

# 林木细根分布规律与土壤水分响应关系研究<sup>\*</sup>

陈文庆<sup>1</sup>, 李 鹏<sup>2</sup>, 张良恩<sup>3</sup>

(1. 黄河万家寨水利枢纽有限公司电站管理局, 山西 偏关 036412; 2. 西安理工大学, 西安 710048; 3. 青岛市黄岛区红石崖街道办事处, 山东 青岛 266426)

**摘 要:**通过野外调查和室内分析, 对渭北黄土高原主要造林树种的根系分布特征和土壤水分的季节变化规律进行研究。结果表明: 林地土壤水分可以划分为土壤水分活跃层、土壤水分稳定利用层和土壤水分稳定层 3 个层次, 不同立地不同层次上的土壤含水量具有不同的时空分布特征。对不同立地条件上林木根系分布特征的研究结果表明, 不同立地上刺槐根系的空间分布特征具有明显差异, 阴坡立地上的刺槐根系具有更大的分布空间。进一步的分析结果表明, 土壤水分的变化规律与根系的分布特征有密切的关系, 适宜的水分环境可以保证根系得到充分的生长发育, 扩大水分养分的吸收空间, 使林木的地上部分表现出更大的生产力, 反之则降低林木生产力。

**关键词:**根系分布特征; 土壤水分; 季节变化; 响应关系; 渭北地区

中图分类号: S152. 7; S715

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2009)06-0092-05

## Researches on Fine Root Dynamics in *Robinia pseudoacacia* Forest and Its Response with Soil Moisture

CHEN Wen-qing<sup>1</sup>, LI Peng<sup>2</sup>, ZHANG Liang-en<sup>3</sup>

(1. Hydroelectricity Management Bureau, Wanjiashai Limited Liability Company of Hydro-junction Engineer, Pianguan, Shanxi, 036412 China; 2. Xi'an University of Technology, Xi'an, 710048, China; 3. Street Daily Affairs Office, Huangdao District, Qingdao, Shandong 266426, China)

**Abstract:** Based on field investigation and indoor analysis, fine root dynamics and seasonal changes of soil moisture in *Robinia pseudoacacia* forest land on Weibei Loess Plateau was studied. Results from root investigation indicated that spatial distribution of fine root was different with site conditions, fine root on northern site had larger distribution regions. Results of soil moisture dynamics indicated that soil moisture distribution across profile could be divided into three layers: active soil moisture layer, stable-utilization soil moisture layer, and stable soil moisture layer. And site condition profoundly influenced soil moisture temporal and spatial distribution patterns. Further analysis indicated close relation was existed between soil moisture and fine root distributions. Suitable soil moisture environment promoted the growth of fine root, and consequently showed higher productivity of above biomass; otherwise land productivity tended to be decreased.

**Key words:** root distribution characters; soil moisture; seasonal changes; Weibei Loess area.

长期以来, 土壤水分关系的研究, 一直是黄土高原地区水分利用和环境整治的主要研究内容<sup>[1]</sup>。土壤水分是制约黄土高原地区植被恢复与重建的主要限制因子, 也是决定土壤生产力的一个重要因素<sup>[2-3]</sup>。针对黄土高原土壤水分的特性, 研究人员对黄土高原不同植被类型、不同地形和不同的土地

利用结构类型对土壤水分的影响等进行了深入细致的研究<sup>[4-8]</sup>。研究结果表明: 黄土丘陵小流域土壤水分的空间异质性是立地尺度、坡面尺度和流域尺度等多重尺度上的环境因子共同作用的结果<sup>[9-11]</sup>, 这些不同尺度的环境因子对土壤水分空间异质性的影响表现出明显时空变化规律。而在同一空间尺度

\* 收稿日期: 2009-09-29

基金项目: 陕西省自然科学基金重点项目(SJ08-ZD02); “十一五”国家科技支撑计划(2006BAD09B02); 国家重点基础研究发展规划项目(2007CB407206)

