

沙地小叶杨和柠条细根分布与土壤水分消耗的关系

成向荣^{1,2}, 黄明斌^{1†}, 邵明安¹

(1. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 西北农林科技大学, 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 712100, 陕西杨凌; 2. 中国科学院研究生院, 100039, 北京)

摘要 以生长在陕北水蚀风蚀交错带沙地上的人工小叶杨 (*Populus simonii*) 和柠条 (*Caragana korshinskii*) 为研究对象, 采用剖面法调查 2 个树种的细根分布特征, 通过 2 年土壤水分定位观测研究, 初步分析沙地小叶杨和柠条细根分布与土壤水分消耗的关系。结果表明: 1) 沙地小叶杨和柠条随土层深度增加, 细根表面积密度逐渐减小, 0~100 cm 土层分别集中了整个剖面细根总量的 63% 和 95%; 2) 小叶杨和柠条林地剖面土壤水分与细根垂直分布密切相关, 小叶杨和柠条林地土壤水分特征类似, 可分为 3 个层次: 0~50 cm 土层为速变层, 50~200 cm 土层为缓变层, 200 cm 以下土层为缓慢衰减层; 3) 2 年观测期内, 小叶杨和柠条林地总蒸散量接近, 与同期降水量基本持平, 而裸沙地土壤储水量增加; 4) 小叶杨和柠条细根趋于浅表化的分布特征是对沙地浅层土壤经常获得雨水补给适应的结果。研究结果可为水蚀风蚀交错带沙区防护林建设提供理论依据。

关键词 小叶杨; 柠条; 细根分布; 土壤水分; 水蚀风蚀交错带

Relationship between fine roots distribution and soil water consumption of *Populus simonii* and *Caragana korshinskii* plantation on sandy land

Cheng Xiangrong^{1,2}, Huang Mingbin¹, Shao Ming'an¹

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Resources, Northwest A&F University, the State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, 712100, Yangling, Shaanxi; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 100049, Beijing, China)

Abstract The relationship between fine roots distribution of *Populus simonii* and *Caragana korshinskii* and soil water in the wind-water erosion crisscross region of the Loess Plateau were studied based on 2-year field positioning observation. The following conclusions can be drawn from this paper: 1) The fine root area density (FRAD) of *Populus simonii* and *Caragana korshinskii* declined with the increasing of soil depth, the proportion of fine roots in 0 - 100 cm soil layer was 63 % and 95 % of the whole profile, respectively. 2) There are closing relationship between soil water in profile and fine roots distribution, the soil water characteristics in profile was similar between *Populus simonii* and *Caragana korshinskii* stands. According to the soil water variation, the soil profile can be divided into 3 layers: 0 - 50 cm was fast change layer, 50 - 200 cm was slow change layer and gradually attenuation layer below 200 cm. 3) Total ET in *Populus simonii* stand was close to *Caragana korshinskii* stand during 2-year, and which almost equaled to rainfall during the same period. 4) Most of fine roots of *Populus simonii* and *Caragana korshinskii* concentrated in shallow layer of soil, because the upper soil was frequently recharged by rainfall in this region. These results will provide an important

收稿日期: 2007-12-03 修回日期: 2008-06-18

项目名称: 国家自然科学基金“黄土性土壤低水势段水分运动与有效性研究”(40671083); 西北农林科技大学创新团队项目“土壤-植被-大气传输系统中物质交换过程与模拟”(01140201)

第一作者简介: 成向荣(1979—), 男, 博士研究生。主要研究方向: 生态水文。E-mail: chxr@nwsuaf.edu.cn

† 责任作者简介: 黄明斌(1968—), 男, 研究员, 博士生导师。主要研究方向: 生态水文与土壤物理。E-mail: hmdb@nwsuaf.edu.cn

theoretical basis to protection forest construction in the wind-water erosion crisscross region.

