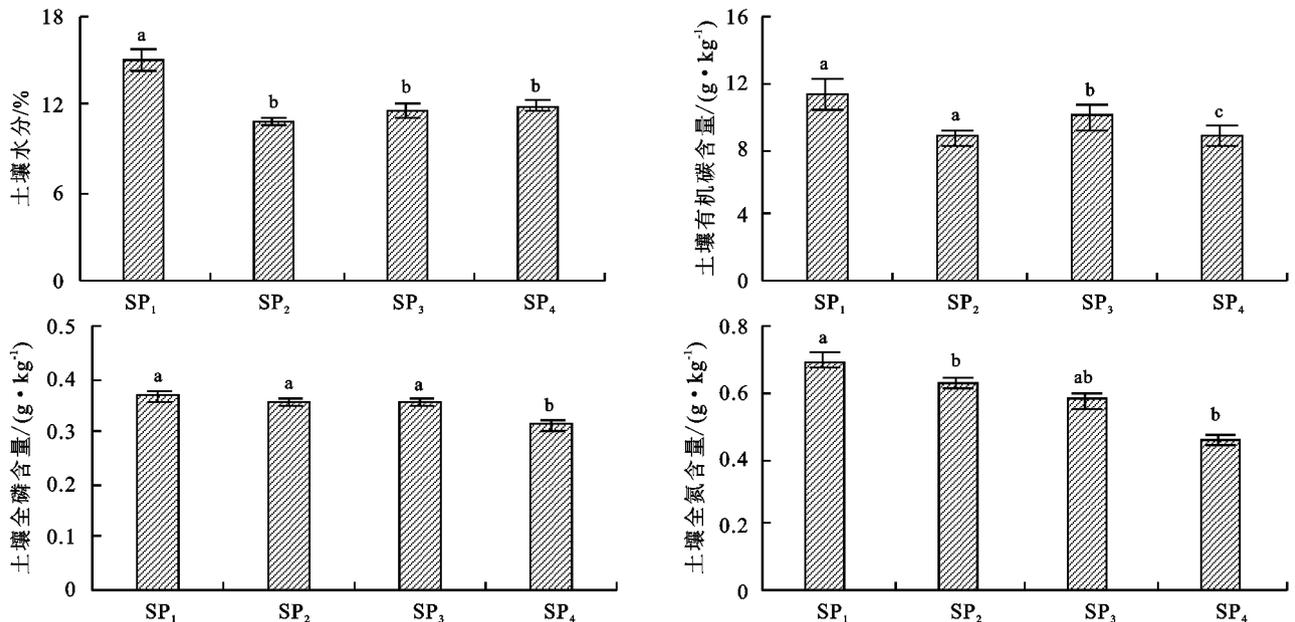


图 3 土壤养分、水分沿坡面变化

表4 细根生物量与土壤因子通径分析

| 指标   | 总效应      | 直接作用     | 间接作用   |        |        |        | 合计     |
|------|----------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|
|      |          |          | 全氮     | 全磷     | 土壤水分   | 有机碳    |        |
| 全氮   | -0.115   | -0.131   | —      | -0.004 | 0.012  | 0.007  | 0.015  |
| 全磷   | -0.028   | -0.039   | -0.012 | —      | -0.003 | 0.026  | 0.011  |
| 土壤水分 | -0.188** | -0.185** | 0.008  | -0.001 | —      | -0.010 | -0.003 |
| 有机碳  | 0.112    | 0.112    | -0.008 | -0.009 | 0.017  | —      | 0.000  |

注:总效应值即为皮尔逊相关系数,\*\*表示在0.01水平(双侧)上显著相关。

根系消弱系数  $\beta$  作为描述植被细根垂直分布特征的重要参数,其研究在最近几年中有着广泛的应用<sup>[27-28]</sup>。本研究样地为阳坡油松林地,4个坡位的细根生物量( $0 < D_1 \leq 0.5 \text{ mm}$ )在深层土壤分布都相对较小,这种分布特征会限制树木对深层土壤水分的吸收利用,不利于树木的生长发育<sup>[29]</sup>。通过对比发现4个坡位的  $0 < D \leq 3 \text{ mm}$  生物量消弱系数无显著性差异( $p > 0.05$ ),但  $SP_1$  处  $0 < D_1 \leq 0.5 \text{ mm}$  细根生物量消弱系数(0.955)最小( $p < 0.05$ ),说明该坡位处细根在深层分布的比例最小,木质化的细根最多。原因可能是:(1)由于坡顶较其他坡位油松林郁闭度小,在阳坡整体温度较高的情况下又承受更多日光照射,使林下土壤温度进一步升高,从而导致细根快速木质化<sup>[20]</sup>。(2)图4为研究区土壤水分空间分布情况,椭圆圈所指是4个坡位20—80 cm 土层的土壤水分,其中80—180 cm 土层的土壤水分含量显著小于( $p < 0.05$ )20—80 cm 土层。当不同土层水分差异较大时,林木会使细根向富水斑块延伸扩展<sup>[30]</sup>,致使4个坡位  $0 < D_1 \leq 0.5 \text{ mm}$  细根均集中分布在上层,而  $SP_1$  处20—80 cm 土壤水分含量在4个坡位中最大( $p < 0.05$ ),从而  $SP_1$  处细根较其他坡位更集中向上生长,表现出  $SP_1$  处细根分布最浅,导致细根在深层分布的比例最小。

