

黄土高原水蚀风蚀交错区三种植被蒸散特征

王幼奇¹, 樊 军^{2,3}, 邵明安^{2,3,*}, 王全九³

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学水土保持研究所, 杨凌 712100;

3. 中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨凌 712100)

摘要: 利用称重式蒸渗仪结合 Penman-Monteith 公式研究了黄土高原水蚀风蚀交错区苜蓿、柠条和茵陈蒿 3 种植被不同时间尺度的蒸散特征, 分析了植被株高、盖度和降水等因子对蒸散的影响并确定了作物系数 (K_c)。结果表明: Logistic 三参数模型可以较好拟合 3 种植被株高、盖度随时间的变化情况并确定了模型的参数。3 种植被逐日蒸散变化受降水量的影响波动明显, 反映了土壤水分状况控制条件下的蒸散过程。其月蒸散量的季节性差异均不明显, 研究时段内总耗水量分别为苜蓿 316.8mm、柠条 317.7mm、茵陈蒿 361.9mm, 均高于同期降水量。苜蓿和茵陈蒿初期、中期和后期的 K_c 分别为 0.48、0.54、0.42 和 0.58、0.67、0.62, 柠条初期和中期的 K_c 为 0.45、0.57, 均高于当地典型农作物谷子的 K_c 。

关键词: 称重式蒸渗仪; 蒸散; 水蚀风蚀交错区; 植被; 作物系数

文章编号: 1000-0933(2009)10-5386-09 中图分类号: Q142, Q945, Q948 文献标识码: A

Evapotranspiration of three types of plants in water-wind erosion crisscross regions in the Loess Plateau

WANG You-Qi¹, FAN Jun^{2,3}, SHAO Ming-An^{2,3,*}, WANG Quan-Jiu³

1 College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2 The Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

3 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, the Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and the Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(10): 5386 ~ 5394.

Abstract: In this study, lysimeters were used to measure evapotranspiration (ET) of Alfalfa, Caragana, and *Artemisia capillaries* in water-wind erosion crisscross regions in the Loess Plateau. The measured ET and Penman-Monteith equation were used to determine crop coefficient (K_c), and the effects of vegetation height and coverage and precipitation on the ET were analyzed. The results show that the Logistic model can be used accurately to simulate the changes of the height and coverage of the three types of vegetation. The daily ET variations of these three types of vegetation were significantly affected by precipitation, indicating that evapotranspiration processes were controlled by the soil water content in the arid region. There was no meaningful difference in the monthly ET among the three types of vegetations. The total ET of Alfalfa, Caragana and *Artemisia capillaries* were 316.8mm, 317.7mm and 361.9mm, respectively. The crop coefficients of Alfalfa in initial, middle and end growing periods were 0.48, 0.54, and 0.42 respectively. The crop coefficients of *Artemisia capillaries* in initial, middle and end growing periods were 0.58, 0.67 and 0.62 respectively. Crop coefficients of Caragana in initial and middle growing periods were 0.45 and 0.57 respectively and those values are higher than that of local typical food crop.

基金项目: 中国科学院西部之光资助项目(2005YB01); 国家自然科学基金资助项目(40601041); 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室专项资助项目

收稿日期: 2008-11-10; 修订日期: 2009-01-21

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: mashao@ms.iswc.ac.cn

Key Words: lysimeter; evapotranspiration; water-wind erosion crisscross region; vegetation; crop coefficient

黄土高原水蚀风蚀交错区干旱缺水、土壤水分含量低导致土壤沙化、水土流失,这严重影响和制约该区域经济和社会的可持续发展。研究表明,适度退耕还林还草是减少水土流失的有效生物措施之一^[1]。多年来我国在黄土高原开展了大面积的植树种草工作^[2,3],然而林草成活率低、土壤水分大量消耗的问题突出^[4],这反映出对于黄土高原地区土壤水分动态变化和林草生态需水规律的了解不够深入。典型植被蒸散耗水量的确定对于黄土高原水蚀风蚀交错区人工植被建设和管理具有重要作用,其涉及到土壤水分的合理承载力,对于该区利用有限水土资源、促进该地区土壤水分生态环境的健康持续发展有着重要作用。

紫花苜蓿(*Medicago sativa*)和柠条(*Caragana korshinskii*)2种植被是黄土高原水蚀风蚀交错区比较典型的草地、灌木,在水土保持和防风固沙工程建设中得到了广泛应用^[5,6]。茵陈蒿(*Artemisia capillaris*)是黄土高原退耕地自然恢复进程中前期的优势植物种群^[7]。刘孝利等^[8]对黄土高原半干旱地区多年生紫花苜蓿、多年生沙打旺、2年生草木樨和自然撂荒地的耗水量进行比较,经过3a研究发现其中紫花苜蓿是耗水最严重的牧草。赵姚阳等^[9]研究表明,黄土丘陵区苜蓿地0~300cm土层含水率的平均值为15.8%,并推断苜蓿的耗水深度在500cm左右。李玉山^[10]针对苜蓿草地土壤水分严重亏缺的问题进行了深入的研究,认为多年连续种植苜蓿会导致土壤干化,土壤干层出现在200cm土层以下。郭忠升等^[11]分析了多年生柠条林地土壤水分补给和消耗情况。夏永秋等^[12]研究发现黄土高原干旱区柠条树木液流与太阳辐射、大气温度、相对湿度、水汽压亏缺、作物参考蒸散均显著相关,且可用太阳辐射的线性表达式来计算。由于以往相关研究多集中在土壤水分方面,从土壤水分的动态变化中间接计算出植被的耗水量。同时只有少量学者针对不同植被开展过相应的研究工作^[13,14]。而精度较高的称重式蒸渗仪一般使用在农作物的蒸散耗水研究上^[15~17]。本研究利用称重式蒸渗仪对神木六道沟流域苜蓿、柠条和茵陈蒿3种植被的蒸散耗水过程进行研究,其目的在于通过对该地区典型植被耗水特征的分析,为今后该地区生态恢复过程中植被的选择和抚育管理提供基础理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区介绍