作者简介: 陈文庆(1972-), 男, 山东潍坊人, 工程师, 主要从事水土保持生态环境建设等方面的工作。E-mail: pgcwq5166@sina.com

通信作者: 李鹏(1974-), 男, 山东烟台人, 博士, 主要从事水土资源与环境等方面的研究。E-mail: lipeng74@163.com

上, 土壤的水分分布又受地形条件(包括微地貌等)<sup>[12]</sup>和植被类型共同作用的影响, 表现出一定的空间变异特性<sup>[13-14]</sup>。

近年来, 黄土高原植被建设引起的土壤水文效应问题, 尤其由于植物根系吸水, 土壤水分大量蒸散形成的蒸散型土壤干层问题日益引起人们的重视。土壤干化不仅使黄土高原形成大面积的低产林, 严重的还导致植被明显衰退以致死亡<sup>[15]</sup>。为了进一步揭示这一问题的本质原因, 研究人员对植被及其根系统的生态、水文环境效应和土壤水分的空间分布特征等方面进行深入细致的研究<sup>[16-20]</sup>。已经证实, 人工林对土壤水分的大量消耗会导致林地深层土壤逐渐的干化, 尤其是在阳向立地上<sup>[21-22]</sup>。余新晓等人<sup>[23]</sup>的研究发现在干旱地区, 具有发达根系的树种具有明显的生存优势。土壤剖面的水分分布, 决定活性根系的分布, 而活性根系又可以改变土体的水分分布, 而这种变化了的土壤水分条件又对植被根系的分布特征产生深刻的影响, 改变了植被根系的分布特征以及细根的周转<sup>[24]</sup>。

随着研究的进一步深入, 研究人员逐渐认识到, 根系的空间分布特征决定了植被拥有的营养空间的大小和对土壤水分养分的利用能力<sup>[25-27]</sup>, 因此植被根系研究在生态环境和植被建设(如森林培育和植树造林)的研究中占有举足轻重的地位。但是目前的研究中, 如何把根系与土壤水分研究有效的结合

在一起, 进一步揭示植被根系与土壤水分之间的关系依然是一个亟需解决的问题。本研究通过对林木根系调查和土壤水分观测。

1 材料与方法

1.1 研究地区概况

调查地位于陕西省长武县。当地为黄土高原残塬沟壑区, 属于暖温带大陆性季风气候。土壤横跨两个地带性土类, 即由褐土带向黑垆土带过渡, 主要土壤类型有黑垆土、黄绵土、碳酸盐褐土和红胶土, 成土母质均为黄土。当地海拔 950~ 1 225 m, 年均气温 9.1℃, 年均降水量 584.1 mm。降水量主要集中于 7- 9 月, 无霜期 171 d。

1.2 土壤水分监测

水分定位观测点设置在样木, 采用中子水分测定定位观测的方法<sup>[4-7]</sup>, 以每 10 cm 为一个层次, 测深 400 cm, 每月 1 次, 常年观测。

1.3 根系取样分析方法

选择长武县王东沟流域不同坡向上的刺槐林为调查对象(如表 1), 在样地内随机选取 30 株样木, 进行每木检尺, 并从中选择出 4 株平均样木。采用改进的 1/4 样圆法对根系进行调查<sup>[25-26]</sup>。将从野外采集的根系样品, 用蒸馏水清洗干净后, 用烘干法测定不同径级根系的生物量, 用根系扫描仪对根系形态指标(根系长度、根系表面积以及根系体积)等指标进行测定分析。

表 1 王东沟流域刺槐林乔木根系调查样地概况

立地	地点	坡向	坡度/(°)	坡位	土壤	林龄/a	平均高/m	平均胸径/cm
阴坡	杏树壕	东向	16	下位	黄壤土	23	14.2	14.7
阳坡	尚家洼	西向	30	中上位	黄壤土	25	12.0**	13.0

\* \* 该阳坡立地上的刺槐也出现上部枯死现象, 干枯部分的高度为 2.5 m。

1.4 数据分析

将同一样地上 4 株树木在不同方位营养空间上、不同距离上特定径级根系的分布按照下列公式进行合并计算,

1.4.1 根系生物量水平分布特征的计算

$$\rho = M / (\pi R^2 H) \tag{1}$$

式中:  $\rho$ ——根系密度( $g/cm^3$ );  $\pi$ ——圆周率;  $R$ ——土钻半径(3.4 m);  $H$ ——该点上根系的分布深度。