通径分析可以通过分解土壤因子对细根影响的总效应,来研究各因子对细根空间分布的直接影响和间接影响作用。油松细根的空间分布受土壤水分影响主要来自土壤水对细根的直接影响作用。在众多间接影响作用中,土壤水分通过土壤有机碳而影响细根的作用最强,是土壤水分通过全氮和全磷影响细根的1.3,10.1倍,同时细根生物量受土壤水分的直接影响达到极显著水平( $p < 0.01$ )。可见,在黄土丘陵区相比于其他土壤养分因子,油松细根受土壤水分的影响最为显著。当土壤水分空间异质性很明显时,林木细根可以通过在贫水斑块中增生的策略来获取水分,导致细根生物量增加<sup>[30]</sup>。 $SP_1$  处的细根生物量显著小于  $SP_2, SP_3$  和  $SP_4$  ( $p < 0.05$ )处的,而  $SP_2, SP_3$  和  $SP_4$  相比  $SP_1$  又属于贫水斑块( $p < 0.05$ ),从而贫水斑块中细根生物量大,与本研究土壤水分和细根生物量呈极显著负相关( $p < 0.01$ )相吻合,这一结果与 Zhou 等<sup>[31]</sup>相同。

### 4 结论

(1)在整个坡面中,细根生物量、根长密度都随土层深度增加而减小,这个过程可用指数函数来模拟;比根长随土层深度增加而增大;径级为  $0 < D_1 \leq 0.5 \text{ mm}$  细根生物量相比所有径级在深层分布的较少,并且细根直径越小,在深层分布的比例越小。

(2)随着细根直径增加,细根根长密度、比根长和比根面积显著减小( $p < 0.05$ );细根形态或生物量受不同坡位立地条件的影响显著,其中  $SP_1$  处生物量、根长密度和根面积密度显著小于( $p < 0.05$ )其他坡位处的; $SP_1$  处比根长和比根面积显著大于( $p < 0.05$ )其他坡位处的,并且随着坡位降低,呈现出先增大后减小的“V”型分布趋势。

(3)影响细根生物量空间分布的主要因素是土壤水分,其对细根的影响程度达到极显著水平( $p < 0.01$ );相比土壤全氮、全磷和总有机碳等养分因子,土壤水分是影响油松细根空间分布的限制性因子,不同坡位立地条件下土壤水分空间分异是导致油松细根生物量空间分布差异的主要原因。