本研究在中国科学院水利部水土保持研究所神木侵蚀与环境试验站进行,该试验区位于陕西省神木县以西14km处的六道沟流域,海拔1094~1274m。多年平均降水量为437.4mm。年均气温8.4℃,≥10℃积温为3248.0℃,全年日照时数2836h。地带性土壤为黑垆土,由于长期强烈侵蚀,已被绵沙土、新黄土、红土以及在沙地上发育起来的风沙土、坝地淤土取代,属半湿润区。

在调查神木六道沟流域天然和人工植被状况的前提下,选择了苜蓿、柠条和茵陈蒿3种植被作为研究对象,分别代表该区典型的草地、灌木地和退耕自然恢复地。试验小区规格为:长20m×宽10m。土壤类型均为黄绵土,小区地势平坦。研究时段为2007年4月到9月底,其中苜蓿在2006年8月种植,并于2007年8月进行刈割,柠条在2008年4月中旬移栽。苜蓿和柠条的种植密度是根据神木六道沟流域自然植被状况确定,即苜蓿行距25cm,柠条的株距和行距为50cm。茵陈蒿是退耕1a后自然恢复。其中蒸渗仪中苜蓿和茵陈蒿的密度和小区一致。柠条根据50cm的株距和行距在蒸渗仪中种植4株,在研究时段内与小区的种植密度保持一致。

表1 2007年神木站4~9月份气候条件

Table 1 The climate condition of Shenmu from April to September in 2007

项目 Item	4月 April	5月 May	6月 June	7月 July	8月 August	9月 September
平均温度 Average temperature(℃)	10.4	18.3	21.9	22.7	22.6	16.6
相对湿度 Relative Humidity(%)	30.1	29.0	50.0	59.2	56.8	58.3
太阳辐射 Solar radiation(MJ/m ²)	21.0	23.4	19.8	19.0	18.9	17.3
风速 Wind speed(m/s)	3.7	3.9	2.9	2.4	2.4	2.3
降水量 Precipitation(mm)	16.2	42.0	44.9	55.1	97.9	45.8

1.2 研究方法

1.2.1 实际蒸散量的测定

称重式蒸渗仪主体是一个高 1.2m、直径 1.4m 的封底的钢制圆柱体,在钢制圆柱体底部留有一个小孔以便于土壤水分的渗漏。为了保持其自然状态,按照 1.4g/cm³ 容重逐层回填土壤至上边缘 3cm 左右。钢制圆柱体上端高于地表 3cm 左右,以防降水过程中钢制圆柱体内外地表水的交流。在钢制圆柱体的底部利用 3 个压力传感器测定土体的重量变化,压力传感器连接到 CR1000 (Campbellsci, Logan, UT) 数据采集器上进行自动测量。本试验中根据软件设置,记录每小时蒸渗仪的重量变化,然后利用前后两次读数差,计算得到实际蒸散量。

1.2.2 参考作物蒸散量 (ET_0)

利用 FAO-56 推荐的 Penman-Monteith 公式作为参考作物蒸散量的标准计算公式^[18],Penman-Monteith 公式如下:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (1)$$

式中, ET_0 为参考作物蒸散量,mm; R_n 为冠层表面净辐射量,MJ/(m²·d); G 为土壤热通量,MJ/(m²·d); r 为湿度计常数,kPa/°C; Δ 为饱和水气压与温度关系曲线的斜率,kPa/°C; T 为空气平均温度,°C; u_2 为距地面 2m 处的风速,m/s; e_s 空气饱和水气压,kPa; e_a 为空气实际水气压,kPa。

1.2.3 植物生长指标

考虑到 3 种植被的种植方式、种植时间和生理特性不同,因此本研究中每隔 7d 左右对 3 种植被的株高和盖度进行观测。观测时间为 4 月中旬到 9 月底,其中苜蓿株高和盖度观测到 8 月 18 号刈割。株高利用刚卷尺测定,盖度利用数码相机垂直拍摄,然后利用专业图层处理软件 ImageJ 1.36b 处理照片,从而得出植被的盖度值。观测中发现 3 种植被植株个体差异较大,因此加大了观测的重复次数,每次测定重复 10 次。处理数码相机照片获得盖度值时,图层处理软件所有参数均一致。

1.2.4 气象要素

全自动气象站设在苜蓿地小区,每小时记录 1 次空气温度与湿度 (Vaisala HMP45A;150cm)、太阳辐射 (Kipp&Zonen CNR-1;175cm) 与风速 (Young 03001;200cm),降水量利用标准雨量桶测量。