Key words *Populus simonii*; *Caragana korshinkii*; fine roots distribution; soil water; wind-water erosion crisscross region

水蚀风蚀交错带是黄土高原水土流失最严重和生态环境最脆弱的地区,地形复杂多变,气候干旱,植被退化、沙化严重^[1],而毛乌素沙地向陕北黄土丘陵沟壑区过渡地带,更是黄土高原的强烈侵蚀中心。进行植被恢复与重建是减少土壤侵蚀,防止土地沙漠化,改善该区域生态环境的最有效措施。小叶杨(*Populus simonii*)和柠条(*Caragana korshinkii*)因抗旱、耐瘠薄、适应性强,作为植树造林的先锋树种,在这一地区大面积种植,其对保持水土和抑制土地沙漠化起到了积极作用;然而,水蚀风蚀交错带降水较少,蒸发强烈,水分已成为这一区域影响人工植被生长和生态效益持续发挥的主要限制因子^[2]。

目前,已有许多学者开展了黄土高原小叶杨和柠条生长特性和水分生态等方面的研究^[3-7],但对沙地向黄土区过渡地带人工小叶杨和柠条林细根分布与土壤水分动态相互关系的研究较少。细根(2 mm)是林木吸收水分和养分的主要通道,其空间分布特征反映了林木对土壤水资源的利用状况,直接影响到林木地上部分生长和生态效益的发挥。尽管在深层土壤中仅有很少比例的细根存在,但它们对林木水分吸收却发挥着非常重要的作用^[8-9]。笔者选择位于毛乌素沙地向陕北黄土丘陵沟壑区过渡的

水蚀风蚀交错带上的神木六道沟流域,拟通过调查沙地小叶杨和柠条的细根分布特征和土壤水分动态,初步探讨细根分布与土壤水分之间的相互关系,为水蚀风蚀交错带沙区防护林建设提供理论依据。

1 研究区概况

研究区位于陕西省神木县以西 14 km 处的六道沟流域(E 110°21' ~ 110°23', N 38°46' ~ 38°51'),海拔 1 094.0 ~ 1 273.9 m。流域北依长城,地处毛乌素沙漠的边缘,属于黄土高原水蚀风蚀交错带的强烈侵蚀中心,流域面积 6.89 km²。年平均气温 8.4℃,属中温带半干旱气候。地形较为破碎,沟壑面积占流域面积的 40% ~ 50%,年侵蚀模数达 10 000 t/km²。该区年平均降雨量 437.4 mm,年内、年际变率大,50%以上集中在 7—8 月。2006 年 5—10 月降雨量为 338.8 mm,2007 年 4—9 月降雨量为 329.2 mm,均比同期多年平均值低 10% 左右,降雨的季节变率较大(图 1)。研究区多年平均水面蒸发量 2 000 mm 左右,其中,5 月初到 6 月中旬蒸发量较大,而同期降雨量较少,易引起土壤水分消耗;7—10 月蒸发量逐渐减小,降雨相对增加,土壤水分补给也相应增大。

小叶杨和柠条是六道沟流域人工林主要组成树

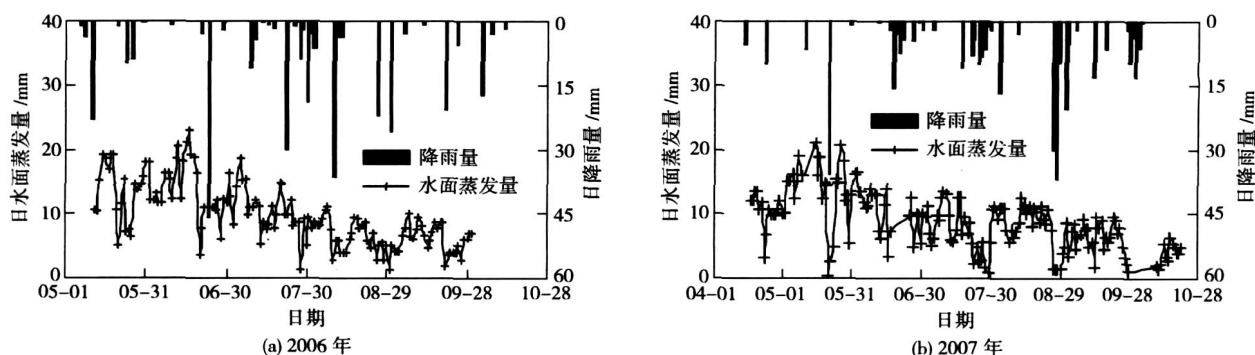


图 1 2006 和 2007 年生长季日降雨量和日水面蒸发量

Fig. 1 Daily rainfall and water surface evaporation during growing seasons in 2006 and 2007

