

宁夏六盘山3种典型植物群落水分利用特征及其组分的季节变化

王云霓¹, 何聪², 熊伟¹, 王彦辉¹, 于澎涛¹, 童鸿强³

(1 中国林业科学研究院 森林生态环境与保护研究所 国家林业局森林生态环境重点实验室, 北京 100091; 2. 海南省林业厅信息中心, 海口 570203; 3. 江西省宜春市水利局, 江西 宜春 336000)

摘要:为深入认识干旱缺水地区水通量分配和植被类型变化对群落水分利用特征的影响,在宁夏六盘山叠叠沟小流域,利用热扩散技术、微型蒸渗仪、树干径向变化记录仪及文献资料等方法研究了三种典型植物群落的蒸腾(T_r)、蒸散(ET)和水分利用效率(WUE)及组成的季节变化。结果表明:生长季三种植物群落 ET(mm)为:华北落叶松林(429.7)>沙棘林(379.3)>草地(206.9),分别大于、约等于、小于同期的降雨量,均呈现低—高一低的月变化趋势。冠层蒸腾是蒸散的主要分量,生长季 T_r /ET 为:华北落叶松(48%)>沙棘(39%);华北落叶松林 T_r /ET 随季节持续降低,沙棘林 T_r /ET 随季节先升高后降低,最大为 50.4%。生长季 WUE(g/kg)为:草地(3.1)>华北落叶松林(2.7)>沙棘林(2.35)。其中,华北落叶松林 WUE 变化与其 T_r /ET 月变化相同,从 WUE 在林分各层的分布来看,乔木层 WUE 为 4.04 g/kg,草本层为 1.36 g/kg;沙棘林 WUE 表现为生长季前、中期较高而后期较低的变化趋势,其中灌木层 WUE 为 2.32 g/kg,草本层 WUE 为 2.37 g/kg;草地 WUE 在生长季前、中期均保持在 3.2~4.8 g/kg。研究表明:无论是在水分充足季节(生长季中期),还是水分有限季节(生长季初期和末期),植被不可能完全利用所有的降水,但水分利用特征存在种间差异。

关键词:蒸散;水分利用;组分;蒸腾与蒸散比;人工林;草地

中图分类号:S714.5

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2015)04-0034-07

The Water Use Characteristics of Three Representative Plant Communities and their Seasonal Variation in Liupan Mountains, Ningxia

WANG Yunni¹, HE Cong², XIONG Wei¹, WANG Yanhui¹, YU Pengtao¹, TONG Hongqiang³

(1. Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Key Laboratory of Forestry Ecology and Environment of State Forestry Administration, Beijing 100091, China; 2. Information Center, Hainan Forestry Department, Haikou 570203, China; 3. Yichun Water Conservancy Bureau, Yichun, Jiangxi 336000, China)

Abstract: To understand the characteristics of water use of vegetation and the relationship between water use and community structures in dryland, three typical types of vegetation including *Larix principis-rupprechtii* plantation, *Hippophae rhamnoides* plantation and natural grassland were selected to estimate the seasonal variations of transpiration (T_r), evapotranspiration (ET), water use efficiency (WUE) and their partitioning of vegetation by using thermal dissipation technique, micro lysimeter, dendrometer and document literature in the Diediegou catchment of Liupan Mountains, Ningxia. The results indicated that the ETs of three types of vegetation during the growing season arranged as: *L. principis-rupprechtii* forest (429.7) > *H. rhamnoides* forest (379.3) > grassland (206.9), respectively, greater than, almost equal to, less than the same period of rainfall. The total ETs of three types of vegetation showed a low-high-low seasonal trend. The T_r /ET ratios of two planted forests had remarkable difference with the order of *L. principis-rupprechtii* forest (48%) > *H. rhamnoides* forest (39%). The T_r /ET ratio of *H. rhamnoides* forest had the similar seasonal pattern with its ET, the highest was observed in September (50.4%), but the T_r /ET ratio of *L. principis-rupprechtii* forest decreased over time during the growing season. The order of the WUE of three types of vegetation during the growing season followed as: grassland (3.1 g/kg) > *L. principis-rupprechtii* planta-

tion (2.7 g/kg) > *H. rhamnoides* plantation (2.35 g/kg). The WUE of *L. principisrupprechtii* forest decreased over time during the growing season. The WUE of tree layer of *L. principisrupprechtii* forest was 4.04 g/kg, while that of herbaceous layer was only 1.36 g/kg. The WUE of *H. rhamnoides* forest showed a high value in the early and middle of growing season, but a low values in the later growing season. And WUE of the shrub layer was 2.32 g/kg, while it was 2.37 g/kg for herbaceous layer. WUE of the natural grassland ranged 3.2 ~ 4.8 g/kg from May to August, then decreased to 0 in September. It is implied that plants do not use all of the precipitation input not only in water-sufficient season (the early and late stage of the growing season), but also in water-limited season (the medium stage of the growing season), and also showed interspecific difference.

