

六盘山北侧华北落叶松林分的水分利用效率研究

何聪¹, 熊伟², 王彦辉², 程积民³, 招礼军¹, 于澎涛², 徐丽宏², 童鸿强^{2,4}, 王云霓²

(1. 广西大学 林学院, 南宁 530005; 2. 中国林业科学研究院 森林生态环境与保护研究所, 北京 100091;
3. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 4. 北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083)

摘要:为定量研究华北落叶松人工林水分利用特征,2010年5—10月在宁夏六盘山北侧叠叠沟林场的华北落叶松人工林固定样地内,通过测定树干径向生长、林分叶面积指数变化、草本生物量变化、树干液流速率变化、植物降雨截持等,估计了华北落叶松人工林及各层的生产力、水分消耗和水分利用效率。研究表明:林分总生产力 11.76 t/hm²,其中乔木层占 75.2%,草本层占 24.8%;在整个生长期内,林分生产力各月的分量呈现先升高后降低的季节变化格局。林分总蒸散量为 433.9 mm,其中乔木层与草本层(包括土壤蒸发)耗水各约占一半,分别为总蒸散的 50.5%和 49.5%;林分蒸散在生长季中呈现先升高后降低的季节变化格局。在整个生长季,华北落叶松人工林的水分利用效率为 2.71 g/kg,其中乔木层的水分利用效率为 4.04 g/kg,草本层水分利用效率为 1.36 g/kg;其季节变化与乔木层的水分利用效率变化相类似,说明乔木层对于华北落叶松林分水分利用效率的影响较大。

关键词:华北落叶松;人工林;水分利用效率;生产力;蒸散

中图分类号:S715

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2011)05-0112-07

The Water Use Efficiency of *Larix principis-rupprechtii* Plantation in the Northern Liupan Mountain

HE Cong¹, XIONG Wei², WANG Yan-hui², CHENG Ji-min³, ZHAO Li-jun¹,
YU Peng-tao², XU Li-hong², TONG Hong-qiang^{2,4}, WANG Yun-ni²

(1. College of Forestry, Guangxi University, Nanning 530005, China; 2. Research Institute
of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China;

3. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling,
Shaanxi 712100, China; 4. College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to quantitatively study the characteristics of water use of *Larix principis-rupprechtii* plantation, from May to October in 2010, tree radial growth, leaf area index, the increment in herb biomass, sap flow, interception of trees and so on were simultaneously measured and to be used to estimate the productivity, water consumption and water use efficiency (WUE) of *L. principis-rupprechtii* plantation, which was located in the Diediegou catchment in the northern Liupan Mountains, Ningxia Hui Autonomous Region. The results showed that the total productivity of the plantation was 11.76 t/hm². The productivity of canopy layer accounted for 75.2% of the total, while the productivity of herb layer accounted for 24.8%. In the growing season, the total productivity increased in the early- and mid- season and then decreased in the late season. Total evapotranspiration of the plantation was 433.9 mm, and the water consumption in tree canopy and herbaceous layer (including soil evaporation) accounts for 50.5% and 49.5% of the total evapotranspiration, respectively. And the evapotranspiration followed a temporal change pattern which was high in the early season and low in the late season. Throughout the growing season, WUE of *L. principis-rupprechtii* plantation was 2.71 g/kg, and WUE of tree layer was 4.04 g/kg, while WUE of herbaceous layer was 1.36 g/kg.

收稿日期:2011-03-09

修回日期:2011-03-22

资助项目:中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所基本科研业务费专项资金项目(CAFRIFEEP200905);林业公益性行业科研专项经费(200904056,201104005-02);国家“十二五”科技计划课题(2011BAD38B05);国家自然科学基金(40730631,30671677,40801017,41071023)

作者简介:何聪(1984—),男,广西桂林人,硕士研究生,研究方向为森林生态学。E-mail:hecong04@163.com

通信作者:熊伟(1970—),男,甘肃兰州人,副研究员,博士,研究方向为干旱区森林生态水文过程。E-mail:xwcaf@163.com

The seasonal change of WUE in the whole plantation was similar to that of tree layer, suggesting that the tree layer has a strong influence on the determining WUE in the plantation.

Key words: *Larix principis-rupprechtii*; plantation; water use efficiency; productivity; evapotranspiration

在我国干旱半干旱地区,水分是限制植物生长与发育的重要因子。由于存在着植被生态需水与水资源不足之间的矛盾,因此,如何有效地利用极为有限的水资源来合理构建和恢复森林植被,并最大程度地发挥其多种功能是改善当地生态环境条件的关键环节。林分水分利用效率(WUE)是反映森林群落内植被物质生产与水分消耗关系的一个重要指标,它是指林分中所有林木蒸腾消耗单位水量所生成的生物量^[1]。过去,群体水平 WUE 的测定中最常用的是田间直接测定法,但繁琐的工作和昂贵的花费限制了其应用和发展。近年来,森林 WUE 的研究方法有了很大的进步。如通过测定植物组织中¹³C 和¹²C 的比率来代替反映群体水平 WUE 的碳同位素法^[2-3];结合通量塔及近红外设备实时监测生态系统碳、水通量变化,从而来估算其不同时间段 WUE 的涡度相关法^[3-4];利用高分辨率卫星影像结合蒸散发、光能利用率模型等计算区域植被 WUE 的遥感观测法^[5-6]等。然而,由于各个方法都不同程度地存在着计算方法不一致、前提假设严格、无法区分蒸散分量等问题,目前还很难直接用于森林群落的结构与其功能关系方面的研究,也不能更深入地认识生态系统 WUE 的变异过程及机理^[3]。