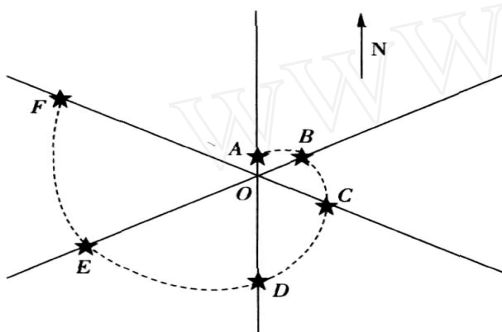
种,大部分营造于 20 世纪 80 年代。流域内沙地基本为固定沙地,面积约占整个流域的 30%,主要有小叶杨、柠条和沙蒿(*Artemisia ordosica*)分布。小叶杨大多以斑块分布或散生木为主,密度 108 株/hm²,平均树高 6.1 m,平均胸径 7.8 cm,平均冠幅 2.2 m × 2.4 m,约 1/3 枯枝枯梢现象严重。柠条和沙蒿,密

度分别为 1 550 丛/hm² 和 2 075 丛/hm²,柠条株高 90 ~ 130 cm,沙蒿高 30 ~ 60 cm,地表草本植被稀少。由于多年风蚀和堆积,整个土壤剖面形成不同的质地层次:上部多以细沙为主,沙粒含量超过 95%,黏粒不及 0.5%;下部黏粒含量逐渐增加至 3% 左右,沙粒含量在 85% 以下。

2 研究方法

2.1 细根分布测定方法

2006 年 9 月在六道沟小流域沙地小叶杨和柠条林地内各选择 2 株代表性的散生样木(丛)。借鉴 H. Tomlinson 等^[10]调查散生木所用的对数螺旋壕沟法,采用类似的方法调查小叶杨细根空间分布,即以样木为中心,将林冠下的地表在平面上均匀分为 6 部分(图 2),从正北向开始,延顺时针方向按 0、1/3、2/3、4/3、5/3 依次取 OA(0.2 m,距树干的距离)、OB(1.0 m)、OC(2.0 m)、OD(3.0 m)、OE(4.0 m)和 OF(5.0 m)为取样点。在每个取样点外侧挖宽 0.7 m,长 2.5 m,深 3.0 m 的剖面。从地表分土层(10 cm),取 40 cm × 40 cm 的土样,捡出所有的根系,编号后装入纸袋。



O 为样木, A、B、C、D、E、F 分别为取样点, 箭头所指方向为正北。

图 2 小叶杨根系取样简图

Fig. 3 Diagram of roots sampling of *Populus simonii*

由于柠条灌丛密度相对较大,研究区没有合适的样丛用以调查其根系水平分布,因此,仅在距离柠条样丛 20 cm 处取样调查根系垂直分布特征。

将野外带回的根样在有机玻璃水槽中清洗干净后,用镊子尽可能拣出所有的根系,采用加拿大 REGENT 公司生产的根系形态学和结构分析系统(WINRhizo),按直径 2 mm 和 > 2 mm 的标准分为 2 个径级,测定各径级的根系表面积^[11]。细根表面积密度(fine root area density, FRAD)表示为每 dm³ 土壤中细根总表面积的大小(cm²/dm³)。

2.2 土壤水分测定方法

在小叶杨生长相对集中的地块和邻近的柠条林地各埋设 5.3 m 深的中子管 2 根,管子间距离约 4 m;距离 2 块林地约 100 m 的裸露沙地上建有 4 m × 10 m 径流小区,布设 5.3 m 深的中子管 3 根。采用 CNC-503B(DR)中子仪,在 2006 和 2007 年生长季每

月 2 次测定土壤含水量,0~1 m 土层每 10 cm 读取 1 组数据,1 m 以下土层每 20 cm 读 1 组数据。林地水分监测点与调查根系样木距离均在 60 m 以内。3 个监测点地势相对平坦,坡度均小于 10°,小叶杨水分监测点周围没有柠条和沙蒿分布,柠条测管附近有少量的沙蒿生长。

土壤密度用环刀法测定,林地 0~200 cm 土壤密度平均为 1.65 g/cm³,200 cm 以下在 1.55 g/cm³ 左右;裸沙地 360 cm 以下土壤密度约 1.55 g/cm³。

