

# 黄土高原不同降雨年型乔、灌木蒸散特征与影响因素

张瑜<sup>1</sup>, 黄明斌<sup>1,2</sup>

(1. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学 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, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** 以黄土高原地区 17 个乔木和 15 个灌木测定点生长季观测数据为基础, 结合气象资料, 综合分析降水量、土壤前期储水量、潜在蒸散量与乔、灌木实际蒸散量的关系, 研究了不同降雨年型乔、灌木生长季实际蒸散的差异及其影响因素。结果表明, 无论是丰水年还是干旱年, 乔木生长季实际蒸散量均高于灌木。不同降雨年型影响乔灌木实际蒸散的主要因素不同, 丰水年影响乔灌木生长季实际蒸散的主要因素为降水, 其次为潜在蒸散量; 而干旱年影响乔灌木生长季实际蒸散的主要因素为前期土壤储水量, 其次为降水因素。

**关键词:** 黄土高原; 蒸散; 乔木; 灌木; 降雨类型

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2013)06-0207-06

中图分类号: S715.5

## Evapotranspiration Characteristics and Their Influencing Factors for Arbors and Shrubs with Different Precipitation Patterns in Loess Plateau

ZHANG Yu<sup>1</sup>, HUANG Ming-bin<sup>1,2</sup>

(1. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling,

Shaanxi 712100, China; 2. The State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** Based on the growing-season field measurements of seventeen arbor sites and fifteen shrub sites and combined with the meteorological data, the actual evapotranspiration during the growing season for arbors and shrubs were calculated and compared, and the impacts of precipitation, initial soil water storage and potential evapotranspiration on actual evapotranspiration with different precipitation patterns were analyzed. The results showed that the amount of growing-season actual evapotranspiration for arbors was higher than that for shrubs in both the dry and wet years. The influencing factors of actual evapotranspiration were different with different precipitation patterns. In the wet year, the actual evapotranspiration was mainly influenced by the precipitation, followed by the potential evapotranspiration; while in the dry year, the major factor that influences the actual evapotranspiration was initial water storage, followed by the precipitation. This study provides a guide for vegetation reconstruction of the Loess Plateau.

**Keywords:** the Loess Plateau; evapotranspiration; arbors; shrubs; precipitation

蒸散 (evapotranspiration, ET) 由地表蒸发、植物蒸腾组成, 在全球气候变化的认识与研究中, 因其在土壤—植物—大气系统中的重要纽带作用而受到高度关注。生态系统蒸散与植被生长密切相关, 是影响水循环的关键因素<sup>[1]</sup>, 每年通过蒸散进入大气的水分约占全年平均降水量的 70% 左右<sup>[2]</sup>。蒸散是地表水量平衡计算、干旱监测及植物生长模拟中的一个关键变量<sup>[3]</sup>, 是水、能量与碳循环的核心。黄土高原位

于干旱、半干旱地区, 该区降水量年际变化很大, 年降水相对变率一般在 15%~36%<sup>[4]</sup>。黄土高原旱涝规律分析表明, 黄土高原干旱问题突出, 而且经常出现连续少雨年<sup>[5]</sup>, 水资源匮乏是影响该地区生态环境建设的根本原因。植被类型不同, 对水资源需求与响应的机理有差异, 因此, 研究黄土高原地区不同降雨年型、不同植被类型实际蒸散的差异及其影响因素, 对于了解该区植被空间分布特征, 合理布局植被类型具

收稿日期: 2013-05-07

修回日期: 2013-07-21

资助项目: 国家自然科学基金项目“黄土高原降水梯度带生态水文过程演变与最佳植被盖度研究”(41171186)

作者简介: 张瑜 (1989—), 女 (汉族), 河北省唐山市人, 硕士研究生, 主要研究方向为生态水文。E-mail: yuzhang@nwsuaf.edu.cn。

通信作者: 黄明斌 (1968—), 男 (汉族), 湖北省钟祥市人, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为生态水文和土壤物理。E-mail: hmbd@nwsuaf.edu.cn。

有重要作用,进而指导黄土高原植被恢复与重建。

目前已有一些关于黄土高原地区蒸散的研究成果<sup>[6-8]</sup>,但这些研究多是对潜在蒸散变化及其影响因素的分析,由于影响水量平衡的因子是实际蒸散,而非潜在蒸散。因此,为更准确地掌握黄土高原地区生态系统需水与耗水状况,仅对潜在蒸散分析还不够,需要对实际蒸散的变化及其影响因素进行分析。本研究通过分析黄土高原地区不同降雨年型乔、灌木生长季实际蒸散的变化及其空间分布特征,利用修正 Penman 公式计算潜在蒸散量,水量平衡公式计算实际蒸散量,并考虑土壤前期储水状况,分析不同降雨年型乔、灌木实际蒸散的差异及其影响因素,研究结果对科学认识黄土高原不同植被类型的耗水特征及水分循环规律具有重要意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