树干液流测定法是国内外普遍接受的用来估计树木和林分蒸腾耗水的方法,而且该方法可以通过结合土壤蒸发、林冠截持等测定,从而实现在较小时间尺度上来估计整个林分的蒸散及其分量组成。树干径向变化测定仪(Dendrometer)是一种连续测定树干径向实时变化的仪器,它可以用来估计树木胸径的生长量^[7-10],通过尺度上推可以获得整个林分地上生物量的增加。目前,国外已经有将树干液流测定估计林分蒸腾与树干生长测定估计林分地上生产力相结合来估计整个林分 WUE 的研究。如 Hubbard 等人^[11]用该方法估计并比较了两种速生桉树林的 WUE;又如 Gyenge 等人^[12]用该方法估计并对比分

析了花旗松(*Pseudotsuga menziesii*)人工林和阿根廷巴塔哥尼亚地区的天然林的 WUE。然而,目前国内还没有将这两种方法结合起来研究林分 WUE 的报道。

本文主要运用径向生长测定仪、树干液流测定仪、蒸渗仪和其它传统森林水文学测定方法,通过测定华北落叶松林分的生长和耗水来估计其林分水平的 WUE 及其季节变化,从而来进一步深入认识华北落叶松人工林(*Larix principis-rupprechtii*)生态系统的水分利用策略,为干旱半干旱地区人工植被的合理经营与管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 自然概况

本研究试验区位于六盘山外围北段的叠叠沟小流域,它是土石山区与周边黄土区的交界地带,属宁夏回族自治区固原市原州区。地理坐标为东经 108°04'55"–108°09'15"、北纬 35°54'12"–35°58'33"。该地区属于典型的半干旱大陆性季风气候,年平均温度 6~7℃,无霜期 130 d 左右,年平均降水量(432±87.2) mm,主要集中分布在 6–9 月。叠叠沟小流域呈南北走向,东坡和西坡是主要坡向,坡度较缓多为 10°~30°;海拔 1 975~2 615 m,最大高差 640 m;流域内乔木林集中分布在水分条件相对较好的阴坡、半阴坡或沟底,占全流域面积比例为 6.07%。主要乔木林类型为华北落叶松和少量杨树(*Poplar hurst*)人工林。

1.2 试验样地设置

本研究选取在阴坡林龄 25 a 的华北落叶松林分,设置 1 个 20 m×30 m 的样地。2010 年 5 月初至 10 月底进行了样地调查,每木检尺记录胸径、树高、冠幅、经纬度、海拔、坡度、坡向等;该样地林下灌木层不明显。在各样地内均匀设置 3 个 1 m×1 m 的草本小样方,调查林下草本的优势种、平均高度、平均覆盖度等,样地调查情况见表 1。

表 1 华北落叶松人工林样地概况

植被类型	经纬度	海拔/ m	坡度/ (°)	坡向	乔木层				草本层	
					株数/ 棵	平均 胸径/cm	平均高/ m	郁闭度	平均高/ cm	盖度/ %
华北落叶松林	N35°58'11.4" E108°08'52.2"	2025	10	SW46°	83	10.3	9.8	0.6	26.5	50

1.3 研究方法

1.3.1 华北落叶松林分生产力的估算 由于本研究中华北落叶松人工纯林林内灌木很少,故忽略了灌木层的生产力,将该林分生产力的估算分为两个部分:乔木层生产力和草本层生产力的估算。其中,乔木层生产力主要包括树干生物量的增长量、树枝生物量的增长量和树叶生物量的增长量等三个分量,现将各个部分的估计方法叙述如下。

(1) 乔木层生产力的估计。① 树干生物量增长量的估算。华北落叶松树干生物量与胸径能够通过一元经验方程较良好地拟合^[13],因此可以根据胸径的增加量来估算林分树干生物量的增量。首先,依据样地调查乔木的径阶分布规律选取 7 棵华北落叶松作为标准木,分别在其胸高的位置安装带状树干径向变化记录仪(DC 型,德国, Ecomatik 公司, <http://www.ecomatik.de>)来实时测定生长季样树的胸径变化,仪器的取样步长为 5 min,数据用 Del2e 型数据采集器(英国剑桥)收集。日生长量计算公式见熊伟等^[8]。然后,用公式(1)华北落叶松生物量与胸径的一元经验方程^[13]计算出单株样木的生物量,样树生物量增量即代表该样树所在径阶树木的平均增长量,进而用公式(2)计算径阶内树木生物量的增长量,具体如下:

$$W_i = 0.06406D_i^{2.536666} \quad (1)$$

$$W_{bi} = (W_{i+1} - W_i)b_i \quad (2)$$

式中: i ——月份; W_i ——第 i 月样树的生物量(kg); D_i ——样树第 i 月的胸径(cm); b ——径阶; W_{bi} —— b 径阶树木在第 i 月树干生物量的增长量(t); b_i ——样地内在第 i 月时处在 b 径阶的树木的株数,一般情况下样地内没有树木死亡时 b_i 为定值。