降雨量用标准雨量筒测定,水面蒸发用 20 cm 口径蒸发皿每日 19:00 称量,然后换算为蒸发量。

沙地没有径流产生,地下水埋藏较深,降水入渗不超过 300 cm,可以不考虑水分的深层渗漏,采用如下水量平衡方程计算蒸散量(E_T):

$$E_T = P - W$$

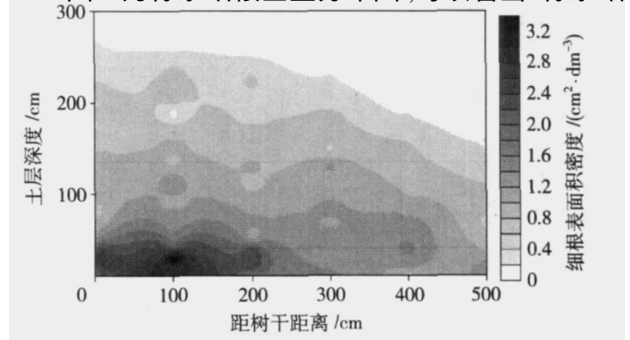
式中:P 为降水量,mm; W 为前后 2 次测定的土壤储水量差值,mm。

3 结果与讨论

3.1 细根分布特征

图 3 为小叶杨细根空间分布图,可以看出:小叶杨浅层土壤中细根表面积密度相对较大,随土层深度增加,细根分布密度逐渐减小;随距树干距离的增大,细根分布密度逐渐降低,分布深度变浅;0~100 cm 土层中细根分布达整个剖面的 63%,200 cm 以下细根量不及总量的 10%,最大分布深度 270 cm;小叶杨细根水平方向扩展距离已超过 500 cm,距树干距离越大,深层细根分布越少,越趋向于浅层分布。由此可知,沙地小叶杨水平根系比较发达,根幅范围较广,有利于其在干旱条件下吸收较多的水分。已有的研究也证实,沙地小叶杨拥有发达的侧根^[12]。

图 4 为柠条细根垂直分布图,可以看出:柠条细



为作图方便,从树基部(0 m)开始。

图 3 小叶杨细根空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of fine roots of *Populus simonii*

根大部分集中在 0~80 cm 土层中,约为整个剖面细根总量的 95%;80 cm 以下土层,细根表面积密度较小,最大分布深度 180 cm。在干旱沙漠地区的研究表明,柠条细根最大分布深度 300 cm 左右,主要集中在表层 0~60 cm 土层^[13]。牛西午等^[14]也认为沙地柠条根系水平根幅较大,超过 8 m,垂直向下伸展较浅。

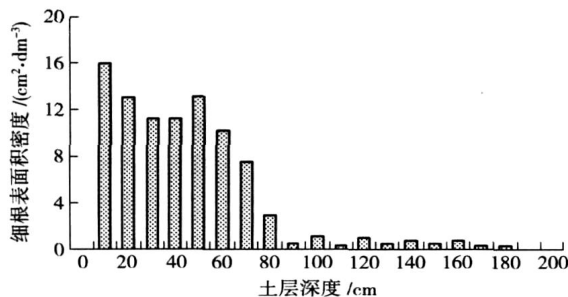


图 4 柠条细根垂直分布

Fig. 4 Vertical distribution of fine roots of *Caragana korshinskii*

柠条细根垂直分布特征与小叶杨类似,但浅层土壤细根分布密度明显大于小叶杨,这可能是植物种间差异造成的。这 2 个树种根系空间分布特征与沙地樟子松和油松一致^[15]。受干旱区降雨补给的影响和干旱的驱使,使得沙生植物根系趋向浅表化^[13]。

3.2 细根分布对剖面土壤水分的影响

研究区地下水埋藏较深,也没有地表径流产生,土壤水分主要消耗于土壤蒸发和植物蒸腾。由于沙地结构松散,地表的干沙层对物理蒸发有一定的抑制作用,沙地土壤水分主要受植物蒸腾影响^[16]。林木细根的空间分布差异,往往导致土壤水分空间分布的异质性。

2 个生长季小叶杨、柠条林地和裸沙地剖面土壤水分的监测结果见图 5。可以看出:0~180 cm 土层,裸沙地平均土壤含水量在 0.045 cm³/cm³ 左右,小叶杨和柠条林地土壤水分总体呈逐渐减小趋势,100~180 cm 土层土壤含水量在 0.020 cm³/cm³ 左右,接近凋萎含水量;200~380 cm 土层,林地土壤水分含量高于裸沙地,这主要是由于土壤质地差异造成的;380 cm 以下土层,裸沙地土壤含水量明显高于小叶杨和柠条林地。林木细根的垂直分布特征与剖面土壤水分的分布密切相关。由上述分析可知,小叶杨和柠条的细根主要集中在 0~180 cm 土层,相应地该层土壤水分也被大量消耗,土壤含水量明显低于裸沙地,而且,该层土壤中,小叶杨和柠条的细