1.4.2 根系生物量垂直分布特征的计算

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k m}{nk} \times \frac{1}{\pi R^2 h} \tag{2}$$

式中:  $\rho$ ——根系密度( $g/cm^3$ );  $\pi$ ——圆周率;  $R$ ——土钻半径(3.4 cm);  $h$ ——土层厚度(10 cm);  $m$ ——根重(g);  $n, k$ ——样本总数及样点总数。

2 结果与讨论

2.1 刺槐根系分布特征

2.1.1 刺槐根系生物量的垂直分布特征 从图 1 中可以看出, 阴坡立地上的刺槐具有与阳坡立地上的刺槐完全不同的根系分布特征。在阴坡立地上, 距离树干不同距离处的根系在不同深度的土层中均有分布, 0.5 m 处的根系集中分布在 50- 70 cm 的土层中, 距离树干 1.0 m 处的根系集中分布在 70- 90 cm 的土层中, 距离树干 1.5 m 处的根系在表层 30- 70 cm 的土层中分布相对比较集中, 距离树干 2.0 m 处的根系在表层 30- 50 cm 和深层 110- 140 cm 处都有比较大的分布, 距离树干 2.5 m 处的根系在 40- 70 cm 和 110- 130 cm 的土层中都有比较大的分布, 距离树

干 3.0 m 处的根系生物量比较少, 而且其分布集中于表层 60 cm 以内的土层中。而在阳坡立地上, 距离树

干不同距离处的根系表现出了比较一致的分布特征, 集中分布在 40– 80 cm 的土层中。

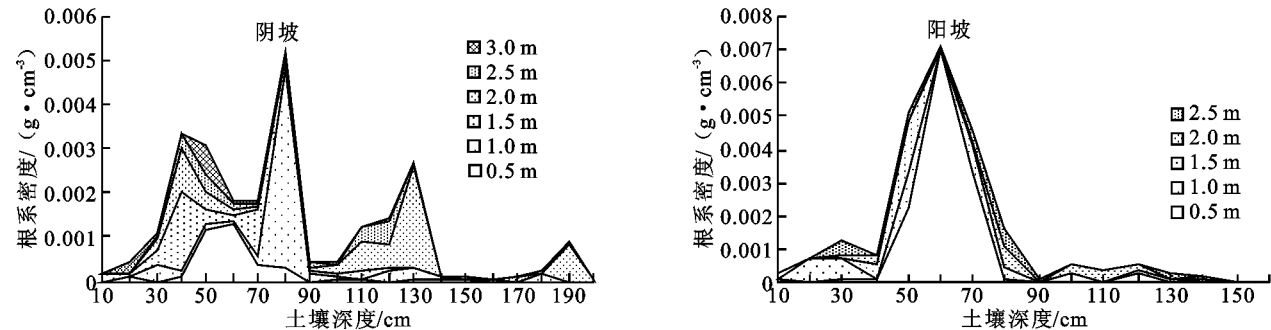


图 1 不同立地上刺槐根系的垂直分布特征

可以看出, 阴坡立地上, 根系在距离树干不同距离处、不同深度的土层中均有分布, 这种根系分布特征有利于树木从距离树干不同距离处、不同深度的土层中吸收土壤水分, 具有更大的水分吸收空间, 有利于树木的生长发育。而在阳坡立地上, 距离树干不同距离处的刺槐根系都集中分布在较浅的土层中, 这种分布特征限制了树木的水分吸收空间, 并且在很大程度上受外界环境条件(降雨、蒸发等)的制约, 不利于树木的生长发育。

对不同径级刺槐根系生物量分布特征的分析结果表明<sup>[26]</sup>, 在两个立地上的所有根系中, 直径  $d < 1$  mm 的根系生物量具有明显的差异, 反映了立地条