所有径阶增长量之和为林分增长量,用公式(3)计算林分树干生物量增长量。

$$W_{zi} = \sum_1^b W_{bi} \quad (3)$$

式中: W_{zi} ——林分树干生物量增长量。

② 枝条生物量增长量的估算。有研究发现枝条生物量与胸径也有显著的相关性,所以可以依据华北落叶松枝条生物量与胸径的一元经验方程^[13]推算枝条的生物量累积量,公式如下:

$$G_i = 0.00906D_i^{2.46524} \quad (4)$$

式中: G_i ——第 i 月样树枝条的生物量(t); D_i ——样树 i 月的胸径(cm)。

样树枝条生物量增量即代表该样树所在径阶树木枝条的平均增长量,用公式(5)计算径阶内树木枝条的增长量,所有径阶枝条增长量之和为林分枝条的

增长量,用公式(6)计算林分枝条生物量增长量。

$$G_{bi} = (G_{i+1} - G_i)b_i \quad (5)$$

$$G_{zi} = \sum_{b=1}^b G_{bi} \quad (6)$$

式中: i ——月份; b ——径阶; b_i ——样地内 b 径阶在 i 月时的株数; G_{bi} —— b 径阶内样树枝条在 i 月生物量增量(t); G_{zi} ——林分在 i 月树木枝条生物量的增长量(t)。

③ 叶片生物量增长量的估计。本研究中,考虑到华北落叶松人工林在 8 月底后叶已经停止生长,其冠层叶片生物量的增长量为 0,故可以用公式(7)计算其增量:

$$M_{i增} = \begin{cases} M_{i干} - M_{i-1} & i < 8 \\ 0 & i \geq 8 \end{cases} \quad (7)$$

式中: $M_{i增}$ ——第 i 月整个冠层叶片的生物量增量(t/hm²); $M_{i干}$ ——第 i 月整个冠层叶片的叶干重(t/hm²); M_{i-1} ——第 i 月前一个月整个冠层叶片的叶干重(t/hm²)。其中, $M_{i干}$ 可以由公式(8)计算而得:

$$M_{i干} = KP_i A_i S(1 - Q_i) + b \quad (8)$$

式中: P_i ——单位叶面积与其质量的比值(t/hm²); A_i ——叶面积指数; S ——样地面积(hm²); Q_i ——叶片含水率(%); K, b ——修正常数,由于叶面积指数是使用光学探头由下向上扫描树叶投影计算得到的,在测定中树干和枝条的存在会形成干扰,因此需要用修订测定的林分叶面积指数与实测叶面积之间的误差。本研究中,分别利用 8 月份(冠层叶量最大月份)和 10 月份(冠层叶量为零)在样地中布设样方收集冠层凋落叶量所计算的冠层叶片生物量代入公式(8)中,通过联立方程组解得 $K = 1.3929, b = 0.6537$ 。故公式(8)可以简化为

$$M_{i干} = 1.3929P_i A_i S(1 - Q_i) + 0.6537 \quad (9)$$

叶面积指数(A_i)是每 15 d 使用 LAI-2000 冠层分析仪(LI-Cor 公司, USA)测得;叶片含水量(Q_i)是每 30 d 分东南西北四个方向取华北落叶松叶片,用四分法从中取出 30 g 叶片,烘干称重测定每月的叶片含水量;单位叶面积与质量的比值(P_i)是取约 20 g 叶片,精确称量后平摊于方格纸上用数码相机拍摄叶片,将图片导入 Photoshop 软件,勾选出照片中所有叶片的轮廓,计算轮廓内所包含的像素数量和方格纸 1 cm² 面积在该照片中的像素数量,将轮廓像素数量除以方格纸 1 cm² 的像素数量得到叶子的叶面积。 P_i 的计算公式为

$$P_i = \delta W_a / S_a \quad (10)$$

式中: W_a ——叶片重量(g); S_a ——叶面积(cm²); δ ——单位转换系数,这里 $\delta = 100$; P_i ——叶质量与单

位叶面积的比值(t/hm²)。

(2)草本层生产力的估算。每月在样地内随机选取 5 个 0.5 m×0.5 m 的草本小样方,刈割全部地上部分植物,烘干称重,取其平均值后除以样方面积得到每个月单位面积的生物量,然后根据公式(11)计算月生物量的增量:

$$C_i = U_i - U_{i-1} \quad (11)$$

式中:*i*——月份;*C_i*——第 *i* 月草本层生物量增量(t/hm²);*U_i*——第 *i* 个月单位面积上的生物量(t/hm²)

(3)整个华北落叶松林分生产力的估计。估算华北落叶松整个林分的生产力,公式为

$$Z_i = W_{zi} + G_{zi} + M_{i增} + C_i \quad (12)$$

式中:*Z_i*——华北落叶松林分第 *i* 月的生产力(t/hm²);*W_{zi}*——林分树干第 *i* 月的生物量增长量(t/hm²);*G_{zi}*——林分第 *i* 月树木枝条生物量的增长量(t/hm²);*M_{i增}*——第 *i* 月叶生物量增量(t/hm²);*C_i*——第 *i* 个月的草本层生物量增量(t/hm²)。