根分布密度随土层深度增加锐减,土壤含水量也由表层的 0.043 cm³/cm³ 减少到 180 cm 深度的 0.020 cm³/cm³ 左右。尽管浅层土壤可经常获得降水补给,但由于浅层细根分布密度大,耗水量增加,根系层截留降雨的能力加强,深层土壤得不到有效补给,土壤含水量较低,表明细根主要分布区域,下层土壤含水量受细根分布影响较大。

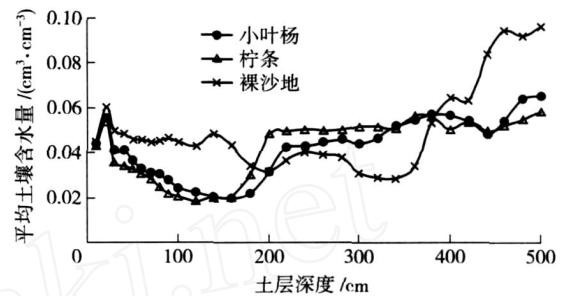


图 5 小叶杨、柠条林地和裸沙地平均土壤含水量比较

Fig. 5 Comparison of mean soil moisture content between *Populus simonii*, *Caragana korshinskii* stands and bare sandy land

小叶杨和柠条细根垂直分布存在一定差异,也导致对剖面土壤水分消耗的不同。柠条细根大部分集中在 100 cm 土层以内,180 cm 以下几乎没有细根分布;小叶杨细根分布相对较深,达 270 cm。剖面土壤水分分布(图 5)也表明,柠条对 0~160 cm 土层水分消耗多于小叶杨,而小叶杨对 160~320 cm 土层水分消耗高于柠条。

3.3 土壤储水量季节变化特征

根据土壤水分季节变化特征和剖面土壤质地的差异,将整个土壤剖面划分为 0~50 cm,50~200 cm 和 200~500 cm 3 个土层,分析小叶杨、柠条林地和裸沙地不同土层土壤储水量季节变化特征。图 6 为 2006 和 2007 年小叶杨、柠条林地和裸沙地不同土层深度土壤储水量的季节变化图。

从图 6(a)可以看出,2006 年 3 个样地中,0~50 cm 土层土壤储水量季节性变化较大,对降水有明显的响应:7 月中旬,该层土壤储水量达最低点,小叶杨、柠条林地土壤水分不足 10 mm,7 月中旬至 8 月底,降水比较集中,土壤储水量均有明显恢复,9 月土壤储水量又开始下降。由于 0~50 cm 土层小叶杨细根量约占整个剖面细根总量的 40%,柠条这一比例高达 70%,因此,林地水分消耗比裸沙地多,柠条略高于小叶杨。50~200 cm 土层小叶杨林地土壤储水量略高于柠条林地,2 块林地土壤水分季节性变化较小,平均有效储水量约 10 mm,仅为裸沙地的

25%。该层土壤中,小叶杨和柠条也有较多细根分布,尤其是小叶杨细根量约占细根总量的 50%,使得该层土壤水分也被大量消耗,由于得不到有效补给,土壤水分亏缺严重,可供林木利用的水分较少。200~500 cm 土层,柠条林地土壤储水量略高于小叶杨林地,生长末期小叶杨和柠条林地土壤储水量分别减少了 14 和 9 mm,而裸沙地土壤储水量增加了 8 mm,表明上层土壤水分不能满足小叶杨和柠条水分需求,深层土壤储水逐步被消耗,尽管深层土壤中细根分布较少,但对于林木生长仍然很重要。200 cm 土层以下,柠条几乎没有细根分布,但在水势梯度的作用下,水分可由下层含水量高的土层向上层低水分层移动,供植物吸收利用。200~500 cm 土层,裸沙地平均土壤储水量与小叶杨和柠条林地相差不大,主要是由于不同土壤质地造成的。

2007 年降雨较多集中在 5—8 月的中下旬(图 1),从图 6(b)可以看出,小叶杨、柠条林地和裸沙地 0~50 cm 土层土壤水分呈现消耗—补给—消耗的波动变化。观测初期到 8 月中旬,3 个样地土壤储水量整体呈减小趋势,8 月下旬持续的降雨,土壤储水量均显著增加,进入 9 月,土壤储水量逐渐减小,林地水分消耗多于裸沙地,柠条林地略高于小叶杨林地。50~200 cm 土层,3 个样地从观测初期到 8 月中旬,土壤水分也呈减小趋势,8 月中旬,土壤储水量最低,观测期末,小叶杨林地比柠条林地储水量低 6 mm。主要是因为生长前期降雨较少,8 月中旬小叶杨和柠条叶子大量凋落,尤其是柠条 90%以上叶子枯落,导致 9 月份土壤水分消耗减少。200~500 cm 土层,3 个样地土壤储水量变化特征与 2006 年类似,林地土壤储水量有进一步减少的趋势。