Keywords: evapotranspiration; water use; partitioning; T_r/ET ; plantation; grassland

水分利用效率(WUE)是耦合植物光合与水分生理过程的重要指标,是联系植被生态系统碳循环和水循环的关键因子,具有重要的生理学、生态学和 hydrology 意义^[1]。目前对植物 WUE 的研究已经做了系统地归纳和总结,并涉及到不同的研究尺度(叶片、单株、生态系统/林分)。文献分析表明:现有研究多是涉及叶片水平 WUE^[2-3],对生态系统尺度上研究相对较少,尚处于初始阶段,对 WUE 时空变异特征及机理的对比研究可能是未来研究的重点^[4]。目前对生态系统水平 WUE 的影响因素研究较多集中在土壤水分^[5-6]、饱和和气压差 VPD^[7-8]、二氧化碳浓度^[9]等,但由于生态系统 WUE 既受到控制植物群落蒸腾利用效率的生理生态过程的影响,也受到控制土壤蒸发与蒸腾相对比例的生物、物理过程的影响^[4],在土壤蒸发占整个林分蒸散比例较大的干旱半干旱地区,林分的水分平衡特征可能有着更重要的作用,植被蒸腾与蒸散比(T_r/ET)可用来反映能量收入在生态系统内部不同组分间的分配,是体现林分生存和生长状况的一个重要参数,定量研究 T_r/ET 对预测生态系统——特别是水分限制区的生态系统的生存、生产能力至关重要^[10]。研究表明, T_r/ET 因生态系统类型和研究的时间尺度而异^[11-14],一般表现为草地低于灌丛、低于森林的趋势^[15-18]。随着生态水文学的发展,越来越多的研究开始将蒸散区分为若干个组分以更好地揭示系统的水分利用特征及其环境变化响应机制^[19],由公式 $WUE = NPP/ET = NPP/T_r \times T_r/ET$, 式中 NPP 为初级净生产力,可知 T_r/ET 增加会促进 WUE 升高。Kato 等^[20]利用模型和实测数据分析了高粱地的 WUE 和 T_r/ET 的季节动态,发现当 LAI 小于 1.6 时, T_r/ET 随 LAI 的增加而增加,从而使生态系统 WUE 升高。总之,有关水通量分配变化或植被类型变化对群落 WUE 影响的研究仍然非常缺乏,因此深入分析不同植物群落的水通量组分及水分利用特征变化对预测生态系统——特别是水分限制区

生态系统的生存、生长和生产能力至关重要,同时其为基于地区土壤水分植被承载力的植被建设和水资源管理提供依据。

六盘山作为黄土高原的典型山地,为泾河、清水河、葫芦河等多条河流的源头,是黄河中游地区最重要的水源涵养林区,在区域水循环中具有一定的特殊性:该区森林植被种类多,结构复杂,不存在土壤干层等问题,而黄土高原其他地区以草地和草甸为主。故该研究区相对丰富的植被种类、不同结构特征的人工林等为定量研究植被类型对石质山区植物水分利用的影响提供了必要条件,也提供了研究石质山区植被水分利用特征的特殊条件。此外,六盘山处在我国半湿润区向半干旱区过渡的气候带上,是干旱缺水区,植被恢复的成功主要取决于自然降水及植被水分利用特征,而前者是自然因素不可控制,后者可在综合平衡地区生产、生活用水及植被恢复的蒸腾用水需求下人为选择蒸散耗水少、水分利用效率高的恢复植物群落。总之,六盘山独特的地理位置和生态功能在维持区域生态平衡和提供水源等方面具有重要作用,作为研究基地也具有很强的代表性。

本文以六盘山北侧叠叠沟小流域内的华北落叶松人工林(*Larix principis-rupprechtii* plantation)、沙棘人工林(*Hippophae rhamnoides* plantation)、草地等三种典型植物群落为研究对象,通过量化分析三种群落蒸散量和 WUE 的组分及其季节变化,以期更好地揭示群落水分利用特征及其动态变化,其结论不仅有助于认识植物群落的水分利用特征及其与群落结构之间的关系,也将为合理调控半干旱地区林水关系、构建稳定的森林植被建设和管理提供理论与技术依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于宁夏六盘山外围北段的叠叠沟小流域(106°4'55"—106°9'15"E,35°54'12"—35°58'33"N),是石质山区与黄土区的交界地带,面积为 25.4 km²,