1.3.2 林分蒸散量的估算。

(1)乔木层的蒸腾量的估算。①树干液流测定与单株树干液流量的估计。按照不同径级选取 4 棵华北落叶松样树,分别在其胸高位置的北面树干方向安装 SF-L 型树干液流探头(Ecomatik 公司,德国)实时监测其树干液流速率,取样步长设定为 5 min,用 Excel 的数据透视表将数据汇总成每小时的平均液流密度。采用查表法寻找临近日气象条件(温度、湿度等)相似的值来代替由于仪器问题导致的缺失值。具体液流密度的计算公式见周杨等^[14-15],计算公式为

$$F_i = J_s A_s \quad (13)$$

式中:*F_i*——样树液流速率(ml/min);*A_s*——边材面积(cm²)。其中边材面积是根据周杨等^[15]提出的边材面积与胸径之间的关系计算,具体公式为

$$A_s = 8.87D - 39.546 \quad (14)$$

式中:*A_s*——边材面积(cm²);*D*——树木的胸径(cm)。

②林分蒸腾耗水量的计算。华北落叶松人工整个林分的蒸腾量见熊伟等^[16],公式为

$$E_i = J_{imean} A_{s-t} \quad (15)$$

式中:*i*——月份;*A_{s-t}*——单位面积上累积的边材面积(cm²);*J_{imean}*——整个林分所有测定样本 *i* 月的平均液流密度(ml/min);*E_i*——林分 *i* 月的蒸腾量(mm)。

(2)林冠截留的估算。在样地附近空地上设置一个标准雨量筒测定林外降水。在林内样地上随机布设 12 个雨量筒,通过测定林冠穿透降水量平均值来估计穿透降水量。按 4 cm 划分树木径阶,每个径阶

选 1~2 棵标准样树,用 PVC 管蛇形环绕树干收集生长季每次降雨后树干的茎流量。树干径流量和冠层截留量计算公式见时忠杰等^[17]。

(3)草本层蒸散量的估算。用自制的简易蒸渗仪,在固定样地中设置 3 个,同时设置 1 个裸土对照。称量时间间隔为 1 周,计算公式参见熊伟等^[16]。

1.3.3 整个林分水分利用效率的估算 将华北落叶松整个林分的水分利用效率分为乔木层和草本层水分利用效率两部分来计算。其中,乔木层按照公式(16)计算,草本层按照公式(17)计算,林分水分利用效率按照公式(18)计算,公式为

$$U_{Ti} = Z_i / (E_i + I_i) \quad (16)$$

$$U_{Hi} = C_i / Y_i \quad (17)$$

$$U_{Fi} = (Z_i + C_i) / (E_i + I_i + Y_i) \quad (18)$$

式中:*U_{Ti}*——第 *i* 月乔木层水分利用效率(g/kg);*Z_i*——华北落叶松林分第 *i* 月的生产力(t/hm²);*E_i*——乔木层第 *i* 月蒸腾量(mm);*I_i*——第 *i* 月的冠层截留量(mm);*U_{Hi}*——第 *i* 月草本层水分利用效率(g/kg);*C_i*——第 *i* 月草本层生物量增量(t/hm²);*Y_i*——第 *i* 月草本层蒸散量(mm);*U_{Fi}*——第 *i* 月林分的水分利用效率(g/kg)。

2 结果与分析

2.1 华北落叶松林分生产力

2.1.1 单株胸径生长与林分树干生产力 图 1 给出了各个样树的胸径累积增长,图中 dc1-4 分别代表胸径由大到小的 4 棵样树的胸径增长量。在整个生长季中各个树干的胸径都出现是慢—快—慢的季节变化,即 5 月前期树木缓慢开始生长,5 月底 6 月初生长最快,之后增速减缓,8 月中旬基本停止生长。同时,生长季末各个样木胸径生长累积量排序为:dc1>dc3>dc2>dc4,这与胸径大小排序很不一样,说明在森林中树木胸径的生长量与其树干的胸径大小并不是简单的相关关系。

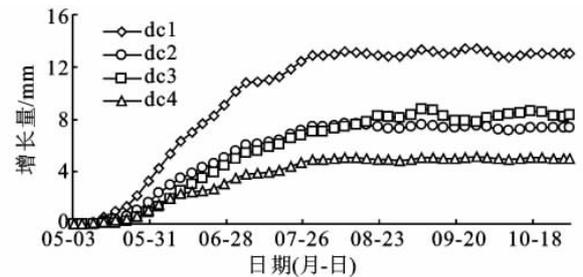


图 1 华北落叶松样树胸径累积生长的季节变化

基于单株胸径生长估计了整个林分的树干生产力,见表 2。各月生产力大小排序为:6 月>5 月>7 月>9 月>10 月,说明其生产力月分布不均匀,主要集中在 5-7 月 3 个月,合计达到 5.4 t/hm²,占树干

全年生产力的 97%；相反，8 月、9 月和 10 月合计值只有 0.16 t/hm²，占年生产力的 3%；树干全年生产力为 5.54 t/hm²。

表 2 华北落叶松林分总生产力及其分量的季节变化 t/hm²

时间	乔木层			合计	草本 生产力	林分 合计
	树叶	树枝	树干			
5 月	1.43	0.18	1.62	3.23	0.25	3.48
6 月	0.62	0.28	2.44	3.33	0.35	3.69
7 月	0.28	0.15	1.32	1.75	0.45	2.20
8 月	0.34	0	0.01	0.35	1.17	1.52
9 月	0	0.02	0.15	0.17	0.01	0.46
10 月	0	0	0	0	0.40	0.40
合计	2.67	0.63	5.54	8.84	2.92	11.76

华北落叶松枝条生产力的季节变化规律与树干生产力的相同，其年生长量为 0.67 t/hm²。但其生长总量很小，只占整个林分年生长量的 7%。

华北落叶松人工林乔木层总生产力为 8.84 t/hm²。从其组成来看，树干是其总生产力的主要分量，占乔木层生产力的 63%；其次为树叶，占 30%，枝条只占 7%。季度变化来看，主要生产力集中在 5 月、6 月份，合计达 6.56 t/hm²，占乔木年生产力的 74%，其次是 7 月为 1.75 t/hm²，占乔木年生长量的 19%。8 月、9 月、10 月三个月的生产力很少，合计为 0.52 t/hm²，占乔木年生产力的 5%。