件对于树木生长的影响, 可以作为反映根系吸收等生理特性的有效根系。

2.1.2 根系长度的分布特征 根系长度作为反映根系生态特征及其生理功能的主要指标, 一直是根系研究的重点内容之一。从图 2 中可以看出, 不同径级的根系长度表现出了不同的分布特征。其中, 小径级 ( $d < 1$  mm) 根系长度的分布值最大, 是决定刺槐根系长度分布特征的主要根系。因此细根长度 ( $d < 1$  mm) 的差别是造成两个立地上根系长度分布特征产生差异的主要原因。这从另外一个角度说明了直径  $d < 1$  mm 的根系反映了立地条件对于树木生长的影响, 可以作为反映根系吸收等生理特性的有效根系。

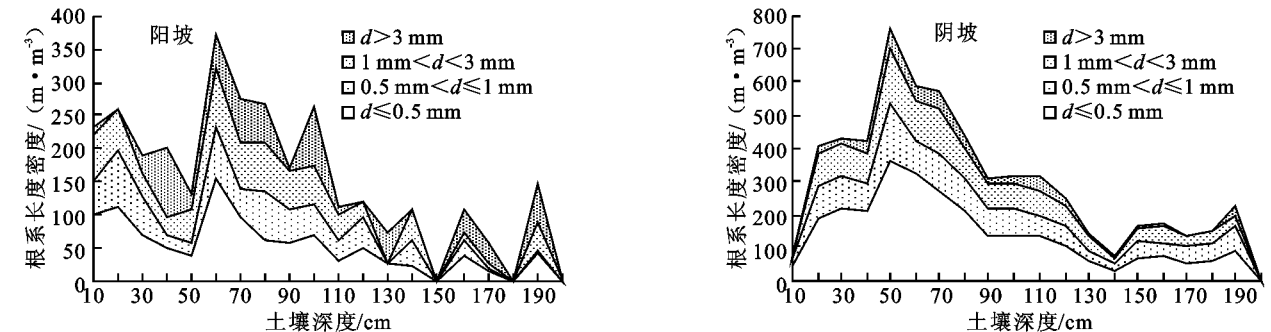


图 2 刺槐根系的空间分布特征

进一步分析结果表明两个立地上的根系长度具有不同的分布特征。可以看出, 阳坡立地上的根系长度集中分布在 0– 150 cm 深的土层中, 其根系长度在表层和 60 cm 深的土层中分别出现两次峰值, 这样可以保证阳坡立地上的刺槐根系对表层来自降雨的土壤水分的吸收利用; 而阴坡立地上的刺槐根系集中分布在 60 cm 深的土层中, 并且在 0– 150 cm 范围都有较大的分布, 与阳坡立地相比, 其在表层分布的细根长度较小, 说明阴坡立地上的刺槐在更大程度上依赖于对深层土壤水分的吸收利用。

2.2 土壤水分的时空变化特征

对 2004 年样地土壤含水量的观测结果进行初步分析, 结果表明, 1– 3 月, 4– 6 月, 8– 9 月和 11–

12 月的土壤含水量的变化趋势基本一致, 因此在分析的过程中, 为了使图表更加清晰, 对变化基本一致的月份进行了合并(见图 3)。

从图 3 中可以看出, 不同立地上的土壤含水量具有相似的变化规律。根据土壤含水量的年内变化规律, 可以将垂直方向上的土壤含水量划分为三个层次: 土壤水分活跃层、土壤水分稳定利用层和土壤水分稳定层。在阳坡立地上, 土壤水分活跃层的深度范围是 0– 100 cm, 土壤水分稳定利用层的深度范围是 100– 270 cm, 深度超过 270 cm 的土层为土壤水分稳定层。其中土壤水分活跃层的土壤含水量由于降雨的季节性补充而有所上升或者降低; 土壤水分稳定利用层上的土壤含水量具有明显的季节性

变化规律, 经过一个冬季的恢复和补充(1—3月), 其土壤含水量达到最为充沛的状态, 整个剖面上的土壤含水量水平较高。随着生长季节的到来, 由于植被生长的需要, 土壤水分逐渐被消耗, 因而在4—