海拔 1 975~2 615 m, 坡度多为 10°~30°。该地区属于典型的半干旱大陆性季风气候, 根据附近固原气象站近 30 a 的气象数据统计, 年均气温为 6~7℃, 无霜期约 130 d, 年均降水量 432±87.2 mm, 主要集中在 6—9 月份, 年潜在蒸散量 1 050±180.5 mm。叠叠沟小流域上游为黄土区段, 以农田和人工沙棘灌丛为主; 中下游主要是草地、灌木林, 以及少量乔木林, 包括华北落叶松及少量的北京杨 (*Populus × beijingensis*) 人工林等, 集中分布在水分条件相对较好的阴坡和坡脚、沟底处。土壤类型以灰褐土为主。

1.2 样地特征调查

在叠叠沟小流域中下游沿植物群落的分布设置样线, 调查物种组成及其群落结构特征。由于小流域内沙棘主要分布在海拔 2017±24 m, 所以在华北落叶松林、沙棘林和草地等三种主要植物群落分布的相近海拔高度上设置了 20 m×30 m 的固定观测样地(表 1), 以排除海拔高度的影响; 但由于华北落叶松只分布在水分条件较好的阴坡和坡脚, 而沙棘林分布在半阳坡, 故可能存在坡向的影响。于

2010 年 5—10 月底进行了样地调查海拔、坡度、坡向, 每木检尺记录胸径、树高、冠幅等; 在各样地内均匀设置 3~5 个 1 m×1 m 的草本小样方, 调查林下植被的优势种、覆盖度等。调查情况见表 1。华北落叶松林平均胸径为 10.3 cm, 树高为 9.8 m, 密度为 1 383 株/hm², 层次结构单一, 分为林冠层和林下草本层, 草本层种类主要有铁杆蒿 (*Artemisia vestita*)、芨蒿 (*Artemisia giraldii*)、白颖薹草 (*Carex rigescens*) 等。沙棘林密度为 850 株/hm², 基径为 6.9 cm, 树高为 2.4 m, 郁闭度为 0.5, 林下有耐荫的草本层发育, 盖度 80%, 主要以苔草 (*Carex gmelinii*)、铁杆蒿、芨蒿、山萝卜 (*Scabiosa comosa*) 等为主。草地群落组成较复杂, 样地内出现植物种 34 种, 主要有铁杆蒿、披针叶苔草 (*Carex lancifolia*)、芨蒿、本氏针茅 (*Stipa bungeana*)、黄芩 (*Scutellaria scordifolia*)、细叶亚菊 (*Achillea tenuifolia*)、蕨 (*Pteridium aquilinum*)、芨蒿、乳白香青 (*Anaphalis lactea*)、垂穗鹅冠草 (*Reegneria perperascens*)、甘青针茅 (*Stipa przewalskyi*)、苜蓿 (*Medicago falcate*)、山丹花 (*Lilium pumilum*) 等。

表 1 三种典型植被群落布设样地概况

植被类型	海拔/m	坡位	坡向	乔/灌木层				草本层	
				密度/(株·hm ⁻²)	胸径/cm	高/m	郁闭度	优势种	盖度/%
华北落叶松	2025	下	NW310°	1383	10.3	9.8	0.6	铁杆蒿	50
沙棘	2017	下	SE105°	850	6.9	2.4	0.5	苔草	80
草地	2017	下	SE106°	—	—	—	—	铁杆蒿	95

1.3 生产力的测定

在固定观测样地中, 依照径级分布选择标准木 7 棵, 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>) 来实时测定生长季标准木的胸径变化, 仪器的取样步长为 5 min, 数据用数据采集器收集 (DL2e, 英国剑桥)。然后根据生物量经验方程, 计算标准木的树干、枝、叶等生物量。详细介绍见文献^[21-22]。

依据样地的树木数量及面积计算样地及单位面积上的生物量。样地第 n 月的净初级生产力 NPP_n (t/hm²) 为样地第 n 月的生物量 W_n (t/hm²) 减去第 $n-1$ 月的生物量 W_{n-1} , 即:

$$NPP_n = W_n - W_{n-1} \quad (1)$$

草地样地和林下草本层的生物量是采用收割法测定, 每月在样地内随机选取 5 个 0.5 m×0.5 m 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单位面积的生物量, 生产力计算按照公式(1)计算。