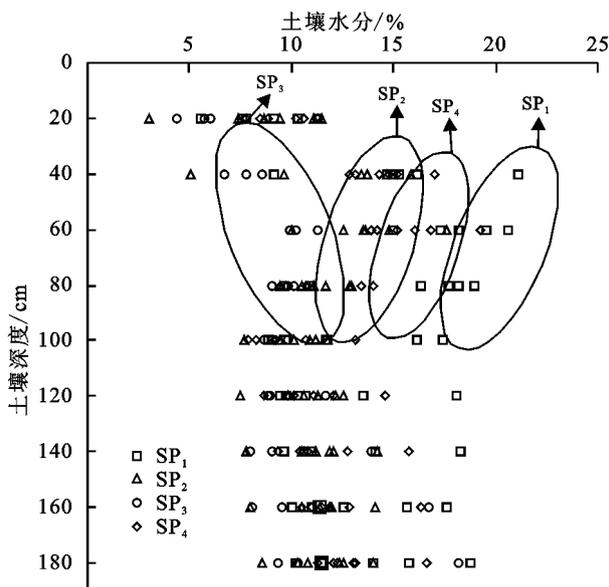


图4 土壤水分在土壤剖面的分布情况

## 参考文献:

- [1] Gordon W S, Jackson R B. Nutrient concentrations in fine roots[J]. *Ecology*, 2000, 81(1): 275-280.
- [2] Johnson M G, Tingey D T, Phillips D L, et al. Advancing fine root research with minirhizotrons[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2001, 45(3): 263-289.
- [3] Hendrick R L, Pregitzer K S. Patterns of fine root mortality in two sugar maple forest[J]. *Nature*, 1993, 361: 59-61.
- [4] 黄刚, 赵学勇, 赵玉萍, 等. 科尔沁沙地两种典型灌木独生和混交的根系分布规律[J]. *中国沙漠*, 2007, 27(2): 239-243.
- [5] 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.
- [6] Vogt K A, Grier C C, Vogt D J. Production, turnover, and nutrient dynamics of above-and belowground detritus of world forests[J]. *Advances in Ecological Research*, 1986, 15: 303-378.
- [7] 郭忠玲, 郑金萍, 马元丹, 等. 长白山几种主要森林群落木本植物细根生物量及其动态[J]. *生态学报*, 2006, 26(9): 2855-2862.
- [8] Jackson R B, Mooney H A, Schulze E D. A global budget for fine root biomass, surface area, and nutrient contents[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1997, 94(14): 7362-7366.
- [9] Gill R A, Burke I C, Lauenroth W K, et al. Longevity and turnover of roots in the shortgrass steppe: influence of diameter and depth[J]. *Plant Ecology*, 2002, 159(2): 241-251.
- [10] 韦兰英, 上官周平. 黄土高原子午岭天然柴松林细根垂直分布特征[J]. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2007, 35(7): 70-74.
- [11] 程瑞梅, 王瑞丽, 肖文发, 等. 三峡库区马尾松根系生物量的空间分布[J]. *生态学报*, 2012, 32(3): 823-832.
- [12] 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.
- [13] 成文浩, 陈林. 贺兰山油松林根系空间分布特征研究[J]. *水土保持研究*, 2013, 20(1): 89-94.
- [14] 靳甜甜, 傅伯杰, 刘国华, 等. 不同坡位沙棘光合日变化及其主要环境因子[J]. *生态学报*, 2011, 31(7): 1783-1793.
- [15] 祁建, 马克明, 张育新. 北京东灵山不同坡位辽东栎 (*Quercus liaotungensis*) 叶属性的比较[J]. *生态学报*, 2008, 28(1): 122-128.
- [16] 梁淑娟, 潘攀, 孙志虎, 等. 坡位对水曲柳及胡桃楸生长的影响[J]. *东北林业大学学报*, 2005, 33(3): 17-19.
- [17] 赵思金, 韩烈保, 张咏新, 等. 不同坡位胡枝子光合特性及其影响因子研究[J]. *西北植物学报*, 2008, 28(2): 342-347.
- [18] 杨玉姣, 陈云明, 曹扬. 黄土丘陵区油松人工林生态系统碳密度及其分配[J]. *生态学报*, 2014, 34(8): 2128-2136.
- [19] Gale M R, Grigal D F. Vertical root distributions of northern tree species in relation to successional status[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 1987, 17(8): 829-834.
- [20] 李鹏, 赵忠, 李占斌, 等. 渭北黄土区刺槐根系空间分布特征研究[J]. *生态环境*, 2005, 14(3): 405-409.
- [21] Waisel Y, Eshel A, Kafkafi U. Plant Roots, the Hidden Half[M]. New York: Marcel Dekker Inc., 1991: 3-25.
- [22] Eissenstat D M. Costs and benefits of constructing roots of small diameter[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 1992, 15(6/7): 763-782.
- [23] 王国梁, 周东. 黄土丘陵区退耕地先锋群落演替过程中细根特征的变化[J]. *西北植物学报*, 2009, 29(2): 356-364.
- [24] 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.
- [25] 林士杰, 张忠辉, 谢朋, 等. 中国水曲柳基因资源的保护与利用[J]. *中国农学通报*, 2009, 25(24): 158-162.
- [26] Hendrick R L, Pregitzer K S. The dynamics of fine root length, biomass, and nitrogen content in two northern hardwood ecosystems[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 1993, 23(4): 2507-2520.
- [27] Stone E L, Kalisz P J. On the maximum extent of tree roots[J]. *Forest Ecology and Management*, 1991, 46(1): 59-102.
- [28] Jackson R B, Canadell J, Ehleringer J R, et al. A global analysis of root distribution for terrestrial biomes[J]. *Oecologia*, 1996, 108(3): 389-411.
- [29] 李鹏, 李占斌, 澹台湛. 黄土高原退耕草地植被根系动态分布特征[J]. *应用生态学报*, 2005, 16(5): 849-853.
- [30] Wullschlegel S D, Jackson R B, Currie W S, et al. Belowground processes in gap models for simulating forest response to global change[J]. *Climatic Change*, 2001, 51(3/4): 449-473.
- [31] Zhou Z, Shanguan Z. Vertical distribution of fine roots in relation to soil factors in *Pinus tabulaeformis* Carr. forest of the Loess Plateau of China[J]. *Plant and Soil*, 2007, 291(1/2): 119-129.