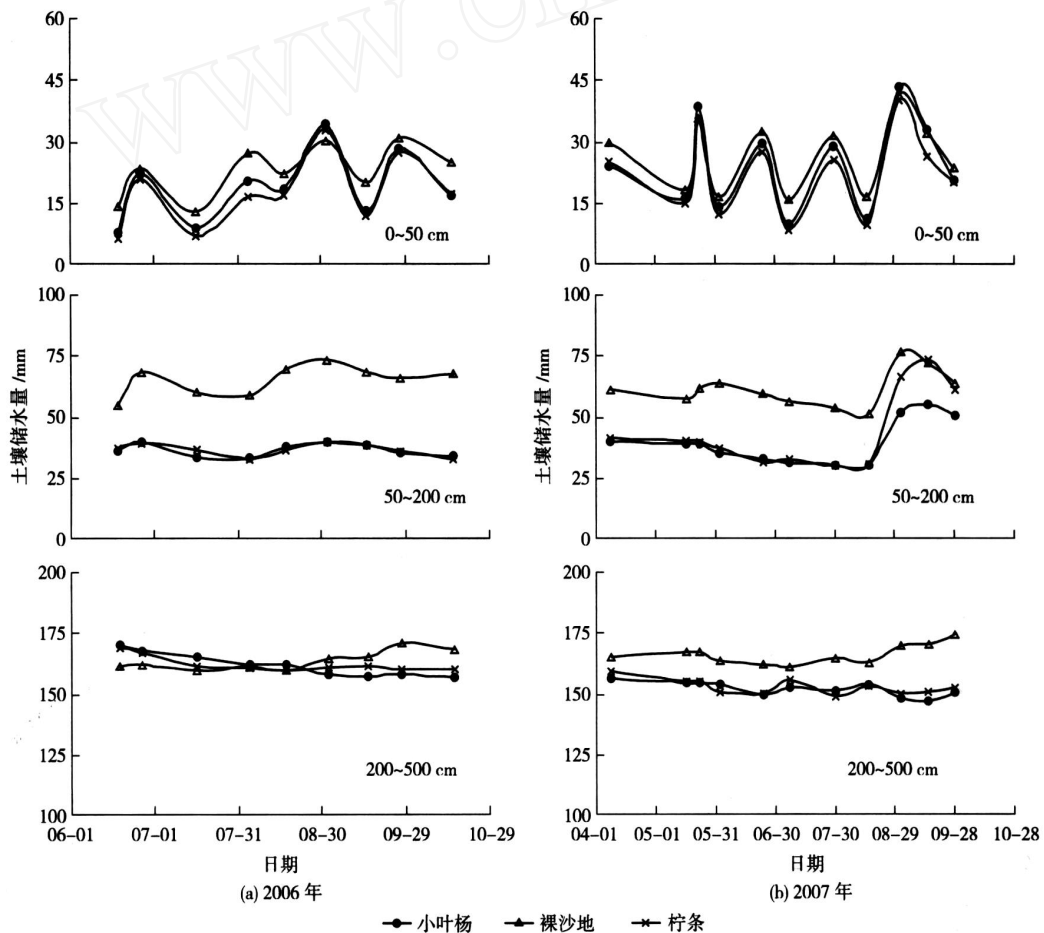


图 6 2006 和 2007 年小叶杨、柠条林地和裸沙地不同土层深度土壤储水量的季节变化

Fig. 6 Seasonal dynamics of soil water storage of *Populus simonii*, *Caragana korshinskii* stands and bare sandy land in 0~50 cm, 50~200 cm and 200~500 cm soil layers in 2006 and 2007