1.4 蒸散量的测定

冠层蒸腾 (T_r , mm) 是利用 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和样树的边材面积上推得到的。在林内安装雨量筒测定林内降雨, 在样树上安装 PVC 管测定树干的茎流量, 林冠截留 (I , mm) 就等于林外降水量减去林内降水量和树干茎流量。草本和土壤的蒸散发 (T_s , mm) 是利用简易蒸渗仪测定的。计算公式为:

$$T_m = J_{n \cdot \text{mean}} \cdot A_{S-t} \quad (2)$$

$$ET_n = T_m + I_n + T_{sn} \quad (3)$$

式中: n ——月份; A_{S-t} ——单位面积上累积的边材面积 (cm²); $J_{n \cdot \text{mean}}$ ——整个林分所有测定样本 n 月的平均液流密度 (ml/min); ET_n ——林分 n 月的蒸腾量 (mm)。

2004 年、2008 年华北落叶松、沙棘和草本蒸散发分别引自文献郭明春^[23]、杜阿朋^[24]; 2010 年沙棘林蒸腾引自何聪等^[22]的研究。

1.5 水分利用特征指标的计算

基于三种植物群落的 NPP , T_r 、 ET 估计, 计算三种植物群落在生长季各时段的 T_r/ET 和 WUE , 进而研究这三种植物群落的 WUE 季节变化特征及其对群落类型和水通量变化的响应。公式如下:

$$WUE_n = NPP_n / ET_n \quad (4)$$

式中: WUE_n —— n 月水分利用效率(g/kg); NPP_n ——第 n 个月的生产力(t/hm^2); ET_n —— n 月蒸散(mm)。

1.6 土壤容重和蓄水量测定

在5—10月份,采用土钻法在三种不同群落样地测定0—10, 10—20, 20—40, 40—60, 60—80, 80—100 cm土层的质量含水量,每个样地3次重复,每周测定1次,雨后加测。土壤容重采用环刀法测定,分别在各层取样,每层3次重复。利用土壤容重、质量含水量和土层厚度的乘积换算得到土壤蓄水量。

1.7 数据处理

应用Excel和SPSS 18统计软件对数据进行处理,不同植物群落蒸散及其分量的对比进行方差分析(one-way ANOVA),采用最小显著差数法(LSD)进行差异显著性检验($\alpha=0.05$)。

2 结果与分析

2.1 三种典型植物群落的蒸散比较

3种植物群落总蒸散(mm)平均为:华北落叶松

表2 典型样地生长季内水量平衡及 T_r/ET 变化

年份	植被类型	降水/mm	截留/mm	土壤蓄水量变化/mm	蒸腾/mm	草本蒸散/mm	平衡项/mm	$T_r/ET/\%$
2004	华北落叶松	378	35.8	20.2	202.7	177.1	-57.9	48.8
	沙棘	378	66	-20.2	138.8	169.3	24.1	37.1
	草地	378	—	12.4	—	204.2	161.5	—
2008	华北落叶松	306	31.1	62.1	200.1	174.5	-161.8	49.3
	沙棘	306	24.4	40.8	122.8	154.6	-36.8	40.7
	草地	306	—	24.1	—	193.5	88.4	—
2010	华北落叶松	449.8	86.8	20.3	214.6	166.4	-38.3	45.9
	沙棘	449.8	40.9	59.1	182.4	238.6	-12.1	39.5
	草地	449.8	—	63.3	—	223	163.6	—

2.2 三种典型植被蒸散组分的季节变化

图1是三种典型植被蒸散及其组分的季节变化。总体来看,5月,6月份三种植被类型的样地ET都在增加,差别不明显,但华北落叶松林 T_r/ET 大于沙棘林(见图1和图2);沙棘林的月ET和 T_r/ET 自7月份后均超过华北落叶松林,除了植被结构特征外,可能还因为沙棘人工林地处于阳坡,具有较强的太阳辐射强度有关。生长季末期,三种植被类型的ET逐渐减少。华北落叶松林ET季节变化较平缓,5月ET(42.63 mm)最小、7月(101.3 mm)最高,但 T_r/ET 逐渐降低;5月ET耗水主要以蒸腾为主(53%),其次是林下草本层蒸散(29%);而6月林下草本层蒸散则是ET的最大分量(56%);7月因降水量的增加,冠层截留量、蒸腾量和草本蒸腾及土壤蒸发所占的比