1.3 数据处理

3 种植被株高、盖度的变化规律利用生长曲线模型拟合,本研究选用了 Logistic 3 参数模型。其公式为:

$$y = \frac{a}{1 + b \exp(-cx)} \quad (2)$$

式中, x 表示播种的天数, y 分别代表株高和盖度值, a 、 b 、 c 分别为模型参数。

利用参考作物蒸散量和实际蒸散量计算得到 3 种植被的作物系数 (K_c),计算公式为:

$$K_c = ET_c / ET_0 \quad (3)$$

式中, ET_c 代表实际蒸散量,mm。数据处理分析、图表制作利用 Office Excel 2003 及 SPSS13.0 统计软件。

2 结果与分析

2.1 植被株高和盖度变化

植被蒸散耗水受到植被生理特征和外部环境的影响,因此分析植被不同时期的生长状况是蒸散研究的重要内容之一。图 1 描述了 3 种植被的株高和盖度的变化,从图中可以看出 3 种植被株高和盖度呈“慢-快-慢”变化规律。在 4、5 月份植被处于生长初期,而同期神木六道沟流域气温低、干旱少雨。因此植被株高和盖度的变化比较小、曲线较平缓。6 月份气温逐渐升高,雨季来临,形成了雨热同期的情况,植被在这种高温高湿的气候状况下迅速增长,株高和盖度变化较大、曲线陡直。9 月份之后植株成熟,曲线呈平缓趋势。

在同样的气象和环境条件下,3 种植被生理特性不同,表现出不同的生长状况。茵陈蒿进入 9 月份株高

基本不变、盖度呈现出缓慢下降的趋势,其原因在于茵陈蒿属一年生植物,9 月份初进入成熟期后株高保持不变。其成熟后会出现枯萎的情况,因此盖度呈现出缓慢下降的现象。柠条是多年生植物株高、盖度的变化没有出现明显减缓的趋势。从误差线可以看出,重复测定的柠条株高之间存在较大差异,其原因可能是柠条利用幼苗移栽的方式种植,在移栽柠条幼苗时各个幼苗的生长状况不一样,因此柠条进入生长期后个体间出现了较大差异。

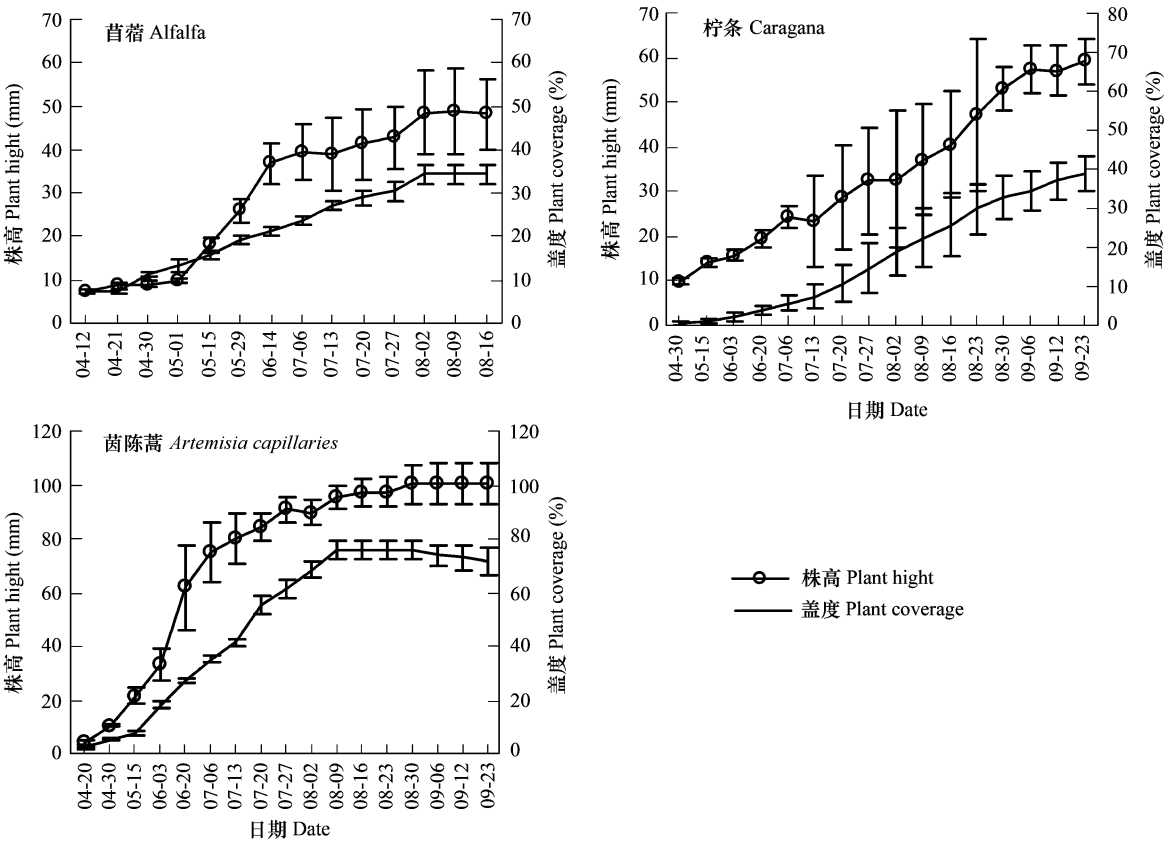


图 1 3 种植被株高和盖度变化
Fig. 1 Change of height and coverage in three vegetations

利用公式(2)对3种植被株高、盖度变化曲线进行拟合。表2给出了拟合参数并对拟合值进行了相关系数和标准误的数据分析。柠条株高、盖度的拟合值和实测值的相关系数分别为0.98、0.93,标准误为3.24、5.39,Logistic模型对柠条株高、盖度的拟合效果不如苜蓿和茵陈蒿。原因在于柠条是多年生植物,进入9月其盖度、株高没有呈显减缓的趋势。3种植被株高、盖度拟合的相关系数在0.93~0.99,标准误处于2.04~5.39之间,说明3种植被株高、盖度的变化值与拟合值之间存在很好的相关性且差异性很小。即利用Logistic

