

六盘山华北落叶松人工林地土壤水分动态研究^{*}

杨民益¹, 杜阿朋², 王彦辉³

(1. 宁夏回族自治区固原市原州区林业局, 宁夏 固原 756000; 2. 国家林业局 桉树研究开发中心, 广东 湛江 524022; 3. 中国林业科学研究院 森林生态环境与保护研究所, 北京 100091)

摘要:利用平衡式张力计和时域反射仪(TDR)定位监测方法,研究了六盘山山地华北落叶松人工林地土壤水分动态规律。结果表明:研究时段内,华北落叶松林内土壤水分时间动态变化可划分为土壤水分的相对湿润期、持续消耗期和快速恢复期;依据水分利用特征可将垂直土层划分为土壤水分的微弱利用层(0 - 20 cm)、利用层(20 - 60 cm)和水分调节层(60 cm 以下)。华北落叶松林内 0 - 60 cm 各土层土壤蓄水量与太阳辐射、大气温度、VPD 和液流量均呈极显著相关($P < 0.01$),对各因子进行多元逐步回归分析,得到 0 - 60 cm 各土层土壤蓄水量与气象因子间的多元线性回归方程。

关键词:六盘山; 华北落叶松; 土壤水分; 土壤蓄水量

中图分类号:S152.7;S724

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2009)06-0129-05

Dynamics of Soil Water Under *Larix principis - rupprechtii* Plantation in the Liupan Mountains

YANG Min-yi¹, DU A-peng², WANG Yan-hui³

(1. The Forestry Administration of Yuanzhou District, Guyuan, Ningxia 756000, China; 2. China Eucalypt Research and Development Centre of State Forestry Administration, Zhanjiang, Guangdong 524000, China; 3. Research Institute of Forestry Ecology, Environment and Protection, CAF, Beijing 100091, China)

Abstract: By using Equi tensiometer and time domain reflectmetry (TDR), a fixed - position monitoring was made on the dynamic characteristics of soil water under *Larix principis - rupprechtii* plantation in the Liupan Mountains. The results showed that the dynamics of soil water could be described as relatively wetness period, durative consuming period and fast accumulating period. According to soil water utilizing character, the vertical soil water dynamics with soil depth can be divided into 3 layers: faintness - utilizing layer (0 - 20 cm), mostly - utilizing layer (20 - 60 cm) and adjusting layer (below 60 cm). Significant correlations existed between soil water storage and meteorological factors as the solar radiation, air temperature, vapor pressure deficit (VPD) and the sap flow flux ($P < 0.01$). Carries on the multi-dimensional gradually regression analysis to various factors, the multi-dimensional equation of motion between the 0 - 60 cm various soil layers soil water - holding capacity with the meteorological factor was obtained.

Key words: the Liupan Mountains; *Larix principis - rupprechtii*; soil water; soil water storage

华北落叶松(*Larix principis - rupprechtii*)为松科落叶松属。性极耐寒,耐干旱瘠薄能力较强,对土壤水分条件和土壤养分条件的适应范围很广,最适合于较高海拔和较高纬度地区的配置应用。是目前六盘山区主要的造林树种之一。六盘山北端地处干旱半干旱地区,水资源严重短缺,土壤沙化和水

土流失严重。恢复植被是改善该区生态环境的唯一途径。水分是干旱半干旱地区植被恢复的主要生态限制因子^[1-2],土壤作为植被生长所需水分的直接供给库,其水分条件直接关系到植被建设的成败与否。然而在该区,天然降水是土壤水分唯一补给源,如何在现有水资源状况的条件下更快的恢复植被而又能

* 收稿日期:2009-10-21

基金项目:国家自然科学基金项目(40730631,40671038,30671677);科技部“十一五”科技支撑计划项目课题(2006BAD03A1803);科技部社会公益研究专项(2004DIB3J102);中国林科院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(CAF YBB2007038, CAFRIF200702);国家林业局森林生态环境重点实验室资助