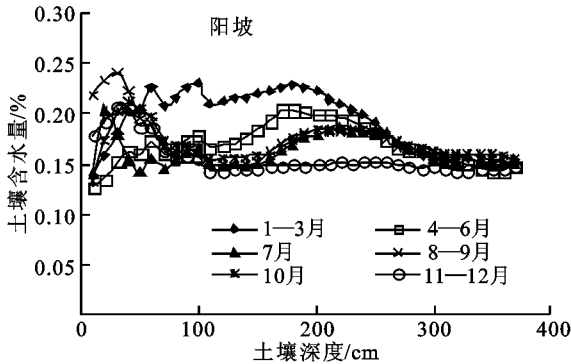
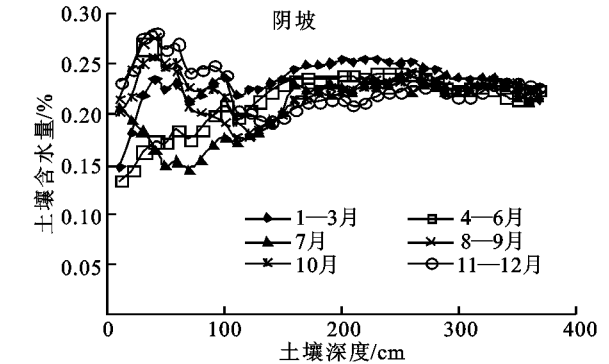


图3 土壤含水量的时空变化

而在阴坡立地上, 土壤水分活跃层的深度范围是0—130 cm, 土壤水分稳定利用层的深度范围是140—270 cm, 深度超过270 cm的土层为土壤水分稳定层。整个剖面上的土壤含水量也表现出了明显的季节性变化规律。其中, 表层土壤水分活跃层的土壤含水量由于受降雨的季节性补充的影响而上升或者下降; 随着生长季节到来, 土壤水分稳定利用层的含水量具有与阳坡立地土壤含水量相似的变化规律, 即在1—3月土壤含水量最高, 随着植被的生长逐渐旺盛, 在4—6月、8—9月和10月, 土壤含水量逐渐降低, 在生长季节结束的时候, 土壤含水量降低到最低程度, 随后又进入了新的水分补充季节; 土壤水分稳定层的含水量基本稳定在20%左右。

对两个立地上土壤含水量的时空变化规律进行比较分析, 可以发现尽管两个立地上的土壤含水量具有相似的变化规律, 但是其变化的特征具有很大的差异。首先, 两个立地上土壤水分活跃层的深度范围不同, 阳坡立地上的土壤水分活跃层的深度为100 cm, 而阴坡立地上土壤水分活跃层的深度为130 cm。分析其原因可知, 生长季节阴坡立地上的光照强度较阳坡立地上弱, 加之阴坡立地上林地中枯落物覆盖较好, 根据前人的研究结果可知, 枯落物的存在能够有效的拦蓄雨水、延阻地表径流、抑制蒸发和提高降雨入渗量的作用<sup>[28]</sup>。其次, 土壤水分稳定利用层土壤含水量的变化幅度有明显的差异, 尽管两个立地上的土壤水分稳定利用层的含水量的年内变化规律一致, 但是阳坡立地上土壤含水量的变化幅度远大于阴坡立地上的。产生这种变化的原因主要是由于阳坡立地上土壤水分蒸发和植被蒸腾作用较大而引起的。再次, 土壤水分稳定层的含水量不同, 阴坡立地上土壤水分稳定层的含水量(20%)大于阳

坡立地上的(15%), 这也从侧面说明阴坡立地上的土壤水分条件和深层补给能力要优于阳坡立地。



坡立地上的(15%), 这也从侧面说明阴坡立地上的土壤水分条件和深层补给能力要优于阳坡立地。

### 2.3 根系分布特征与土壤水分的关系

根据前人的研究可知, 适当的干旱能够诱导根系下扎, 使根系拥有更大的水分空间。进一步的研究结果表明<sup>[25]</sup>, 干旱程度和时间超过一定限度, 就会对根系的生长产生抑制作用, 降低根系活力, 甚至导致根系死亡。另外, 干旱和高温能够提高根系木质化程度, 加速根系老化, 降低根系的吸收性能。