表 2 株高和盖度 Logistic 曲线的拟合参数
Table 2 Parameters of three vegetations height and coverage by Logistic curve

		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>R</i>	标准误 Standard error
苜蓿 Alfalfa	株高 Height	48.44	8.16	0.04	0.99	2.95
	盖度 Coverage	38.91	5.03	0.03	0.98	2.56
柠条 Caragana	株高 Height	165.96	17.83	0.02	0.98	3.24
	盖度 Coverage	43.95	101.55	0.05	0.93	5.39
茵陈蒿 Artemisia capillaries	株高 Height	101.45	14.90	0.05	0.99	2.04
	盖度 Coverage	78.84	55.66	0.05	0.99	4.33

曲线描述 3 种植被株高、盖度变化是可行的,且通过这些参数可以较为准确的模拟 3 种植被株高、盖度随时间的变化情况。

2.2 不同植被实际蒸散量变化规律

2.2.1 日实际蒸散量变化规律

利用称重式蒸渗仪测定苜蓿、柠条和茵陈蒿 3 种植被 5 月下旬到 9 月底逐日蒸散量的变化过程,从图 2 可以看出 3 种植被蒸散量随时间变化明显。对日蒸散曲线上峰值点和降雨过程的比较,发现每次降雨或连续阴雨天后一定时段内均相应出现一个蒸散峰值,随后蒸散量逐渐减少,直到下一次降水这种情况再次重复。例如 6 月 25 日蒸散峰值点是在 6 月中旬连续 7d 阴雨之后出现。降雨后土壤含水量增加,相应的土壤蒸发和植物蒸腾也明显增加。因此逐日蒸散量的波动反映了受降水控制下的蒸散特征。另外从分布图上看出神木六道沟流域 3 种植被蒸散量日变化过程的最大差别在 5 月底到 7 月初这一时段,从 5 月底到 6 月初这一时段茵陈蒿的蒸散量明显低于苜蓿和柠条。其原因在于茵陈蒿在 5 月下旬开始萌发生长,其耗水量相对较小。而苜蓿、柠条此时已处于旺盛生长期(图 1)。而从 6 月中旬到 7 月初这一时段,茵陈蒿进入快速生长期其蒸散耗水量明显高于苜蓿和柠条。

以上分析说明在神木六道沟流域植被蒸散耗水不仅和太阳辐射、气温等气象因子有关,同时与土壤水分状况有着明显的关系。神木六道沟流域年均降水量在 400mm 左右,植被处于间歇性的水分亏缺状态,所以每