作者简介:杨民益(1965 -),男,宁夏固原人,高级工程师,主要从事林业生产和乡土树种的研究培养与推广工作。E-mail:nxyzqyang-mingxi@163.com

通信作者:王彦辉(1957 -),男,河北安平人,研究员,主要从事森林生态、森林水文等研究。E-mail:wangyh@caf.ac.cn

保持植被的稳定性就成了亟待解决的问题。因此土壤水分动态的研究至关重要。

本研究以华北落叶松人工林地为研究对象,通过定位监测土壤含水量,综合研究气象因子对土壤水分的影响,旨在揭示华北落叶松林地土壤水分动态,为维护华北落叶松林的稳定性和适应性提供理论支持。

1 研究区概况

叠叠沟小流域隶属宁夏回族自治区固原市(106°09' - 106°30' E, 35°15' - 35°41' N) 原州区叠叠沟林场,面积 25.4 km²,属于六盘山北侧的土石山区

与黄土高原的过渡地带,海拔 1 975 ~ 2 615 m,年平均气温 5.8℃,年无霜期 90 ~ 130 d,年降水量 380 ~ 650 mm,且主要集中在夏秋季,多年平均潜在蒸发量为 1 420 mm,属温带大陆性气候^[3-4]。

研究样地设在叠叠沟下游东北坡坡度在 12°左右的坡下位,面积 20 m × 20 m 的华北落叶松林地。土壤为灰褐土,土壤水文物理性质见表 1。华北落叶松人工林林龄 20 a,林分密度 1 650 株/hm²,林分郁闭度 0.65,灌草层盖度 40%,主要包括沙棘(*Hippophae rhamnoides* L.)、细叶苔草(*Carex rigescens* Franch. V. Krecz)和铁杆蒿(*Artemisia sacrorum* Ledeb.)等。

表 1 研究样地土壤水分物理性质

土层深度/ cm	土壤密度/ (g · cm ⁻³)	总孔 隙度/ %	毛管孔 隙度/ %	非毛管 孔隙度/ %	饱和持 水量/ %	毛管持 水量/ %	田间持 水量/ %
0 - 10	1.08	56.88	52.28	4.60	52.71	48.44	48.17
10 - 20	1.02	66.71	61.31	5.40	65.45	60.05	59.65
20 - 30	1.09	58.46	53.93	4.53	53.81	49.65	49.04
30 - 40	1.11	55.44	48.36	7.08	50.09	43.68	43.44
40 - 60	1.08	57.06	49.00	8.05	53.34	45.67	45.31
60 - 80	1.05	58.95	46.58	12.37	56.32	44.45	44.07
80 - 100	1.09	56.60	46.25	10.34	52.13	42.52	42.13

2 研究方法

2.1 土壤水势测定

在林内于 2008 年 4 月 20 日安装了 4 组平衡式张力计(德国 Ecomatic 公司生产的 EQ15 型和 EQ18 型),每组有 3 个探头,分别埋在 0 - 20、20 - 40、40 - 60 cm 的土层。让其稳定两周后,在 5 - 10 月,连续自动观测土壤水势变化,数据采集时间间隔 5 min。同时,在林地内布设 6 根 Trime 管,利用时域反射仪(TDR)测定林地土壤体积含水率,测定周期为每 15 天 1 次。

2.2 气象因子测定

在华北落叶松林内和林外开阔地,利用 2 台美国 LI-COR 公司生产的 LI-1401 小型自动气象站(Agro-Meteorological Station),分别连续自动采集林内和林外的太阳辐射强度(W/m²)、降雨量(mm)、大气温度(℃)、大气相对湿度(%)、风速(m/s)、风向以及 20 cm 和 40 cm 深处的土壤温度(℃)等气象数据,采集间隔时间 5 min。

2.3 林下蒸散测定

在华北落叶松林内,布设 4 个简易蒸渗仪测定林内草本蒸腾和土壤蒸发,测定周期设为每日测定 1 次。

2.4 华北落叶松液流速率测定

在 2008 年 5 - 10 月,利用德国 Ecomatik 公司

生产的 SF-L 树干液流探头,在 4 株样树上定位连续测定单株树干液流,测定数据用英国 Delta-T 公司生产的 DL2 数据采集器自动采集,采集间隔时间设为 5 min。