对比图1—3之间的区别和联系可以看出, 由于阳坡立地上的水分蒸腾和蒸发作用较强, 导致阳坡立地上不同深度上的土壤水分的含量低于阴坡立地。土壤水分的变化对根系的分布特征产生深刻影响。土壤干旱限制了根系的进一步生长发育, 进而造成阳坡立地上的根系分布范围减小, 大径级根系含量增加, 从根系长度的分布特征来看, 其细根的根系长度也比阴坡立地上的大大降低, 这说明阳坡立地上的土壤水分环境条件已经对刺槐根系的生长产生了限制作用。强烈的耗水及根系吸收能力使阳坡立地上根系分布范围内(包括深层)土壤水分含量在生长季节降低, 为了适应干旱环境的变化, 阳坡立地上的根系更多的集中在表层中, 以提高对雨水的利用效率, 维持地上部分的生长发育。加之地面温度较高加速根系老化, 其根系的吸收能力进一步受到了限制。

而在阴坡立地上, 由于水分蒸发和蒸腾作用相对较弱, 不同土层深度上的土壤水分含量相对较高, 加之水分活跃层与水分的补给层基本吻合, 保证了土壤水分的充分供给, 因而刺槐根系的主要分布层也集中在这一范围之内。干旱季节适当的干旱反而促进了根系向深层的生长发育, 扩大了根系的空间

分布范围,有助于根系对更大范围内水分的吸收,保证了地上部分的正常生长发育。从根系的径级组成来看,其细根的比例更大,说明阴坡立地上的土壤环境更有利于根系的生长发育。

总之,对比分析根系与水分二者之间的关系不难看出,细根分布特征与土壤水分之间存在着密切的联系,适宜的水分环境可以保证根系得到充分的生长发育,扩大水分养分的吸收空间,使林木的地上部分表现出更大的生产力(表 1);而当土壤的水分环境降低到一定程度的时候,对根系的生长发育也产生了抑制作用,降低林木生产力。

### 3 结论

通过对刺槐根系生物量和根系长度分布特征、林地土壤水分动态变化规律以及二者之间关系的研究,可以得出以下结论。

(1) 在不同立地上,刺槐根系的空间分布特征具有明显差异。其中在阴坡立地上,距离树干不同距离处,刺槐根系在不同深度的土层中均有分布,扩大了刺槐根系的吸收空间范围,有利于树木地上部分的生长;而阳坡立地上的刺槐根系集中分布在 40–80 cm 的土层中,限制了根系在土层中的吸收空间,对树木地上部分的生长也产生了一定的限制作用。从根系水平分布特征来看,在阳坡立地上,随着离树干距离的增加,根系生物量迅速减少;而在阴坡立地上,根系生物量在 1.0 m, 1.5 m 和 2.0 m 处达到最大值,这从另外一个角度说明了阳坡立地上的刺槐根系具有更大的吸收空间。

(2) 对根系长度的分析结果表明:小径级( $d < 1$  mm)根系长度的分布值最大,是决定刺槐根系长度分布特征的主要根系。细根长度( $d < 1$  mm)的差别是造成两个立地上根系长度分布特征产生差异的主要原因。这从另外一个角度说明了,直径  $d < 1$  mm 的根系反映了立地条件对于树木生长的影响,可以作为反映根系吸收等生理特性的有效根系。分析根系与水分之间的关系可以看出,适宜的水分环境可以保证根系得到充分的生长发育,扩大水分养分的吸收空间,使林木的地上部分表现出更大的生产力;反之则降低林木的生产力。

参考文献:

[1] 李洪建,王孟本,柴宝峰. 黄土高原土壤水分变化的时空特征分析[J]. 应用生态学报, 2003, 14(4): 515–519.  
[2] 傅伯杰,王军,王克明. 黄土丘陵区土地利用对土壤水

分的影响[J]. 中国科学基金, 1999(4): 225–227.