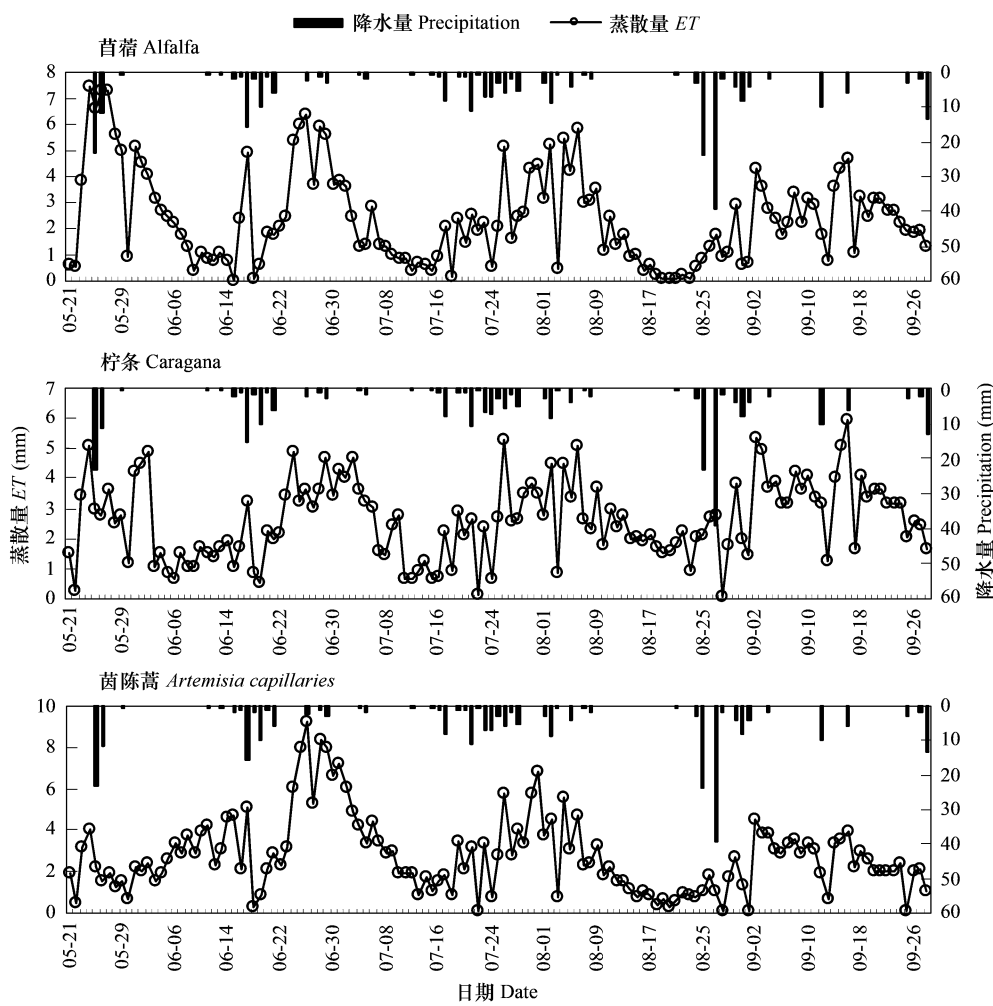


图 2 3 种植被日蒸散量变化
Fig. 2 Daily evapotranspiration of three vegetations

次降水后水分渗入到土壤中,这不仅改善了植被根系层的水分条件同时增加了土壤表层含水量。即降水后植被的蒸腾耗水和土壤蒸发同时增加,这时作物蒸腾和土壤蒸发的主导因子为大气蒸发力。随着土壤水分的减少,植被通过自身的生理调节从而使气象条件的影响减弱,土壤水分条件成为影响蒸散的主要限制因子。

2.2.2 月实际蒸散量和参考作物蒸散量变化规律

蒸渗仪从5月21号开始连续测定植被的蒸散量,3种植被的月蒸散量从6月开始统计。图3给出了苜蓿、柠条和茵陈蒿3种植被的月蒸散量和 ET_0 的月值分布。苜蓿6月份总蒸散量为79.9mm,是蒸散量最高的月份,7月、8月稍微减少分别为59.8mm、54.6mm。而在9月份苜蓿的蒸散量又升高达到72.2mm。这是由于在8月底苜蓿刈割后,到9月苜蓿又处于生长期。柠条6月份总蒸散量为68.8mm,7月份为74.1mm、8月份为74.9mm、9月份为95.2mm,呈逐渐增长的趋势。结合图1柠条株高和盖度的变化可以看出柠条到9月份一直在生长,因此柠条的蒸散量呈现出一直增长的趋势。

茵陈蒿6月份总蒸散量为116.6mm,7月份总蒸散量为97.7mm,8月份总蒸散量为55.5mm,9月份总蒸散量为71.2mm。茵陈蒿在神木六道沟流域属于自然的植被群落,其在6月份进入生长的旺盛期,9月即进入成熟期。结合图1看3种植被株高、盖度变化,可知7、8月份3种植被的生长速度都处在高峰期,但从月蒸散量变化图看出7、8月份3种植被蒸散量均不是最高的,这可能由于7、8月份六道沟流域的降水量和降水频率较高、空气湿度较大、日照偏少,大气蒸发力较低所致。利用公式(1)计算了神木六道沟流域 ET_0 。6月份 ET_0 值最高达到169.2mm,而7月、8月份的 ET_0 分别为151.1mm、147.3mm。即神木六道沟流域6月份的大气蒸发力高于7月和8月份,因此3种植被月蒸散量的最高值未出现在温度和湿度条件较好的7月份、8月份。

2.2.3 累积 ET_0 和累积蒸散量变化规律

图4描述了 ET_0 和3种植被蒸散量累积值随时间的变化情况。从图中可以看出,茵陈蒿在进入7月初后累积蒸散量高于苜蓿、柠条,而苜蓿和柠条的累积蒸散量的变化很接近几乎重合,原因是由于苜蓿和柠条的阶段性耗水量差异不大,而且研究时段内累积蒸散量十分接近。从5月21日到9月28日苜蓿、柠条的累积蒸散量别为316.8mm、317.7mm仅相差0.9mm,茵陈蒿的累积蒸散量为361.9mm。这一时段内六道沟流域的降水量为272.8mm,苜蓿、柠条和茵陈蒿的蒸散量均大于降水量,超出的部分来自于对土壤储水的吸收利用。