2.5 数据处理

利用 Excel 和 SPSS 11.0 进行统计分析。

3 结果与分析

3.1 华北落叶松林地土壤水分特征曲线

土壤含水量和土壤基质势或土壤基质吸力之间的关系称为土壤特征曲线,它反映的是土壤水与土壤固相间相互作用关系,同时也反映了土壤颗粒和土壤孔隙对土壤水表面吸附和毛管作用力,也就是土壤持水和供水的能力。应用土壤水分特征曲线可以实现土壤水分含量与土壤基质吸力或基质势之间的换算用来推算土壤中实效孔径分布和比水容量、土壤水分扩散率等土壤特征参数,对于了解土壤水文功能规律有一定的指导作用。

土壤水分特征曲线多用离心法测定,这种方法用环刀取土,对土壤有一定的破坏,本研究在华北落叶松人工林内利用平衡式张力计测定林内土壤水势的变化,同时利用时域反射仪(TDR)每 15 天测定 1 次林地的土壤体积含水率,利用二者同步测得的土壤水势和土壤体积含水率推出野外测定的华北落叶松

林地内 0 - 60 cm 土层的土壤水分特征曲线(图 1)。

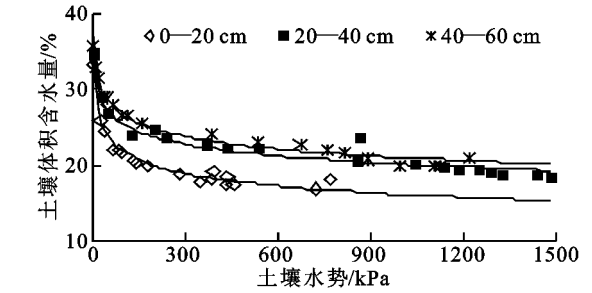


图 1 华北落叶松林地土壤水分特征曲线

从图 1 看出,在土壤水势的相同情况下,40 - 60 cm 土层的土壤体积含水量是最高的,0 - 20 cm 的土壤体积含水量则最低,这表明 40 - 60 cm 的土壤保水能力较强,水分不易损失,而 0 - 20 cm 的土壤水分极易损失,保水能力较弱。利用目前比较常用的拟合土壤水分特征曲线的幂函数方程拟合了华北落叶松林地 0 - 60 cm 土层的土壤水分特征曲线(表 2)。

表 2 华北落叶松样地土壤水分特征曲线方程

土壤深度/cm	回归方程	决定系数
0 - 20	$y = 0.4008 x^{-0.1326}$	0.9370
20 - 40	$y = 0.4069 x^{-0.1024}$	0.9332
40 - 60	$y = 0.4274 x^{-0.1036}$	0.9744

3.2 华北落叶松林地土壤水势季节变化及干旱分期

图 2 为华北落叶松样地 0 - 60 cm 范围的不同土层的水势变化。可以看到在整个生长季各土层土壤水势均存在明显的阶段性变化。因此,可将林地的土壤水势变化分为土壤水分湿润期、土壤水分消耗期和土壤水分恢复期 3 个阶段^[5]。

(1) 土壤水分相对湿润期。此时期为 5 月中旬的树木开始旺盛生长之前,期间降水稀少(如 5 月 4 - 21 日 18 d 的林内降水仅 2 mm),初期土壤水势相对较高,由于气温较低和蒸发微弱,土壤水分消耗较低,主要是上年秋末和非生长季贮存的土壤水分。在 0 - 20 cm 土层,5 月 4 - 21 日的土壤水势为 - 98.7 ~ - 14.0 kPa,平均 - 46.5 kPa,变异系数 0.588 8;在 20 - 40 cm,5 月 4 - 21 日的土壤水势为 - 241.5 ~ - 27.7 kPa,平均 - 87.0 kPa,变异系数 0.795 0;在 40 - 60 cm 土层,5 月 4 - 21 日土壤水势为 - 74.1 ~ - 11.3 kPa,平均 - 38.0 kPa,变异系数 0.657 1。