- [3] 胡良军,邵明安. 黄土高原植被恢复的水分生态环境研究[J]. 应用生态学报, 2002, 13(8): 1045–1048.  
[4] 王志强,刘宝元,海春兴,等. 晋西北黄土丘陵区不同植被类型土壤水分分析[J]. 干旱区资源与环境, 2002, 16(4): 53–57.  
[5] 赵世伟,周印东,吴金水. 子午岭北部不同植被类型土壤水分特征研究[J]. 水土保持学报, 2002, 16(4): 119–122.  
[6] 黄奕龙,陈利顶,傅伯杰,等. 黄土丘陵小流域地形和土地利用对土壤水分时空格局的影响[J]. 第四纪研究, 2003, 23(3): 334–342.  
[7] 刘梅,蒋定生,黄国俊,等. 不同坡面位置土壤水分差异规律分析[J]. 水土保持通报, 1990, 10(2): 16–20.  
[8] 王军,傅伯杰. 黄土丘陵小流域土地利用结构对土壤水分时空分布的影响[J]. 地理学报, 2000, 55(1): 84–91.  
[9] 邱扬,傅伯杰,王军. 黄土丘陵小流域土壤水分的空间异质性及其影响因子[J]. 应用生态学报, 2001, 12(5): 715–720.  
[10] Qiu Y, Fu B, Wang J, et al. Soil moisture variation in relation to topography and land use in a hillslope catchment of the Loess Plateau, China [J]. J. Hydrol., 2001, 240: 243–263.  
[11] Qiu Y, Fu B, Wang J, et al. Spatial variability of soil moisture content and its relation to environmental indices in a semi-arid gully catchment of the Loess Plateau, China [J]. J. Arid Environ., 2001, 49: 723–750.  
[12] 王玉宽,朱波,高美容. 小流域土壤水分空间分异特征及稳定性分析[J]. 山地学报, 2004, 22(1): 116–120.  
[13] 何福红,黄明斌,党廷辉. 黄土高原沟壑区小流域土壤水分空间分布特征[J]. 水土保持通报, 2002, 22(4): 6–9.  
[14] 王春红,王治国,铁梅,等. 河沟流域土壤水分空间变化及植被分布与生物量研究[J]. 中国水土保持, 2004(2): 18–23.  
[15] 王国梁,刘国彬,常欣,等. 黄土丘陵区小流域植被建设的土壤水文效应[J]. 自然资源学报, 2002, 17(3): 339–344.  
[16] Jackson R B, Canadell J, Mooney H A. A global analysis of root distribution for terrestrial biomes [J]. Oecologia, 1996: 389–411.  
[17] Stone E L, Kalisz P J. On the maximum extent of tree roots [J]. For. Ecol. Manage, 1998, 46: 59–102.  
[18] 马祥华,白文娟,焦菊英,等. 黄土丘陵沟壑区退耕地植被恢复中的土壤水分变化研究[J]. 水土保持通报, 2004, 24(5): 19–23.  
[19] 马祥华,白文娟,焦菊英,等. 丘陵沟壑区退耕地植被恢复中的土壤水分变化研究[J]. 水土保持通报, 2004, 24(4): 19–23.

(下转第 101 页)

速率最大, 2 cm 和 4 cm( 相对位点 0.33 和 0.67) 处次之, 1 cm( 相对位点 0.17) 处最低, 由外到内呈现低-高-低的态势。结果进一步验证了 N. philips<sup>[8]</sup> 等人在研究火炬松时指出的针叶树种液流主要发生在从形成层起到形成层以下 40 mm 左右的深度的结论。

(3) 各气象因子昼夜变化规律明显, 油松单株树干液流量变化规律与其同步检测的气象因子如太阳辐射、空气温度、空气相对湿度等环境因子相吻合。但液流量与各气象因子变化具有不同步性, 液流启动时间在日出后, 其峰值出现时间超前于太阳辐射最大值出现的时间。

(4) 影响树木液流变化的因子大致可分为 3 类: 生物学结构因素、土壤供水水平和气象因素。生物学结构决定液流的潜在能力<sup>[9]</sup>, 例如树木木质部的木质与液质比、木质部的导水率、气孔导度等; 土壤水分是植物蒸腾的水源, 和植物蒸腾耗水关系密切<sup>[10]</sup>, 决定液流的总体水平<sup>[11]</sup>, 即每日液流速率的波峰值大小等, 在土壤水分严重不足的情况下尤为如此; 气象因子决定树种液流的瞬时变动性。只有清楚环境因子对树干液流的影响机制, 才能利用环境因子对树木的耗水量进行预测。