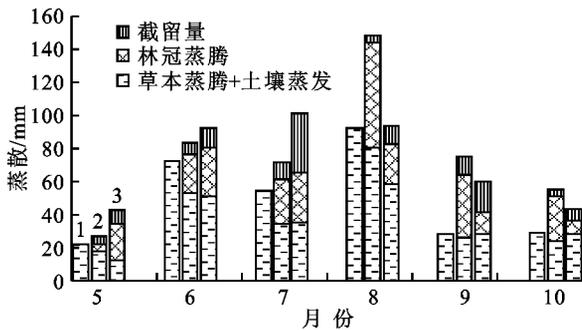
(429.7) > 沙棘(379.3) > 草地(206.9),具有显著性的差异($p < 0.01$),华北落叶松 T_r/ET 为48%,显著地大于沙棘林(39%)(表2);华北落叶松林总蒸散大于同期的降雨量,需要消耗外部的水分补给,可能来自深层土壤水或上坡水分的输入。黄辉等^[25]利用涡动相关对华北低山丘地人工林蒸散的研究也得到相同的结论。沙棘林蒸散量与同期降水量基本持平;而草地蒸散明显小于同期的降雨量,具有较强的产水能力,是向外输出水分。王幼奇等^[26]对黄土高原水蚀风蚀交错区的柠条、苜蓿和茵陈蒿研究认为,无论是灌木还是草地的蒸散均大于同期的降水量。对于华北落叶松林来说,各蒸散分量依次为林木蒸腾 > 林下草本蒸散 > 林冠截留;沙棘人工林各蒸散分量依次为林下草本蒸散 > 林冠蒸腾 > 林冠截留。本研究中,林下草本蒸散包括草本蒸腾、草本截留和土壤蒸发,由于没有分别测量以上三个分量,故不能确定其数值大小,但熊伟和王彦辉^[27-28]在距离叠叠沟林场约10 km的赵千户林场对华北落叶松和沙棘林蒸散及其分量的研究认为:林冠蒸腾是蒸散的最大分量,林下植被蒸散量大于土壤蒸发。说明乔、灌和草的植被蒸腾是水分消耗的主要组分。

例相差不大;8月ET的分配与6月极其相似但总量较多;9月和10月乔木层蒸腾量都有所降低,草本层和土壤层的蒸散占主要。沙棘林的ET在8月出现峰值(154.3 mm),而 T_r/ET 持续增大,直至9月份达到最大;前4个月(5~8月份)沙棘人工林的蒸散主要以地面和草本的蒸散为主(49%~67%),生长季末的两个月(9月,10月份)主要以沙棘蒸腾为主(50%,48%)。草地生长季的蒸散总量最小,起伏相对较小,最大值出现在8月份(92.3 mm)。

2.3 三种典型植被 WUE 的季节变化

图3是三种植被类型群落的水分利用效率的季节变化。总体来看,整个生长季群落水平的WUE(g/kg大小为:天然草地(3.1) > 华北落叶松林(2.7) > 沙棘林(2.35);三种植被WUE在生长季前、中期

较高,生长季后期较低的特征。在生长季初期(5月、6月),华北落叶松林 WUE 最大,天然草地次之,沙棘林最小。这可能与植被的物候差异有关,华北落叶松生长快速(见图 4),干、枝和叶在生长季生长较快;草地中各种草本植物返青生长速度较快,而沙棘生产力较低、蒸散高于草地,导致其 WUE 较小。7月份,水热条件较好,沙棘林进入生殖生长期,生产力较高,而华北落叶松经过快速生长后进入了相对缓慢的生长期,此时草本层有快速的生长,因而沙棘林 WUE 快速升高并达到了峰值 5.73 g/kg,且高于其他 2 种植被类型的 WUE。到了 8 月三种植被群落的生长都进入相对稳定期,其 WUE 均开始下降,天然草地仍有每月 3.74 g/kg 的效率。生长季末期(9月、10月),天然草地已经枯黄,沙棘和华北落叶松也开始落叶,但此时由于林下光照条件的改善,其草本植物还略有生长,因而华北落叶松林 WUE 有所提高,沙棘人工林仍保持着与 9 月份几乎同等的 WUE。



(1:草地;2:沙棘林;3:华北落叶松林)