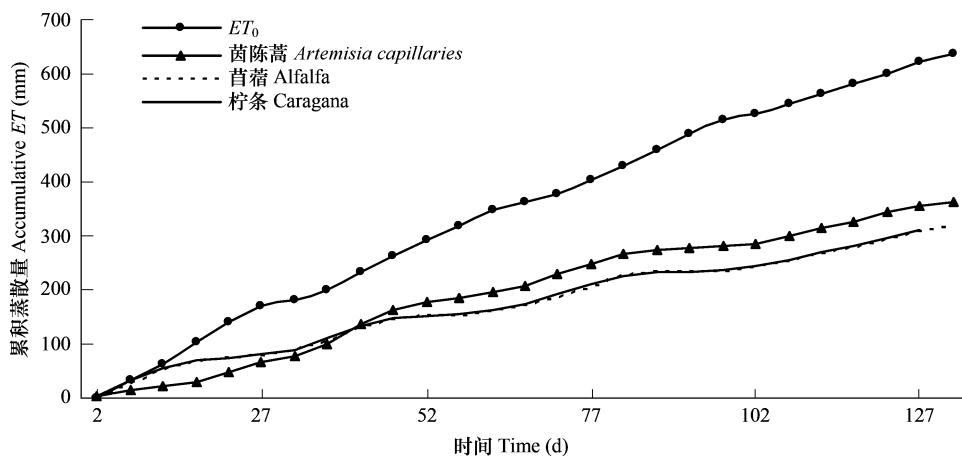


图4 参考作物蒸散量和3种植被累积蒸散量分布图

Fig. 4 The cumulative distribution diagram of ET_0 and three vegetation ET

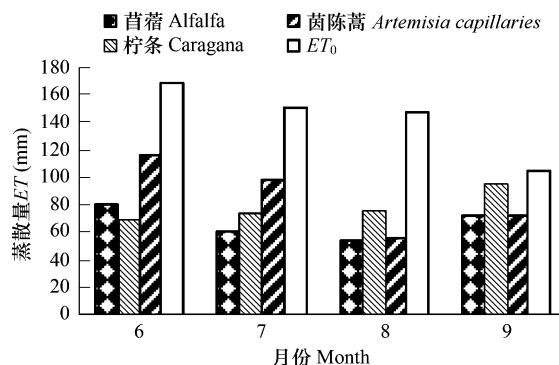


图3 3种植被月蒸散量变化

Fig. 3 Monthly Evapotranspiration of three vegetations

ET_0 的累积量为 636.2mm, 高于 3 种植被的累积蒸散量。这说明气象因素并不是影响神木六道沟流域植被蒸散能力的唯一要素, 结合 3 种植被日蒸散变化过程可以看出土壤水分状况对于植被的蒸散有着控制作用。在考虑气象因子的基础上结合土壤水分变化可以更为清晰的了解黄土高原水蚀风蚀交错区植被蒸散特征。

2.3 作物系数 (Crop coefficient) K_c 计算

植被耗水量的估算对于制定合理的灌溉制度、有效利用和管理水资源等方面有着非常重要的作用。植被耗水量的估算方法很多如蒸渗仪法、涡度相关都可以比较精确测定植被耗水量, 而这些方法对试验设备的操作和管理有着严格的要求, 因此不能被广泛利用。目前, 最常用的方法是利用 K_c 和 ET_0 确定植被耗水量, 对于某一地区不同植被耗水量确定的关键就在于确定各种植被的 K_c 。同时 K_c 也可以反映植物本身的生物学特性、产量水平以及外界环境等对植被蒸散的影响^[19,20]。联合国粮农组织 (FAO) 给出了一些植被的 K_c , 并明确提出需要根据当地气候情况确定各种植物的 K_c 。本研究根据 FAO 推荐的分段式 K_c 的计算方法, 利用公式 (1)、(3) 分别计算苜蓿、柠条和茵陈蒿 3 种植被初期作物系数 (K_{Cini})、中期作物系数 (K_{Cmid}) 和后期作物系数 (K_{Cend})。由于在研究期柠条未达到成熟期, 所以只计算了 K_{Cini} 和 K_{Cmid} 。苜蓿和茵陈蒿初期、中期和后期的 K_c 分别为 0.48、0.54、0.42 和 0.58、0.67、0.62。柠条初期和中期的 K_c 为 0.45、0.57。 K_c 的获得为估算神木六道沟流域苜蓿、柠条和茵陈蒿的实际耗水量提供了便捷的途径。

FAO 提供的苜蓿和柠条初期、中期和后期的 K_c 分别为 0.4、0.95、0.9 和 0.3、1.05、0.5^[18]。从数值上可以看出, FAO 提供的 K_c 和根据实测数据计算的苜蓿和柠条的 K_c 存在差异。因此, 利用植被实际蒸散量和参考作物蒸散量计算出黄土高原水蚀风蚀交错区 3 种典型植被的 K_c 是非常必要的。同期测定的当地典型农作物谷子 (*Setaria italica*) 初期、中期和后期的 K_c 分别为 0.23、0.43 和 0.24, 比苜蓿、柠条和茵陈蒿 3 种植被 K_c 要小。这说明谷子在整个生育期的耗水量要少于 3 种自然植被。原因在于谷子生长期要比自然植被短, 农作物的种植密度要比 3 种自然植被小。同时苜蓿和柠条进入生长旺季后, 它们的根系比农作物要发达, 因此自然植被会消耗更多的土壤水分。

3 结论与讨论

(1) 神木六道沟流域苜蓿、柠条和茵陈蒿 3 种植被的株高和盖度呈“慢—快—慢”变化规律。即生长初期由于植被的生理特征和气候因素的影响植被生长比较缓慢, 在 7、8 月份植被的生长速度快曲线斜率大, 进入 9 月份植被的生长速度趋缓。在此基础上, 利用广泛应用于生物生长过程描述的 Logistic 模型对