(2) 土壤水分持续消耗期。此时期为 5 月中旬到 9 月中旬秋雨季节来临之前,随着气温升高,植被蒸腾旺盛和土壤蒸发强烈。虽然期间的零星降水事件对土壤含水量降低的趋势能起到暂时缓解作用,使得土壤水势变化曲线时有起伏,但难以改变水势下降的整体趋势。5 月 22 日 - 9 月 7 日,共 109 d,期间林内降水总共 114 mm。在此期间 0 - 20 cm 土层的土壤水势为 - 818.8 ~ - 109.2 kPa,平均

- 479.8 kPa,变异系数 0.387 6;20 - 40 cm 土层的土壤水势为 - 1 511.6 ~ - 296.7 kPa,平均 - 1 217.6 kPa,变异系数 0.239 5;40 - 60 cm 土层的土壤水势为 - 1 209.2 ~ - 83.2 kPa,平均 - 837.4 kPa,变异系数 0.378 2。

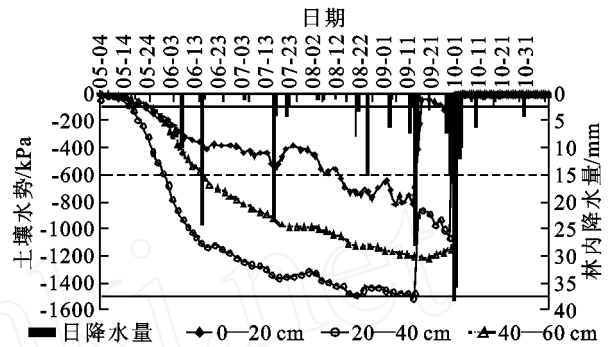


图 2 2008 年生长季华北落叶松林地土壤水势变化

(3) 土壤水分迅速恢复期。此时期为 9 月中旬秋雨季节来临以后,期间植被基本停止生长,土壤水分的变化主要是由于土壤蒸发和深层渗漏。9 月 8 日至 11 月 1 日的 55 d 内有林内降水共 184 mm。期间 0 - 20 cm 土壤水势为 - 4.4 ~ - 691.1 kPa,平均 - 46.4 kPa,变异系数为 2.412 8;对 20 - 40 cm 土层,土壤水势为 - 1 480.1 ~ - 3.3 kPa,平均 - 278.4 kPa,变异系数 1.589 4;40 - 60 cm 土层的土壤水势为 - 1 224.4 ~ - 3.4 kPa,平均 - 371.0 kPa,变异系数 1.479 0。另外,9 月 6 日下午至 9 月 9 日持续降雨,林内共降雨 45 mm,0 - 20 cm 土壤水势自 9 月 7 日至 12 日连续 5 d 上升,由 - 817.5 kPa 上升至 - 44.3 kPa;而 20 - 40 cm 土壤水势自 9 月 7 日至 11 日连续 4 d 上升,由 - 1 511.6 kPa 上升至 - 858.4 kPa,之后两土层土壤水势又下降直到 9 月 22 日降雨。而 9 月 6 - 9 日的降雨后 40 - 60 cm 的土壤水势在 0 - 40 cm 土层土壤水势停止增加出现下降后 2 d 才开始上升,并持续到 9 月 22 日降雨后,最终整个 0 - 60 cm 的土壤水势均上升至 - 10 kPa 以上。

3.3 华北落叶松林地垂直层次上的土壤水分利用分析

通过图 2 可以看出,上层土壤和中下层土壤的水势变化存在明显差别,利用上述水势曲线将土壤水势换算为土壤体积含水率并将其转换成土壤蓄水量,统计各土层的水量平衡(表 3),发现它们在植物的水分利用上有明显差异,可以划分为不同水分利用层次^[6]。