草本层年生产力为 2.92 t/hm²。各月生产力排序为：8 月 > 10 月 > 7 月 > 6 月 > 5 月 > 9 月。其中，5 月、6 月和 7 月草本层的生产力增加并不明显，可能与草本植物的物候期较晚及林内的透光性有关。8 月草本层生产力出现快速增加，9 月月没有任何生物量累积，但 10 月草本生产力反而增加可能与其生物学特征及冠层的透光性有关。

华北落叶松林分年总生产力为 11.76 t/hm²。从其空间分布上看，乔木层生产力是主要分量，占总生产力的 75.2%；草本层仅占总生产力的 24.8%。从其时间分布上看，其月分量最大值为 6 月的 3.69 t/hm²，呈现先升高后降低的季节变化规律；5—7 月 3 个月的生产力较高，合计 9.37 t/hm²，占总生产力的 79%；其次，8 月的总生产力达 2.20 t/hm²；9 月、10 月的生产力很小，合计只有 0.86 t/hm²，只占总生产力的 7.3%。

2.1.2 叶面积指数与叶的生产力 华北落叶松林分叶面积指数值 5—8 月缓慢升高达到最大值 3.28，8—9 月逐渐降低，10 月开始快速下降至 0.62。整个林分叶片的生产力季节变化规律与叶面积指数变化趋势基本相同。由于在计算叶片生产量时同时引入了叶面积指数和叶片含水率作为参数，因此 8 月虽然叶面

积指数最高，但随着含水率的降低，叶生物量最高的时间出现在 9 月初。之后，随着树叶的凋落生物量急速下降直至 0。华北落叶松树叶生产力排序为：5 月、6 月、8 月、7 月、9 月和 10 月没有增长（图 2）。

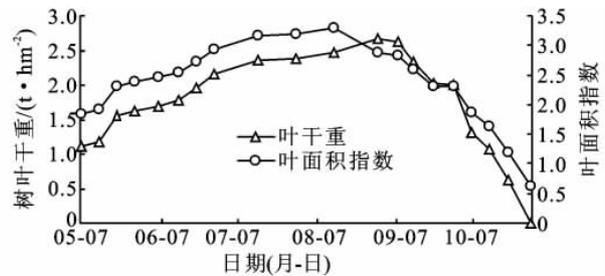


图 2 华北落叶松人工林叶面积指数和叶生物量的季节变化

2.2 林分蒸散及分量的季节变化

2.2.1 单株液流速率与乔木层蒸腾量 从图 3 可以看出，华北落叶松各样木的树干液流都呈现出生长季前中期（5—7 月）较高，至 8 月初达最高值 0.207 ml/(cm²·min)，之后呈逐渐降低的变化趋势。在整个生长季中，尽管各个样木的大小排序随着时间推移出现一定的波动，但优势木一直保持着较大的液流速率（图中 sf1—4 分别代表胸径由大到小 4 棵样木的树干液流速率）。

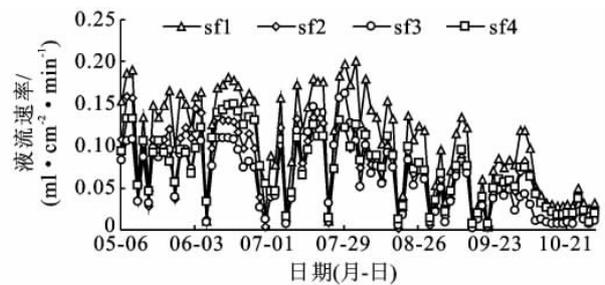


图 3 样树蒸腾速率变化

由图 4 看出，乔木层日蒸腾量的季节变化总体趋势与蒸腾速率相似，表现为生长季前中期较高，中后期逐渐降低的趋势。5 月的蒸腾量起伏较大，最大值为 1.3 mm；6 月的蒸腾集中在 6 月 17 日附近的连续晴天，最高值为 1.4 mm；7 月的林分蒸腾也比较集中，最大值为 1.5 mm，8 月并没有出现连续几天超过 1.0 mm 的天数，而且起伏较大，最大值为 1.0 mm；9 月之后，蒸腾的最大值只有 0.9 mm；10 月的蒸腾量很小，最大值只有 0.3 mm。

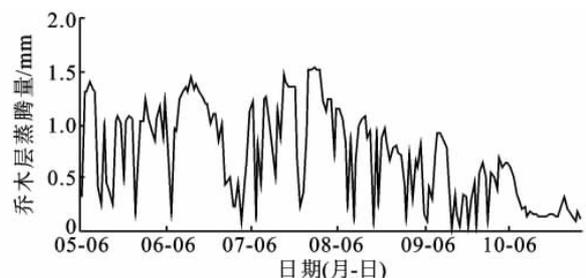


图 4 乔木层蒸腾量日变化

2.2.2 林分总蒸散及分量的季节变化 华北落叶松人工林总蒸散的季节变化见表3。从时间变化上看呈现5月(42.6 mm)最小、7月(101.3 mm)最高、6月(92.2 mm)和8月(93.7 mm)次之的低—高一低的趋势。在整个生长季中,华北落叶松人工林总蒸散量达433.9 mm,小于生长季期间的总降雨量(492 mm),其中乔木层与草本层的耗水量分别占总蒸散的50.5%和49.5%。华北落叶松人工林蒸散分量的季节变化略有差异。其中,华北落叶松乔木蒸腾量变化按时间分布以7月为最高,呈现先升高后降低的趋势,7月蒸腾量最大为30.2 mm,10月最小为8.4 mm。冠层截留量的大小与降雨量密切相关,7月最高,9月其次,其他各月较少,7月最大为35.8 mm,10月最小为7.2 mm。草本层蒸散呈现6月、8月较高,5月、7月、9月、10月较低的起伏变化,其最大值为8月的58.9 mm,最小值为5月的12.5 mm。