图 1 三种典型植被群落蒸散及其组分的月变化

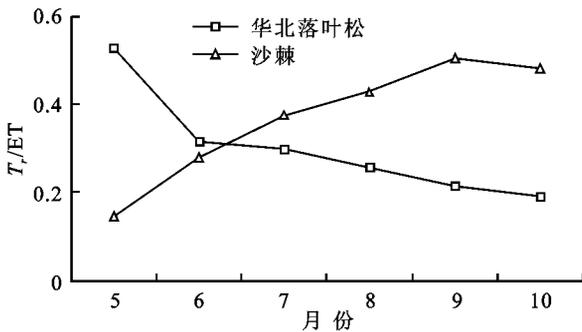


图 2 典型植被群落 T_r/ET 的月变化

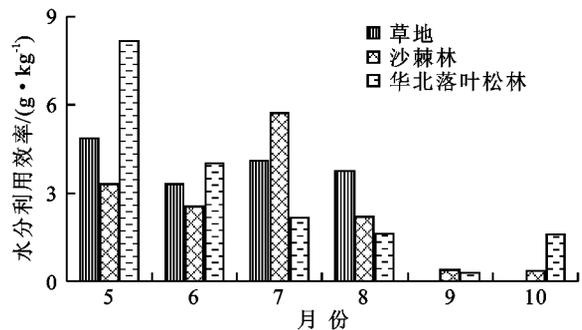


图 3 三种典型植被群落的水分利用效率的月变化

3 讨论

在本文中,2010 年沙棘林生长季 T_r/ET 约为 15%, T_r/ET 随季节先升高后降低,9 月达最大(50.4%);华北落叶松林生长季的 T_r/ET 为 29%,草本层蒸散量占总量(433.9 mm)的 49.5%,月 T_r/ET 为 19%~53%,且随季节持续降低。张淑兰等^[29]对泾河上游流域的 T_r/ET 研究认为,冠层蒸散在 5 月、6 月份最大,占月蒸散的 63%,在 11 月最小,占 2%左右;魏焕奇等^[30]基于遥感法的研究认为:千烟洲人工林植被年蒸腾占总蒸散量的 65%,植被蒸腾季节变化明显,1—3 月植被光合作用较弱, T_r/ET 比小于 30%,随着植被蒸腾的增强,从 4 月开始 T_r/ET 迅速增加,在生长旺季(7 月底)可达到约 90%;基于树干液流技术观测,千烟洲站 2003—2006 年 T_r/ET 约为 57%^[31];本文中沙棘林和华北落叶松林 T_r/ET 均低于江西千烟洲人工林的观测结果,这可能与植被的根系分布及可利用水总量有关,根系分布深、土壤渗透性好的植被,其 T_r/ET 要高于草地或土壤渗透性差的植被^[13,32-33]。王百田等^[34]在黄土高原对刺槐和苹果林 T_r/ET ,变化范围分别为 19%~63%和 21%~59%,本文研究结果与其类似。这可能与研究区均处在半干旱区有关,可利用的水分较少。在半干旱区,Raz-Yaseef 等^[10]对属半干旱气候地中海地区的针叶林研究认为,在月份和季节尺度上, T_r/ET 变化在 30%~60%,其季节变化与 T_r 不同; T_r/ET 的峰值出现在 5 月,并认为 T_r/ET 差异与根系分布层土壤含水量有关;Mitchell 等^[12]测定和评估了澳大利亚西南部半干旱区桉树林的蒸散及其组分,发现桉树林蒸腾量对总蒸散的贡献仅为 22%,而林地土壤蒸发贡献为 64%。以上研究说明,无论是水分充足的半湿润区,还是水分有限的干旱半干旱地区,植被不可能完全利用所有的降水。

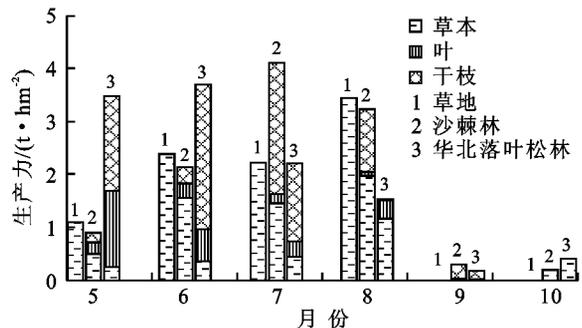


图 4 三种典型植被群落生产力及其组成的月变化

文中沙棘林 T_r/ET 与 WUE 均随季节先升高后降低,两者变化趋势基本一致, T_r/ET 值在 9 月达最大,而 WUE 在 7 月份达到最大;华北落叶松林

T_r/ET 与WUE季节变化趋势一致,均随季节持续降低。但华北落叶松林与沙棘林的 T_r/ET 季节变化趋势却相反,这可能与植物的物候特征、分布位置及降水季节分配格局有关。沙棘春季展叶相对华北落叶松较晚,而华北落叶松在研究区5月份已经枝繁叶茂,可减少土壤蒸发,加上此时雨季还没到来,无效耗水(林冠截持)也较少,所以5月,6月份华北落叶松林 T_r/ET 较高。研究区降水主要集中在7—9月,此时林冠截持量增多,林分蒸腾增大的幅度小于蒸散其他组分,但由于沙棘位于半阳坡,蒸腾量大于华北落叶松林, T_r/ET 也较高。