通过 2 个生长季土壤水分动态分析可知,小叶杨和柠条林地土壤水分季节变化特征基本一致,二

者的耗水量也接近。根据剖面土壤水分的季节变化特征,将土壤水分变化分为 3 个层次:0~50 cm 土层

为土壤水分速变层,50~200 cm 土层为土壤水分缓变层,200 cm 以下土层为土壤水分缓慢衰减层。对沙地小叶杨和柠条细根分布与剖面土壤水分关系的分析也表明:一方面,根系分布特征对所处生存环境有明显响应,降水经常补给浅层土壤,细根也较多分布在浅层土壤中;另一方面,尽管深层土壤中细根分布较少,由于得不到水分的有效补给,土壤水分长期消耗导致亏缺严重,进而影响人工植被生态效益的持续发挥。因此,在今后的防护林建设中,有必要根据小叶杨和柠条细根的空间分布特征及其耗水规律确定适宜栽植密度,构建可持续发展的人工生态系统。

3.4 水量平衡分析

小叶杨和柠条根系均趋向于水平扩展,但柠条细根更加集中分布在浅层土壤中,而小叶杨细根分布相对较深,2 种林木根系分布特征不同,有必要进一步分析其水量平衡特征有无差异。2006 和 2007 年小叶杨、柠条林地和裸沙地 0~500 cm 土层土壤

水量平衡特征如表 1 所示。可以看出:2006 年观测期,小叶杨和柠条林地总蒸散量分别比同期降雨量高 6.3 和 2.2 mm,而裸沙地蒸散量低于降雨量;小叶杨和柠条林地仅 7 月中旬到 8 月中旬土壤储水增加,其他时段有不同程度的减少,裸沙地各时段土壤储水均增加;3 个样地蒸散主要发生在 6 月中旬至 9 月中旬,平均日蒸散量最高超过 3.2 mm/d。2007 年小叶杨林地总蒸散量接近同期降雨量,土壤储水量增加 1.9 mm,柠条林地和裸沙地土壤储水量分别增加了 7.9 和 11.2 mm,其中,由于 8 月降雨较为集中,各样地土壤储水量明显恢复,蒸散量也最高。2 年观测期内,小叶杨和柠条林地的平均蒸散量与降雨量之比分别为 100.7% 和 99.1%,裸沙地为 92.8%。小叶杨和柠条林地总耗水量基本一致,当季的降雨量完全用于蒸散消耗,没有多余的水分补给土壤。在半干旱黄土丘陵沟壑区和沙漠地区,多年柠条水量平衡研究也表明,柠条耗水量大,蒸散量接近同期降水量^[17-18]。

表 1 2006 和 2007 年小叶杨、柠条林地和裸沙地土壤水量平衡特征

Tab. 1 Soil water balance of *Populus simonii*, *Caragana korshinskii* stands and bare sandy land in 2006 and 2007

时 段	降雨量 mm	小叶杨			柠 条			裸沙地		
		土壤储水 变化量/mm	蒸散量 mm	平均蒸散量 mm d ⁻¹	土壤储水 变化量/mm	蒸散量 mm	平均蒸散量 mm d ⁻¹	土壤储水 变化量/mm	蒸散量 mm	平均蒸散量 mm d ⁻¹
2006-06-18—07-16	67.2	- 6.7	73.9	2.6	- 7.6	74.8	2.7	2.5	64.7	2.3
2006-07-17—08-17	122.2	11.5	110.7	3.5	8.3	113.9	3.6	19.2	103.0	3.2
2006-08-18—09-15	51.7	- 10.5	62.2	2.2	- 1.1	52.8	1.9	2.0	49.7	1.8
2006-09-16—10-16	48.5	- 0.6	49.1	1.5	- 1.8	50.3	1.6	7.6	40.9	1.3
总计	289.6	- 6.3	295.9		- 2.2	291.8		31.3	258.3	
2007-04-08—05-16	22.8	- 10.5	33.3	0.9	- 15.1	37.9	1.0	- 13.4	36.2	1.0
2007-05-17—06-24	72.1	2.5	69.6	1.8	- 1.5	73.6	1.9	11.5	60.6	1.2
2007-06-25—07-30	61.4	- 1.9	63.3	1.8	2.3	66.0	1.6	- 5.0	66.4	1.8
2007-07-31—09-01	122.2	33.2	89.0	2.7	44.9	70.4	2.4	36.0	86.2	2.6
2007-09-02—09-28	33.2	- 21.4	54.6	2.0	- 22.7	55.9	2.1	- 17.9	51.1	1.9
总计	311.7	1.9	309.8		7.9	303.8		11.2	300.5	

4 结论

1) 沙地小叶杨和柠条细根表面积密度随土层深度增加逐渐减小,0~100 cm 土层中,小叶杨细根量占整个剖面细根总量的 60% 以上,而柠条超过 95%,2 个树种细根分布趋向于水平伸展。