3 种植被株高和盖度随时间的变化进行了拟合, 确定了 3 种植被株高和盖度的模型参数。

(2) 苜蓿、柠条和茵陈蒿 3 种植被的日蒸散量受外界因素影响明显, 每次降雨或连续阴雨后一定时段内均相应出现一个蒸散峰值, 然后蒸散量逐渐减少, 直到下一次降水这种情况再次重复。这与甘卓亭等^[16]研究黄土塬区麦田日蒸散变化具有相似的特点。这说明类似神木六道沟流域这种半湿润地区植被蒸散耗水不仅和能量有关, 土壤水分状况对植被的蒸散具有显著影响。3 种植被的蒸散耗水量分别为苜蓿 316.8mm、柠条 317.7mm、茵陈蒿 361.9mm。其中茵陈蒿属于自然恢复地, 但蒸散耗水量在 3 种植被中最高。原因可能是 1a 的退耕地土壤中的养分充足、水分也得到了恢复和储存, 茵陈蒿属于 1 年生植物, 在水分养分充足条件下, 其生长在年内即可达到很高的生物量, 因此蒸散耗水量最高。神木六道沟流域 3 种植被的实际蒸散量均大于同期降水量, 超出的部分来自于对土壤储水的吸收利用, 而长期过度利用土壤储水可能会导致土壤干化。特别是苜蓿和柠条两种植物, 其生物量峰值在黄土高原往往出现在 2~5a 间。因此, 在人工植被建设过程中应该在保证植被生态功能充分发挥的基础上, 降低植被种植密度, 这样可以避免土壤水分过度消耗, 实现植被群落的生态和经济效益。

通过研究 3 种植被不同时间尺度的蒸散特征和 ET_0 的变化特征, 可以看出土壤水分状况对于植被的蒸散

表 5 3 种植被不同时期的 K_c

	K_{Cini}	K_{Cmid}	K_{Cend}
苜蓿 Alfalfa	0.48	0.54	0.42
柠条 Caragana	0.45	0.57	—
茵陈蒿 <i>Artemisia capillaries</i>	0.58	0.67	0.62

有着控制作用,同时植被耗水过程与同期降水量分布也存在明显的相关性。所以在研究黄土高原水蚀风蚀交错区植被蒸散耗水规律时应该充分考虑到土壤水分变化,即在考虑气象因子的基础上结合土壤水分变化可以更为清晰的了解黄土高原水蚀风蚀交错区植被蒸散特征。以往的研究表明,黄土区有些人工植被会使土壤形成干层^[6,10],因此确定该区典型植被的耗水量和耗水规律,对于防止土壤干层的形成、有效配置植被和合理利用有限水资源具有重要作用。

(3)根据 FAO 推荐的方法,利用参考作物蒸散量和蒸渗仪测定的 3 种植被实际耗水量,初步确定了 3 种植被的 K_c 。苜蓿和茵陈蒿初期、中期和后期的 K_c 分别为 0.48、0.54、0.42 和 0.58、0.67、0.62。柠条初期和中期的 K_c 为 0.45、0.57。由于苜蓿和柠条都属多年生植物,因此需要更长时间的定位试验数据来对以上的 K_c 进行修订和验证。从计算出的 3 种植被的 K_c 可以看出,气象条件、植被种类和生长期的不同对 K_c 存在明显影响。因此有必要针对不同地区的不同植被计算出相应的 K_c 。目前, K_c 的计算和研究主要是针对农作物,对于自然植被的 K_c 研究较少,这给确定某一地区自然植被耗水量和耗水特征带来困难。特别是像黄土高原这种需要通过大量种植人工植被来改善和恢复当地生态环境的地区,确定当地典型植被的 K_c ,获得不同植被的耗水量和耗水规律,可以为今后该地区生态恢复过程中植被的选择和抚育管理提供基础理论依据,即利用当地植被的 K_c 和 ET_0 计算出植被耗水量,结合当地的气象条件选择耗水量适宜的植被进行人工植被建设。

References:

- [1] Hu J Z, Zhu J Z. Tactics of vegetation restoration and reconstruction for degraded ecosystem in the Loess Plateau. Journal of Beijing Forestry University (Social Sciences), 2005, 4 (1): 13 — 19.
- [2] Guo Z S, Shao M A. Soil water carrying capacity of vegetation and soil desiccation in artificial forestry and grassland in semi-arid regions of the Loess Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23 (8): 1640 — 1647.
- [3] Wu Q S, Yang W Z. Vegetation construction and sustainable development for the Loess Plateau. Beijing: Scientific Press, 1998. 156 — 188.
- [4] Shen Y C. Consideration and actions for ecology construction in the Loess Plateau. Nature, 2005, 15 — 19.
- [5] Li H B, Gao Y Y, Zhang J W, Liu C H, Yu Y C, Hui L F. Summary of researching on the dynamic regulation of water consumption of alfalfa. Journal of Agro-Environment Science, 2006, 24 (6): 163 — 167.
- [6] Cheng J M, Wan H E, Wan J, Yong S P. Growth of Caragana korshinskii and depletion process of soil water in semi-Arid region. Scientia Silvae Sinicae, 2005, 41 (2): 37 — 41.
- [7] Hou F J, Xiao J Y, Nan Z B. Eco-restoration of abandoned farmland in the Loess Plateau. Chin J Appl Ecol, 2002, 13 (8): 923 — 929.
- [8] Liu X L, Li F M, Zeng Z X, Chen Q W. Comparisons of water use efficiency under different conversion models of cropland to grassland in the Loess Plateau of China. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27 (7): 2847 — 2855.
- [9] Zhao Y Y, Liu W Z, Pu L J. Effect of alfalfa growth on soil water environment in hill-gully area of the Loess Plateau. Journal of Natural Resources, 2005, 20 (1): 85 — 91.
- [10] Li Y S. Productivity dynamic of alfalfa and its effects on water Eco-environment. Acta Pedologica Sinica, 2002, 39 (3): 404 — 411.
- [11] Guo Z S, Shao M A. Dynamics of soil water supply and consumption in artificial Caragana shrub land. Journal of Soil and Water Conservation, 2007, 21 (2): 119 — 123.
- [12] Xia Y Q, Shao M A. The sap flow dynamics of Caragana korshinskii and the influence of environmental factors in semi-arid region of the Loess Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28 (4): 1376 — 1382.
- [13] Zhang J Y, Fu D, Wei Z Z, Zhao H L, Zhang T H. Determination of the ability of several tree and shrub species to endure and survive extreme aridity with methods of limited areas under field condition in Horqin Sandy Land. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26 (2): 467 — 474.
- [14] A l M S, Jiang D M. Characteristics of soil water consumption of two typical shrub and arbor in Horqin sandy land. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28 (5): 1981 — 1989.
- [15] Wang X Y. Study of the measuring methods for evapotranspiration in farmland. System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture, 2004, 20 (1): 27 — 30.
- [16] Gan Z T, Liu W Z, et al. Evapotranspiration of winter wheat field on Loess Plateau tableland. Chin J Appl Ecol, 2006, 17 (8): 1435 — 1438.
- [17] Wang J, Cai H J, Kang Y X, Chen F. Ratio of soil evaporation to the evapotranspiration for summer maize field. Transactions of the CSAE, 2007, 23 (4): 17 — 22.