在整个生长季中,三种典型植被群落生长季的WUE为草地(3.06 g/kg) > 华北落叶松人工林(2.71 g/kg) > 沙棘人工林(2.35 g/kg)。这与前人的研究结论并不一致,胡中民等^[4]通过对已发表文献结果的比较发现:森林生态系统的WUE高于草地;Ponton等^[7]对分布在不同地区的花旗松林(Douglas-fir forest)、山杨(Aspen forest)和麦草(Wheatgrass)WUE研究表明:草地WUE远小于林地的,并认为造成WUE差异的主要原因是ET存在差异。Law等^[35]和卢玲等^[36]对不同生态系统WUE的研究也都表明:森林WUE大于草地的。这可能是研究区域位于干旱半干旱区,降水量较少;在干旱生境里,高WUE植物的干旱适应能力较强,而湿润环境中,低WUE植物对水分的摄取能力可能比高WUE植物更强^[37];在本研究中,华北落叶松林只分布于阴坡和半阴坡,灌木林分布于半阳坡和山脚、山谷等,阳坡、半阳坡均是草地。与华北落叶松林水分利用特征相比,沙棘人工林具有较低的WUE,这可能是因为沙棘林在干旱情况下抵御干旱的能力大于华北落叶松人工林,而华北落叶松人工林在水分充足情况下竞争优势度大于沙棘人工林。

4 结论

(1) 生长季三种植被蒸散量(ET, mm)为:华北落叶松林(429.7) > 沙棘林(379.3) > 天然草地(206.9),华北落叶松林ET大于同期的降雨量,需要消耗外部的水分补给;沙棘林ET与同期降水量基本持平;而草地ET明显小于同期的降雨量,具有较强的产水能力,可向外输出水分;三种植被ET均呈现低—高一低的月变化趋势。树冠蒸腾(T_r , mm)是蒸散的主要分量, T_r/ET 为:华北落叶松(48%) > 沙棘(39%);华北落叶松林 T_r/ET 随季节持续降低,为19%~53%,沙棘林 T_r/ET 随季节先升高后降低,最大为50.4%。以上研究说明,华北落叶松林需同期

降水以外的水分补给,在干旱缺水区植被恢复中要适当的减少乔灌木比例,以草本为主,提高干旱区的自然产水能力。

(2) 受林分结构的影响,群落WUE的季节变化具有显著的种间差异。生长季三种典型植被群落水分利用效率(WUE, g/kg)为:天然草地(3.1) > 华北落叶松林(2.7) > 沙棘林(2.35)。其中:5月华北落叶松林WUE最高,其变化与 T_r/ET 月变化相同,从WUE在林分各层的分布来看,乔木层WUE为4.04 g/kg,林下草本层为1.36 g/kg;沙棘林WUE表现为生长季前、中期较高而后期较低的变化趋势,其中灌木层WUE为2.32 g/kg,林下草本层WUE为2.37 g/kg;草地WUE在生长季前、中期均保持在3.2~4.8 g/kg,9月之后降低为0。

参考文献:

- [1] 李机密,黄儒珠,王健,等. 陆生植物水分利用效率[J]. 生态学杂志,2009,28(8):1655-1663.
- [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] 王云霓,熊伟,王彦辉,等. 六盘山主要树种叶片稳定性碳同位素组成的时空变化特征[J]. 水土保持研究,2012,19(3):42-47.
- [4] 胡中民,于贵瑞,王秋风,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.
- [5] Yu G R, Song X, Wang Q F, et al. Water-use efficiency of forest ecosystems in eastern China and its relations to climatic variables[J]. New Phytologist, 2008, 177(4):927-937.
- [6] Reichstein M, Tenhunen J D, Rouspard O, et al. Severe drought effects on ecosystem CO₂ and H₂O fluxes at three Mediterranean evergreen sites: revision of current hypotheses[J]. Global Change Biology, 2002, 8(10):999-1017.
- [7] Ponton S, Flanagan L B, Alstad K P, et al. Comparison of ecosystem water-use efficiency among Douglas-fir forest, aspen forest and grassland using eddy covariance and carbon isotope techniques[J]. Global Change Biology, 2006, 12(2):294-310.
- [8] Scanlon T M, Albertson J D. Canopy scale measurements of CO₂ and water vapor exchange along a precipitation gradient in southern Africa[J]. Global Change Biology, 2004, 10(3):329-341.
- [9] Hui D F, Luo Y Q, Cheng W X, et al. Canopy radiation and water-use efficiencies as affected by elevated [CO₂] [J]. Global Change Biology, 2001, 7(1):75-91.
- [10] Raz-Yaseef N, Yakir D, Schiller G, et al. Dynamics of evapotranspiration partitioning in a semi-arid forest as affected by temporal rainfall patterns[J]. Agricultural