(1) 土壤水分微弱利用层(0 - 20 cm)。该土层的土壤水分明显特征是变化剧烈,土壤水分变化与降水基本同步,同时受到外界气象因子影响较显著。该层整个生长季的土壤蓄水量变化在 32.9 ~ 65.9

mm,平均为 44.0 mm,观测期间土壤水分变化总量为 6.8 mm。刘建立 2007 年^[7]在该流域测定草本植物分布区 0 - 20 cm 土层的根系生物量平均占到地下总生物量的 80 % 以上,这表明 0 - 20 cm 土层是

林下草本植物的主要根系分布层,而华北落叶松根系分布较深,因此该层土壤水分对于华北落叶松的蒸腾耗水贡献较小而主要用于地面蒸发和根系浅薄的林下草本植被的蒸腾。

表 3 2008 年生长季华北落叶松林地水量平衡分量的月份变化

时间	各土层土壤水分变化量/mm			乔木蒸 腾量/mm	降雨量/ mm	林下蒸 散量/mm	平衡项/ mm
	0 - 20 cm	20 - 40 cm	40 - 60 cm				
05-04 至 05-31	- 16.7	- 17.1	- 18.2	51.5	2	33.1	- 30.6
06-01 至 06-30	- 3.9	- 2.5	- 5.5	32.2	35	29.5	- 14.8
07-01 至 07-31	- 0.8	- 0.3	- 0.9	50.2	35	40.7	- 53.9
08-01 至 08-31	- 2.2	- 0.4	- 0.7	38.1	35	31	- 30.8
09-01 至 09-30	32.8	32.7	32.8	32	179	22.7	26
10-01 至 10-31	- 2.4	0.6	1.4	22.9	14	22.7	- 31.2
total	6.8	13.0	8.9	226.9	300	179.7	- 135.3

(2) 土壤水分利用层(20 - 60 cm)。在该华北落叶松样地华北落叶松的根系主要分布在 60 cm 以上(图 4),从图 4 中看到在 0 - 20 cm 土层华北落叶松的根系生物量比例是最大的(48.8 %),根多为骨骼根,细根则较少,华北落叶松在 20 - 40 cm 和 40 - 60 cm 土层也有一定比例根系分布,但以细根为主。根系对土壤中水分和养分的吸收主要是通过细根来实现的,可见 20 - 60 cm 土层是华北落叶松蒸腾耗水的主要水分吸收层。研究期间 20 - 60 cm 土层土壤水分变化总量为 21.8 mm(其中,20 - 40 cm 为 13 mm,40 - 60 cm 为 8.8 mm),因此将 20 - 60 cm 土层定义为土壤水分利用层,而由图 2 可以看出 20 - 40 cm 和 40 - 60 cm 的土壤水势变化又有所不同,由此本研究将本层又分为土壤水分主利用层(20 - 40 cm)和土壤水分次利用层(40 - 60 cm) :

土壤水分主利用层(20 - 40 cm):该土层在整个生长季的土壤水势变化在 - 1 511.6 ~ - 3.3 kPa,平均为 - 821.8 kPa,变异系数为 0.717 1,土壤水势变化更多地受到蒸散消耗和降水补给的共同影响,是土壤水分的最主要消耗层。

土壤水分次利用层(40 - 60 cm):该土层的土壤水势在整个生长季的土壤水势变化在 - 1 224.4 ~ - 3.4 kPa,平均为 - 616.5 kPa,变异系数为 0.708 7。该层在土壤水分持续消耗期波动相对较小,受降雨补给的影响微弱,土壤水分得到的补充主要是秋末的土壤水分恢复期的集中降水。

(3) 土壤水分调节层(60 cm 以下):60 cm 以下土层是在 0 - 60 cm 土层出现水分亏缺通过毛管力补充上层。由表 3 可知,在 5 - 8 月降水量较少,0 - 60 cm 土层土壤水分含量下降,但此时期 0 - 60 cm 土层土壤水分下降总量与降水总量之和也远未及林木蒸腾和林下蒸散的总量之和,这说明此时期内 60 cm 以下土层对 0 - 60 cm 土层的土壤水分有所补