表3 华北落叶松林分总蒸散及其分量 mm

时间	乔木层			草本层	林分合计
	蒸腾量	截留量	合计		
5月	22.5	7.7	30.2	12.5	42.6
6月	29.2	11.6	40.9	51.4	92.2
7月	30.2	35.8	66.0	35.3	101.3
8月	24.2	10.6	34.8	58.9	93.7
9月	13.0	18.7	31.7	28.6	60.3
10月	8.4	7.2	15.6	28.2	43.8
合计	127.5	91.6	219.0	214.8	433.9

2.3 华北落叶松林分水分利用效率

华北落叶松人工林乔木层水分利用效率季节变化呈现逐月依次降低的趋势,这主要与华北落叶松在生长期前中期具有较快的树干、枝和叶的生长有关。其中,5月份的水分利用效率最高,为10.7 g/kg;6月其次(8.15 g/kg),7月、8月、9月继续减小,到10月份树木基本停止生长,水分利用效率接近为0。

华北落叶松人工林下的草本层水分利用效率的季节变化呈现不规则起伏变化。其中,5月(2.00 g/kg)最高;6—7月的水分利用效率(0.68 g/kg)相对于5月有所降低,这是由于较强的草本层蒸散有关;至8月,草本层的生长量和蒸散量都为生长季中的最大值,因此其水分利用效率稍低于5月;9月草本层的水分利用效率接近为0,这是受其生物学物候期和土壤表层干旱的双重影响而导致极低的生长量所造成的。10月虽然林内透光性较好,但生长量较低,从而导致较低的水分利用效率。

华北落叶松整个林分的水分利用效率。从时间分布上看,5—8月依次下降,其中5月份最高达到8.17 g/kg;9月由于乔木和草本都近乎停止生长,水

分利用效率降至最低值;10月份华北落叶松落叶,草本层能得到更多光照有所生长,使其水分利用效率有所回升(表4)。

表4 华北落叶松林分各层水分利用效率的季节变化 g/kg

时间	乔木层	草本层	林分合计
5月	10.72	2.01	8.17
6月	8.15	0.69	4.00
7月	2.65	1.27	2.17
8月	1.02	1.99	1.63
9月	0.52	0.01	0.27
10月	0.01	2.48	1.60
生长季合计	4.04	1.36	2.71

3 讨论

虽然目前国内外已经有大量生态系统(群体)WUE的研究报道,但由于受不同测定或计算方法和研究尺度的影响,WUE的测定指标和单位不一致,导致了各种方法的结果无法直接比较,这限制了WUE的继续深入研究。如张春敏^[5]在对长江源区植被水分利用效率的估算,卢玲等^[6]对中国西部植被水分利用效率的估算,都采用了植物每消耗1 mm的水所能固定的有机碳克数 $[gC/(mm \cdot m^2)]$ 来表示WUE;而王妍等^[4]利用涡度相关设备测定杨树生态系统CO₂净吸收量与水汽净蒸散量的比值(mg/g)来表示生态系统的WUE;余孟好等^[18]研究马占相思林冠层水分利用效率中,又使用了CO₂与H₂O的摩尔比值(mmol/mol)来表示WUE。

本研究通过同时测算华北落叶松人工林地上部分(树干、枝和叶)的生长量增量和林分蒸散量,估计了华北落叶松人工林及各垂直层次的水分利用效率季节变化特征。为便于与其它结果进行比较,本研究根据相关文献计算了华北落叶松各个器官生物量增量所对应的含碳率,将生物量水分利用效率转化成对应有有机碳水分利用效率(单位为gC/kgH₂O)。按照华北落叶松树干、枝、叶、草的含碳率分别为干50.29%、枝51.00%、叶51.07%、45.00%来计算^[19-20],得到整个生长季华北落叶松人工林WUE为1.30 gC/kgH₂O,其中乔木层4.04 gC/kgH₂O、草本层0.61 gC/kgH₂O;林分WUE在生长季内变化范围为0.13~4.00 gC/kgH₂O。以上测定结果与卢玲等^[6]利用生产力模型估算藏东南及陕西省、甘肃省南部山区森林、草原等植被的年均WUE(1~2 gC/kgH₂O)和田汉勤等^[21]利用动态土地生态系统模型估算的值(森林0.93 gC/kg H₂O、草地0.58 gC/kgH₂O)是基本一致的,但略高于Forrester等^[22]估测不同桉树林的WUE(蓝桉、黑荆混交林:1.69 gC/

kgH₂O, 纯林: 0.94 gC/kgH₂O), 这是因为 Forrester 等在桉树林 WUE 的研究中没有计算林分叶量增长量的缘故。

本研究中华北落叶松林分水分利用效率的季节变化趋势是以乔木层的季节变化为主导, 这与其生长发育规律相吻合。另外, 从草本植物对林分水分利用效率的影响来看, 林分结构也是影响其整体水分利用效率的重要因素, 例如 Forrester 等^[22]研究发现混交林水分利用效率高于纯林。以上说明, 林分水分利用效率并不是各种单株水分利用效率的叠加, 而其涉及到森林群落学特性、不同层次和结构植物间的相互影响、林分的季相变化、植物对环境适应策略和环境因子变化等, 还有待更进一步的研究。