- and Forest Meteorology, 2012, 157(15): 77-85.
- [11] Reynolds J F, Kemp P R, Tenhunen J D. Effects of long-term rainfall variability on evapotranspiration and soil water distribution in the Chihuahuan Desert: a modeling analysis[J]. *Plant Ecology*, 2000, 150(1/2): 145-159.
- [12] Mitchell P J, Veneklaas E, Lambers H, et al. Partitioning of evapotranspiration in a semi-arid eucalypt woodland in south-western Australia[J]. *Agriculture and Forest Meteorology*, 2009, 149(1): 25-37.
- [13] Cavanaugh M L, Kurc S A, Scott R L. Evapotranspiration partitioning in semiarid shrubland ecosystems: a two-site evaluation of soil moisture control on transpiration[J]. *Ecohydrology*, 2011, 4(5): 671-681.
- [14] Staudt K, Serafimovich A, Siebicke L, et al. Vertical structure of evapotranspiration at a forest site: A case study[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151(6): 709-729.
- [15] Kostner B. Evaporation and transpiration from forests in Central Europe-relevance of patch-level studies for spatial scaling [J]. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 2001, 76(1/2): 69-82.
- [16] Moran M S, Scott R L, Keefer T O, et al. Partitioning evapotranspiration in semiarid grassland and shrubland ecosystems using time series of soil surface temperature [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, 149(1): 59-72.
- [17] Raz-Yaseef N, Rotenberg E, Yakir D. Effects of spatial variations in soil evaporation caused by tree shading on water flux partitioning in a semi-arid pine forest[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2010, 150(3): 454-462.
- [18] Wang L X, Caylor K K, Villegas J C, et al. Partitioning evapotranspiration across gradients of woody plant cover: assessment of a stable isotope technique[J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37(9): L09401.
- [19] Huxman T E, Wilcox B P, Breshears D D, et al. Ecohydrological implications of woody plant encroachment [J]. *Ecology*, 2005, 86(2): 308-319.
- [20] Kato T, Kimura R, Kamichika M. Estimation of evapotranspiration, transpiration ratio and water-use efficiency from a sparse canopy using a compartment model[J]. *Agricultural Water Management*, 2004, 65(3): 173-191.
- [21] 何聪,熊伟,王彦辉,等. 六盘山北侧华北落叶松林分的水分利用效率研究[J]. *水土保持研究*, 2011, 18(5): 112-118, 123.
- [22] 何聪. 六盘山北侧叠叠沟小流域三种典型植被水分利用效率研究[D]. 南宁: 广西大学, 2011.
- [23] 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.
- [24] 杜阿朋. 六盘山叠叠沟小流域坡面植被水文影响与模拟[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2009.
- [25] 黄辉,孟平,张劲松,等. 华北低丘山地人工林蒸散的季节变化及环境影响要素[J]. *生态学报*, 2011, 31(13): 3569-3580.
- [26] 王幼奇,樊军,邵明安,等. 黄土高原水蚀风蚀交错区三种植被蒸散特征[J]. *生态学报*, 2009, 29(10): 5386-5394.
- [27] 熊伟. 六盘山北侧主要造林树种耗水特性研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2003.
- [28] 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[J]. *中国水土保持科学*, 2006, 4(4): 19-25.
- [29] 张淑兰,于澎涛,王彦辉,等. 泾河上游流域实际蒸散量及其各组分的估算[J]. *地理学报*, 2011, 66(3): 385-395.
- [30] 魏焕奇,何洪林,刘敏,等. 基于遥感的千烟洲人工林蒸散及其组分模拟研究[J]. *自然资源学报*, 2012, 27(5): 778-789.
- [31] 于贵瑞,孙晓敏. 中国陆地生态系统碳通量观测技术及时空变化特征[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [32] Laio F, Porporato A, Ridolfi L, et al. Plants in water-controlled ecosystems: active role in hydrologic processes and response to water stress: II. Probabilistic soil moisture dynamics[J]. *Advances in Water Resources*, 2001, 24: 707-723.
- [33] Kurc S A, Small E E. Dynamics of evapotranspiration in semiarid grassland and shrubland ecosystems during the summer monsoon season, central New Mexico[J]. *Water Resources Research*, 2004, 40(9): W09305.
- [34] 王百田,贺康宁,史常青,等. 节水抗旱造林[M]. 北京: 中国林业出版社, 2004.
- [35] Law B E, Falge E, Gu L H, et al. Environmental controls over carbon dioxide and water vapor exchange of terrestrial vegetation[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 113(1/4): 97-120.
- [36] 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.
- [37] 陈世苹,白永飞,韩兴国. 稳定性碳同位素技术在生态学研究中的应用[J]. *植物生态学报*, 2002, 26(5): 549-560.