充。当进入 9 月,降水量充沛,0 - 60 cm 土层的土壤水分增加量加上蒸发散总量也未及降水总量之和,说明此时 0 - 60 cm 土层发生渗漏而对 60 cm 以下土层的土壤水分有所补充。

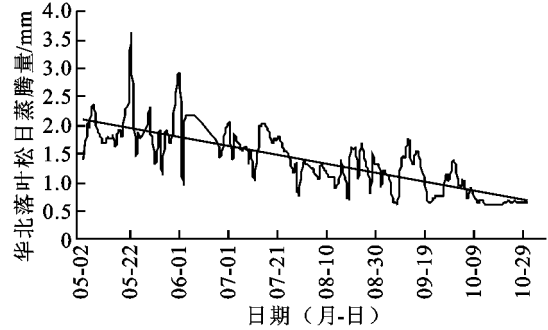


图 3 2008 年生长季华北落叶松林日蒸腾量变化

另外,从 0 - 60 cm 整个生长季的水分平衡来看,研究期间 0 - 60 cm 土层的土壤水分平衡项为 - 135.3 mm,即在研究期间有降水输入以外的外部输入,净输入量为 135.3 mm。因为此华北落叶松样地位于山脚,所以该输入量一方面有可能是从坡上顺坡流入的壤中流,另一方面也有可能是来源于通过毛管力吸收的 60 cm 以下土层的土壤水分。

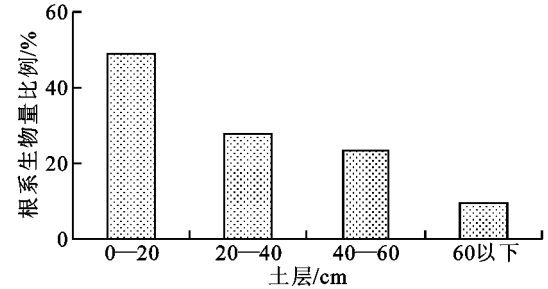


图 4 华北落叶松根系分布

3.4 气象因子对华北落叶松林地内土壤蓄水量的影响

土壤水分主要是受土壤蒸发和植被蒸腾构成的蒸散影响的^[8-9],而土壤蒸发和植被蒸腾均受到大气水势、大气相对湿度、风、气温和太阳辐射等气象因

子的综合影响^[10]。因此,可以把这些气象因子作为驱动因子来进行分析^[11]。

由表 4 可以看出,华北落叶松林地 0 - 20 cm 的土壤蓄水量(mm)与太阳辐射、大气温度、VPD 和液流通量均呈极显著负相关($P < 0.01$),相关系数分别为 0.442,0.778,0.561 和 0.432,与空气相对湿度和大气水势呈极显著正相关($P < 0.01$),相关系数分别为 0.332 和 0.299;20 - 40cm 的土壤蓄水量(mm)与太阳辐射、大气温度、VPD 和液流通量均呈极显著负相关($P < 0.01$),相关系数分别为 0.333,0.755,0.451 和 0.529,与空气相对湿度和大气水势呈显著正相关($P < 0.05$),相关系数分别为 0.195 和 0.159;40 - 60 cm 的土壤蓄水量(mm)与太阳辐射、大气温度、VPD 和液流通量均呈极显著

负相关($P < 0.01$),相关系数分别为 0.237,0.725,0.340 和 0.329。对 0 - 60 cm 各土层土壤蓄水量与各因子进行多元逐步回归分析,得到各层多元线性回归方程:

0 - 20 cm 土层: $S W_1 = 96.725 - 2.877 T$
($R^2 = 0.605, P < 0.05$)

20 - 40 cm 土层: $S W_2 = 86.129 - 2.334 T - 0.076 P$
($R^2 = 0.572, P < 0.05$)

40 - 60 cm 土层: $S W_3 = 82.494 - 1.910 T - 0.270 P$
($R^2 = 0.540, P < 0.05$)