4 结论

(1) 华北落叶松林分生长季总生产力为 11.76 t/hm², 其各层及所占比例分别为: 乔木层 8.84 t/hm² (75.2%), 草本层 2.92 t/hm² (24.8%)。同时, 华北落叶松人工林月生产力季节变化呈现出由高到低的变化规律, 其峰值出现在生长季初期的 6 月 (3.69 t/hm²), 其中乔木层各分量及组成比例为: 树干 5.54 t/hm² (62.7%)、树枝 0.63 t/hm² (7.1%)、树叶 2.67 t/hm² (30.2%)。草本层生产力季节变化呈现低—高—降的趋势, 最大值出现在 8 月 (11.7 t/hm²)。

(2) 华北落叶松人工林生长季的蒸散量为 433.9 mm, 低于同期的降水量 (492 mm), 其中乔木层略高, 为 219.8 mm (50.5%); 草本层 (包括土壤蒸发) 次之, 为 214.8 mm (49.5%)。整个林分的蒸散量呈现先升高后降低的季节变化规律, 峰值出现在 7 月 (101.3 mm)。其中乔木层蒸散组成为: 蒸腾量 127.5 mm (58.2%), 截留量 91.6 mm (41.8%)。草本层蒸散的耗水月分量也呈现类似规律, 峰值为 8 月的 58.93 mm。

(3) 华北落叶松林分整个生长季的水分利用效率为 2.71 g/kg, 其呈现出明显的高低—高的变化规律, 峰值为 5 月的 8.17 g/kg。其中, 乔木层的水分利用效率为 4.04 g/kg, 其季节变化呈现出由高到低的趋势, 峰值为 5 月的 10.72 g/kg; 草本层水分利用效率为 1.36 g/kg, 其季节变化呈现 5 月、8 月、10 月较高, 6 月、7 月、9 月较底的起伏变化, 峰值为 10 月的 2.48 g/kg。

参考文献:

[1] 熊伟, 王彦辉, 于澎涛. 树木水分利用效率研究综述[J]. 生态学杂志, 2005, 24(4): 417-421.

- [2] 曹生奎, 冯起, 司建华, 等. 植物叶片水分利用效率研究综述[J]. 生态学报, 2009, 29(7): 3882-3892.
- [3] 胡中民, 于贵瑞, 王秋凤, 等. 生态系统水分利用效率研究进展[J]. 生态学报, 2009, 29(3): 1498-1507.
- [4] 王妍, 江泽慧, 彭镇华, 等. 长江滩地杨树林生态系统水分利用效率及影响因子[J]. 生态学报, 2010, 30(11): 933-2939.
- [5] 张春敏. 长江源区植被净初生产力及水分利用效率的估算研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2008.
- [6] 卢玲, 李新, 黄春林, 等. 中国西部植被水分利用效率的时空特征分析[J]. 冰川冻土, 2007, 29(5): 777-784.
- [7] 肖生春, 肖洪浪, 司建华, 等. 胡杨 (*Populus euphratica*) 径向生长日变化特征分析[J]. 冰川冻土, 2010, 32(4): 816-822.
- [8] 熊伟, 王彦辉, 于澎涛, 等. 六盘山南坡华北落叶松 (*Larix principis-rupprechtii*) 树干直径生长及其对气象因子的响应[J]. 生态学报, 2007, 27(2): 432-441.
- [9] 管伟, 熊伟, 王彦辉, 等. 六盘山北侧华北落叶松树干直径生长变化及其对环境因子的响应[J]. 林业科学, 2007, 43(9): 1-6.
- [10] Hemery G E, Savill P S, Pryor S N. Applications of the crown diameter-stem diameter relationship for different species of broadleaved trees[J]. Forest Ecology and Management, 2005, 215(1/3): 285-294.
- [11] Hubbard R M, Stape J, Ryan M G, et al. Effects of irrigation on water use and water use efficiency in two fast growing *Eucalyptus* plantations[J]. Forest Ecology and Management, 2010, 259(9): 1714-1721.
- [12] Gyenge J, Fern Ndez M A E, Sarasola M, et al. Testing a hypothesis of the relationship between productivity and water use efficiency in Patagonian forests with native and exotic species[J]. Forest Ecology and Management, 2008, 255(8/9): 3281-3287.
- [13] 郭力勤, 肖杨. 华北落叶松天然林立木重量表的试编[J]. 林业资源管理, 1989(5): 36-39.
- [14] 刘建立, 王彦辉, 管伟, 等. 六盘山北侧生长季内华北落叶松树干液流速率研究[J]. 华中农业大学学报, 2008, 27(3): 434-440.
- [15] 周杨. 六盘山北侧华北落叶松人工林蒸腾规律及水量平衡研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2010.
- [16] 熊伟, 王彦辉, 于澎涛, 等. 六盘山辽东栎、少脉椴天然次生林夏季蒸散研究[J]. 应用生态学报, 2005, 16(9): 1628-1632.
- [17] 时忠杰, 王彦辉, 徐丽宏, 等. 六盘山华山松 (*Pinus armandii*) 林降雨再分配及其空间变异特征[J]. 生态学报, 2009, 29(1): 76-85.
- [18] 余孟好, 孙谷畴, 赵平. 马占相思林冠层水分利用效率的气候调节[J]. 应用与环境生物学报, 2010, 16(3): 309-316.