不同月份树干液流量日变化与相应的气象因子相关分析结果表明: 除 10 号样地 6 月, 液流量与太阳辐射无显著相关关系外, 油松树干液流量与太阳辐射呈极显著的正相关关系, 太阳辐射的昼夜变化节律与液流量的基本一致。油松树干液流量与 20 cm 土壤温度呈极显著的负相关关系, 与气温基本呈正相关关系。4 号样地 6 月, 9 月液流量与相对湿度均无显著相关性, 说明相对湿度不是影响其液流变化的主要因子。进一步研究油松树干液流变化与相

应的气象因子的关系进行逐步回归, 结果表明: 对于 4 号样地 6 月太阳辐射为主导因子, 9 月 20 cm 土壤温度为主导因子; 对于 10 号样地, 6 月 20 cm 土壤温度和相对湿度为主要影响因子, 而 9 月太阳辐射为主要影响因子。可见在不同时期即使同样地, 影响液流的主要因子也不全相同, 说明了树干液流与气象因子关系的复杂性。

参考文献:

- [1] Grannier A. A new method of sap flow measurement in tree stems [J]. Ann. Sci. For., 1985, 42(2): 193-200.
- [2] 孙惠珍, 周晓峰, 赵惠勋. 白桦树干液流的动态研究 [J]. 生态学报, 2002, 22(9): 1387-1391.
- [3] 马长明, 管伟, 叶兵, 等. 利用热扩散式边材液流探针 (TDP) 对山杨树干液流的研究 [J]. 河北农业大学学报, 2005, 28(1): 39-43.
- [4] 林平, 李吉跃, 马达. 北京山区油松林蒸腾耗水特性研究 [J]. 北京林业大学学报, 2006, 28(S1): 47-50.
- [5] 蒋高明. 植物生理生态学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2004: 84-111.
- [6] 周以良, 董世林, 聂绍荃, 等. 黑龙江树木志 [M]. 哈尔滨: 黑龙江科学技术出版社, 1986: 429-432.
- [7] 马长明, 袁玉欣, 翟明普. 基于物候期的核桃树干液流特征 [J]. 东北林业大学学报, 2008, 36(1): 4-9.
- [8] Philips N, R Oren, R Zimmermann. Radial patterns of xylem sap flow in none diffuse and ring porous tree species [J]. Plant Cell Environ, 1996, 19: 983-990.
- [9] 孙慧珍, 周晓峰, 康绍忠, 等. 应用热技术研究树干液流进展 [J]. 应用生态报, 2004, 15(6): 1074-1078.
- [10] 张友焱, 周泽福, 党宏忠, 等. 利用 TDP 茎流计研究沙地樟子松的树干液流 [J]. 水土保持研究, 2006, 13(4): 78-80.
- [11] 奚如春, 马履一, 王瑞辉, 等. 林木耗水调控机理研究进展 [J]. 生态学杂志, 2006, 25(6): 692-697.
- [12] (上接第 96 页)
- [20] Gale M R, Grigal D E. Vertical root distribution of northern tree species in relation to successional status [J]. Can J For For, 1987, 17: 829-834.
- [21] 孙长忠, 黄宝龙, 陈海滨, 等. 黄土高原人工植被与水分环境相互作用关系研究 [J]. 北京林业大学学报, 1998, 20(3): 7-14.
- [22] 单长卷, 梁宗锁, 郝文芳. 黄土高原刺槐林生长与土壤水分关系研究进展 [J]. 西北植物学报, 2003, 23(8): 1341-1346.
- [23] 余新晓, 张建军, 朱金兆. 黄土地区防护林生态系统土壤水分条件的分析与评价 [J]. 林业科学, 1996, 32(4): 289-297.
- [24] Joslin J D, Wolfe M H, Hanson P J. Effects of altered water regimes on forest root systems [J]. New Phytol, 2000, 147: 117-129.
- [25] 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.
- [26] 李鹏, 赵忠, 李占斌. 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.
- [27] 赵忠, 李鹏. 渭北黄土高原主要造林树种根系分布特征及抗旱性研究 [J]. 水土保持学报, 2002, 16(1): 96-100.
- [1] 吴钦孝, 赵鸿雁, 刘向东, 等. 森林枯枝落叶层涵养水源保持水土的作用评价 [J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1998, 4(2): 23-28.