- [18] Allen R G, Pereira L S, Raes D, Smith M. Crop evapotranspiration: guideline for computing crop requirement. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56, Rome, Italy, 1998. 51—202.
- [19] Su M S, Li J S, Rao M J. Estimation of crop coefficients for sprinkler-irrigated winter wheat and sweet corn using a weighing lysimeter. Transactions of the CSAE, 2005, 21 (8): 25—29.
- [20] Peng S Z, Ding J L, Mao Z, Xu J Z, Li D X. Estimation and verification of crop coefficient for water saving irrigation of late rice using the FAO-56 method. Transactions of the CSAE, 2007, 23 (7): 30—34.

参考文献:

- [1] 胡建忠, 朱金兆. 黄土高原退化生态系统的恢复重建方略. 北京林业大学学报(社会科学版), 2005, 4(1): 13~19.
- [2] 郭忠升, 邵明安. 半干旱区人工林草地土壤旱化与土壤水分植被承载力. 生态学报, 2003, 23(8): 1640~1647.
- [3] 吴钦孝, 杨文治. 黄土高原植被建设与可持续发展. 北京: 科学出版社, 1998. 156~188.
- [4] 申元村. 黄土高原植被生态建设的反思与对策. 大自然, 2005: 15~19.
- [5] 李浩波, 高云英, 张景武, 刘春和, 余有成, 惠临风. 紫花苜蓿耗水规律及其用水效率研究. 干旱地区农业研究, 2006, 24(6): 163~167.
- [6] 程积民, 万惠娥, 王静, 雍绍萍. 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] 侯扶江, 肖金玉, 南志标. 黄土高原退耕地的生态恢复. 应用生态学报, 2002, 13(8): 923~929.
- [8] 刘孝利, 李凤民, 曾昭霞, 陈求稳. 黄土高原地区不同草地退耕模式水分利用效率的比较. 生态学报, 2007, 27(7): 2847~2855.
- [9] 赵姚阳, 刘文兆, 濮励杰. 黄土丘陵沟壑区苜蓿地土壤水分环境效应. 自然资源学报, 2005, 20(1): 85~91.
- [10] 李玉山. 苜蓿生产力动态及其水分生态环境效应. 土壤学报, 2002, 39(3): 404~411.
- [11] 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.
- [12] 夏永秋, 邵明安. 黄土高原半干旱区柠条(*Caragana korshinskii*)树干液流动态及其影响因子. 生态学报, 2008, 28(4): 1376~1382.
- [13] 张继义, 付丹, 魏珍珍, 赵哈林, 张铜会. 科尔沁沙地几种乔灌木树种耐受极端土壤水分条件与生存能力野外实地测定. 生态学报, 2006, 26(2): 467~474.
- [14] 阿拉木萨, 蒋德明. 科尔沁沙地两种典型乔灌木耗水特点. 生态学报, 2008, 28(5): 1981~1989.
- [15] 王笑影. 农田蒸散实测方法研究进展. 农业系统科学与综合研究, 2004, 20(1): 27~30.
- [16] 甘卓亭, 刘文兆. 黄土塬区麦田蒸散特征. 应用生态学报, 2006, 17(8): 1435~1438.
- [17] 王健, 蔡焕杰, 康燕霞, 陈凤. 夏玉米棵间土面蒸发与蒸发蒸腾比例研究. 农业工程学报, 2007, 23(4): 17~22.
- [19] 宿梅双, 李久生, 饶敏杰. 基于称重式蒸渗仪的喷灌条件下冬小麦和糯玉米作物系数估算方法. 农业工程学报, 2005, 21(8): 25~29.
- [20] 彭世彰, 丁加丽, 茆智, 徐俊增, 李道西. 用 FAO-56 作物系数法推求控制灌溉条件下晚稻作物系数及验证. 农业工程学报, 2007, 23(7): 30~34.