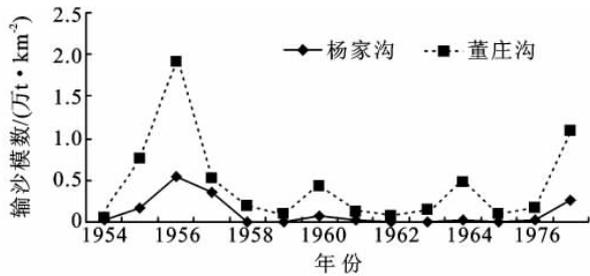


图 3 小流域输沙模数对比

4 结论

(1)对甘肃省庆阳市西峰区杨家沟小流域和董庄沟两个对比小流域的实测土壤孔隙度、径流、泥沙等资料分析可见,经过人工治理后的杨家沟小流域,土壤孔隙度、土壤容重均优于未经人工治理的董庄沟。在相同降雨条件下,两小流域的径流模数、输沙模数变化趋势基本一致,董庄沟小流域的径流模数均比杨家沟小流域大,部分年限达到了其 30 倍,在径流模数一定的情况下,从有观测资料以来董庄沟小流域输沙模数均比杨家沟流域大,大量的水土流失带走了董庄沟更多土壤养分,其土壤速效磷含量不及杨家沟小流域的 50%,其它土壤养分均比杨家沟低 15%~38%。

(2)在黄土高原沟壑区以水土保持工程措施、植物措施相结合的水土流失治理方法比单纯的依靠自然生态修复有更大的蓄水保土效益。水土流失作为一个多因素形成的结果,很难依靠自然修复完全实现水土保持效益,工程措施、植物措施等多手段治理方法是黄土高原水土流失治理、小流域生态修复取得最大蓄水保土效益的必然选择。

(3)文章主要探讨水土保持措施的蓄水保土效益,在以后的研究中还可以增加经济投入等多方面因素对比分析水土保持的综合效益。

参考文献:

- [1] 于静洁,刘昌明. 森林水文研究综述[J]. 地理研究, 1989,8(1):88-98.
- [2] 孟庆枚. 黄土高原水土保持[M]. 郑州:黄河水利出版社,1996.
- [3] 王立明,虎维军. 浅谈小流域综合治理与新农村建设[J]. 中国水土保持 2010(8):35-36.
- [4] 党志良,林启才,史淑娟. 水土保持综合治理效益分析与评价:以丹凤县陈家沟小流域为例[J]. 西北大学学报:自然科学版,2010,40(6):537-539.
- [5] 罗雷,张济世. 甘肃省水土保持的农村社会经济评价与分析[J]. 中国水土保持,2009(9):13-14.
- [6] 陈鹏飞,陈丽华,余新晓,等. 沟壑综合整治对小流域水沙的影响[J]. 水土保持研究,2010,17(4):100-104.
- [7] 田杏芳,贾泽祥,刘斌,等. 黄土高原沟壑区典型小流域水土流失规律及水土保持治理效益分析研究[M]. 郑州:黄河水利出版社,2008.
- [8] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海:上海科学技术出版社,1978.
- [9] 陈攀攀,毕华兴,陈智汉,等. 50 年来黄土高原沟壑区典型小流域土地利用动态变化及其驱动力分析[J]. 中国水土保持科学,2010,8(1):71-76.
- [10] 郑纪勇,邵明安,张兴昌. 黄土区坡面表层土壤容重和饱和导水率空间变异特征[J]. 水土保持学报,2004,18(3):53-56.
- [11] 陈攀攀. 黄土高原沟壑区典型小流域土地利用格局变化对水土流失的影响研究[D]. 北京:北京林业大学,2010.
- [12] 刘鹏涛,冯佰利,慕芳,等. 保护性耕作对黄土高原春玉米田土壤理化特性的影响[J]. 干旱地区农业研究,2009,27(4):171-175.
- [13] 聂小军,张建辉,刘刚才,等. 金沙江干热河谷侵蚀陡坡植被恢复对土壤质量的影响[J]. 生态环境,2008,17(4):1636-1640.
- [14] 汪永英. 新民林场不同森林类型土壤持水能力的分析[J]. 农机化研究,2007(5):80-82.
- [15] 王辉,王全九,邵明安. 表层土壤容重对黄土坡面养分径流迁移的影响[J]. 水土保持学报,2007,21(3):10-14.
- [16] 张玉斌,曹宁,苏晓光,等. 吉林省低山丘陵区水土保持措施对土壤性质的影响[J]. 水土保持通报,2009,29(5):226-227.
- [19] 陈遐林. 华北主要森林类型的碳汇功能研究[D]. 北京:北京林业大学,2003.
- [20] 马钦彦,陈遐林,王娟,等. 华北主要森林类型建群种的含碳率分析[J]. 北京林业大学学报,2002,24(5/6):100-104.
- [21] Tian H, Chen G, Liu M, et al. Model estimates of net primary productivity, evapotranspiration, and water use efficiency in the terrestrial ecosystems of the southern United States during 1895-2007[J]. Forest Ecology and Management,2010,259(7):1311-1327.
- [22] Forrester D I, Theiveyanathan S, Collopy J J, et al. Enhanced water use efficiency in a mixed *Eucalyptus globulus* and *Acacia mearnsii* plantation[J]. Forest Ecology and Management,2010,259(9):1761-1770.

(上接第 118 页)