0 - 60 cm 土层: $S W_{total} = 263.163 - 7.017 T + 0.068 P$
($R^2 = 0.598, P < 0.05$)

式中: $S W$ ——土壤蓄水量(mm); T ——大气温度(); P ——林内日降水量(mm)。

表 4 土壤蓄水量与气象因子之间的相关分析

土层/ cm	液流通量/ ($L \cdot d^{-1}$)	太阳辐射/ ($W \cdot m^{-2}$)	大气温度/ /	空气相对 湿度/ %	林内日 降水量/ mm	VPD/ kPa	大气水势/ kPa
0 - 20	- 0.432 **	- 0.442 **	- 0.778 **	0.332 **	0.293 **	- 0.561 **	0.299 **
20 - 40	- 0.529 **	- 0.333 **	- 0.755 **	0.195 *	0.136	- 0.451 **	0.159 *
40 - 60	- 0.329 **	- 0.237 **	- 0.725 **	0.070	0.038	- 0.340 **	0.028
0 - 60	- 0.452 **	- 0.363 **	- 0.772 **	0.220 **	0.176 *	- 0.475 **	0.183 *

**为 $P < 0.01$; *为 $P < 0.05$; $n = 181$ 。

4 结 论

(1) 研究时段内,华北落叶松林内土壤水势的时空差异极显著,依其时间动态可划分为土壤水分的相对湿润期(5月4日至5月21日)、持续消耗期(5月22日至9月7日)和快速恢复期(9月8日至11月1日);依据水分利用特征可将垂直土层划分为土壤水分的微弱利用层(0 - 20 cm)、利用层(20 - 60 cm)和水分调节层(60 cm 以下)。从 0 - 60 cm 整个生长季的水分平衡来看,在研究期间外部向 0 - 60 cm 土层输入水分,净输入量为 135.3 mm。

(2) 华北落叶松林内 0 - 60 cm 各土层土壤蓄水量受气象因子的综合调控,太阳辐射、大气温度、VPD 和液流通量均呈极显著负相关($P < 0.01$),对各因子进行多元逐步回归分析,可得到 0 - 60 cm 各土层土壤蓄水量与气象因子间的多元线性回归方程。

参考文献:

[1] 王新平,张志山,张景光,等. 荒漠植被影响土壤水文过程研究综述[J]. 中国沙漠,2005,25(2):196-201.

[2] 张玉宝,谢忠奎,王亚军,等. 黄土高原西部荒漠草原植被恢复的土壤水分管理研究[J]. 中国沙漠,2006,26(4):574-579.

[3] 郭明春. 六盘山叠叠沟小流域森林植被坡面水文影响的研究[D]. 北京:中国林业科学研究院,2005.

[4] 管伟. 六盘山北坡叠叠沟小流域华北落叶松生长及水分影响研究[D]. 北京:中国林业科学研究院,2007.

[5] 陈海滨,孙长忠,安锋,等. 黄土高原沟壑区林地土壤水分特征的研究(1):土壤水分的垂直变化和季节变化特征[J]. 西北林学院学报,2003,18(4):13-16.

[6] 余新晓,张建军,朱金兆,等. 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):289-296.

[7] 刘建立. 六盘山叠叠沟坡面生态水文过程与植被承载力研究[D]. 北京:中国林业科学研究院,2008.

[8] 黄志宏,周国逸,Morris J,等. 桉树人工林冠层气象因子对雨季土壤水分的影响[J]. 热带亚热带植物学报,2003,11(3):197-204.

[9] 刘苑秋,王红胜,郭圣茂,等. 江西省退化石灰岩红壤区重建森林土壤水分与降水量和蒸发量的关系[J]. 应用生态学报,2008,19(12):2588-2592.

[10] 黄志刚,曹云,欧阳志云,等. 南方红壤丘陵区油桐人工林土壤水分动态[J]. 应用生态学报,2007,18(2):241-246.

[11] Waring R H, McDowell N. Use of physiological process model with forestry yield tables to set limits on annual carbon balances [J]. Tree Physiologic, 2002,22:179-188.