2) 小叶杨和柠条林地土壤水分季节变化对降水有明显响应,2 个林地剖面土壤水分特征类似,可

分为 3 个层次:0~50 cm 土层为土壤水分速变层,50~200 cm 土层为土壤水分缓变层,200 cm 以下土层为土壤水分缓慢衰减层。

3) 土壤水量平衡分析表明,2 年观测期内,小叶杨和柠条林地总蒸散量接近,与同期降水量基本持平,而裸沙地土壤储水量增加。

4) 细根分布与剖面土壤水分密切相关。小叶杨和柠条细根分布趋于浅表化的分布特征是对沙地

浅层土壤经常获得雨水补给适应的结果。尽管深层土壤(>100 cm)根系分布较少,但由于林木强烈的蒸腾作用,上层土壤水分不能满足植物需水,深层土壤水分也被大量消耗。

5 参考文献

- [1] 唐克丽,候庆春,王斌科,等.黄土高原水蚀风蚀交错带和神木试区的环境背景和整治方向.中国科学院水利部西北水土保持研究所集刊,1993(18):2-15
- [2] 徐炳成,山仑,陈云明.黄土高原半干旱区植被建设的土壤水分效应及其影响因素.中国水土保持科学,2003,1(4):32-35
- [3] 唐德瑞,张燕.陕西黄土高原沟壑区小叶杨生长规律初步研究.西北林学院学报,2000,15(1):15-19
- [4] 王孟本,李洪建,柴宝峰.晋西北小叶杨林水分生态的研究.生态学报,1996,16(3):232-237
- [5] 程积民,万惠娥,王静.黄土丘陵区小叶杨林地土壤水分过耗动态.水土保持学报,2003,17(3):70-73
- [6] 程积民,万惠娥,王静,等.半干旱区柠条生长与土壤水分消耗过程研究.林业科学,2005,41(2):37-41
- [7] 郭忠升,邵明安.人工柠条林地土壤水分补给和消耗动态变化规律.水土保持学报,2007,21(2):119-123
- [8] Jackson R B, Mooney H A, Schulze E D. A global budget for fine root biomass, surface area and nutrient contents. Proceedings of the National Academy of Sciences, USA, 1997, 94: 7362-7366
- [9] Laclau J P, Arnaud M, Bouillet J P, et al. Spatial distribution of *Eucalyptus* roots in a deep sandy soil in Congo: relationships with the ability of the stand to take up water and nutrients. Tree Physiology, 2001(21):129-136
- [10] Tomlinson H, Traore A, Teklehaimanot Z. An investigation of the root distribution of *Parkia biglobosa* in Burkina Faso, West Africa, using a logarithmic spiral trench. Forest Ecology and Management, 1998, 107:173-182
- [11] 赵忠,成向荣,薛文鹏,等.黄土高原不同水分生态区刺槐细根垂直分布的差异.林业科学,2006,42(11):1-7
- [12] 吕文,杨自湘,王燕,等.中国北方小叶杨资源与发展.防护林科技,2001(4):33-36
- [13] 张志山,樊恒文,赵金龙,等.沙漠人工植物群落的根系分布及动态.中国沙漠,2006,26(4):637-643
- [14] 牛西午,丁玉川,张强,等.柠条根系发育特征及有关生理特性研究.西北植物学报,2003,23(5):860-865
- [15] 徐文铎,邹春静.中国沙地森林生态系统.北京:中国林业出版社,1998:55-56
- [16] 阿拉木萨,蒋德明,裴铁.沙地人工小叶锦鸡儿植被根系分布与土壤水分关系研究.水土保持学报,2003,17(3):78-81
- [17] 王彦辉,熊伟,于澎涛,等.干旱缺水地区森林植被蒸散耗水研究.中国水土保持科学,2006,4(4):19-25
- [18] Wang X P, Berndtsson R, Li X R, et al. Water balance change for a re-vegetated xerophyte shrub area. Hydrological Science Journal, 2004, 49(2):283-295

(责任编辑:宋如华)

更正

本刊2008年第6卷第1期《东北黑土区农地水土流失现状与综合治理对策》一文中,表5“土壤流失量”一栏给出的数据,其单位应为“t/km²”,而非“t/hm²”,故3.3节中涉及“土壤流失量”的单位均为“t/km²”。特此更正,并向读者致歉。