黄土高原地区指日月山、贺兰山以东,太行山以西,秦岭以北,阴山以南的地区,位于东经  $101^{\circ}00'$ — $114^{\circ}33'$ ,北纬  $34^{\circ}00'$ — $45^{\circ}05'$ ,面积  $6.24 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。该区具有典型的大陆季风气候特征,年降水量变化在  $200 \sim 700 \text{ mm}$ ,且雨季集中于  $6 \sim 9$  月(占全年降水量的  $55\% \sim 78\%$ ),年变率大,气候干燥。该地区地下水埋藏很深,多在  $50 \sim 60 \text{ m}$ ,年总辐射量为  $502 \sim 670 \text{ kJ/cm}^2$ ,年平均气温  $3.6 \sim 14.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,年蒸发量为  $1\,400 \sim 2\,000 \text{ mm}$ <sup>[9]</sup>。

黄土高原地区由东南向西北依次为暖温性森林地带,暖温性森林草原地带,暖温性典型草原地带和暖温性荒漠草原地带。在不同地带依次分布着乔木林,乔灌混交林,灌木林和灌木草原等植被类型<sup>[10]</sup>。土壤属壤质土类型,轻—中壤质土占全部面积约  $90\%$ ,土壤质地分布有明显的地带性,由东南向西北依次分布有重壤土,中壤土,轻壤土和沙土<sup>[11]</sup>。该区地貌类型复杂多样,主要有丘陵、阶地、塬、平原、土石山地等<sup>[12]</sup>。

### 1.2 研究方法

本研究利用 2010—2011 年乔、灌木生长季观测资料。观测期间降水年际变化较大,与多年平均降水量(1950—2012 年)对比,2010 年属丰水年份,2011 年属干旱年份。所有测定主要集中在黄土高原乔、灌木过渡带,2010 年研究点主要位于黄土高原东部地区,沿南北走向分布,乔木的测定点为黄陵、富县、吉县、清涧、离石、米脂、兴县 7 个点,灌木的测定点为清涧、离石、榆林、神木、五寨、准格尔旗、和林格尔 7 个点。2011 年研究点主要位于黄土高原西部地区,沿

东西走向分布,其中,乔木测定点为环县、固原、海原、西吉、通渭、定西、榆中、临洮、湟中、大通 10 个点,灌木测定点为环县、海原、西吉、通渭、榆中、民和、湟中和大通县 8 个点。

两种植被类型均采用人工土钻取土烘干法测定土壤含水量,分别于生长季初(5 月)、末(10 月)各测定 1 次,两次重复取平均值。测定深度均为  $0 \sim 500 \text{ cm}$ ,其中  $0 \sim 100 \text{ cm}$  土层每隔  $10 \text{ cm}$  测定含水量,而  $100 \sim 500 \text{ cm}$  土层每隔  $20 \text{ cm}$  测定含水量。土壤容重测定分 3 层: $0 \sim 30 \text{ cm}$ , $30 \sim 60 \text{ cm}$  和大于  $60 \text{ cm}$ 。土壤剖面总贮水量计算公式为:

$$S = \sum_{i=1}^{30} \theta_i \cdot h_i \quad (1)$$

式中: $S$ ——土壤  $0 \sim 500 \text{ cm}$  剖面总贮水量( $\text{mm}$ ); $\theta$ ——测定点土壤体积含水量( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ); $h$ ——土层深度( $\text{mm}$ ); $i$ ——土壤剖面测定点。

忽略深层渗漏与毛管上升水,生长季实际蒸散量采用水量平衡方程计算:

$$ET = P - R + (S_{\text{初}} - S_{\text{末}}) \quad (2)$$

式中: $ET$ ——生长季实际蒸散量( $\text{mm}$ ); $P$ ——生长季降水量( $\text{mm}$ ); $R$ ——生长季降雨产流量,由于所有测点均在坡面水平沟地(水土保持措施),全部降雨可就地入渗,降水径流可忽略; $S_{\text{初}}$ , $S_{\text{末}}$ ——生长季初和生长季末土壤  $0 \sim 500 \text{ cm}$  剖面总储水量( $\text{mm}$ )。

潜在蒸散量  $ET_0$  采用 FAO-56 推荐的 Penman—Monteith 公式计算<sup>[13]</sup>。本研究中所用资料来源于 2010—2011 年中国气象科学数据共享服务网的逐日气象资料,包括最高气温、最低气温、平均相对湿度、平均风速、日照时数及降水量,生长季  $ET_0$  累积值由逐日的  $ET_0$  值统计而来。部分试验点的降水和蒸发资料取自《黄河流域水文资料》。

### 1.3 数据计算与分析

数据分析中,采用 Excel 计算  $ET$  和  $ET_0$ ,利用 SPSS 18.0 统计分析软件,采用 Pearson 相关分析方法,揭示不同降雨年型,乔、灌木实际蒸散量与降水量、潜在蒸散量以及土壤前期储水量之间的相互关系。利用 SAS 8.1 统计分析软件进行多元回归分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同降雨年型黄土高原乔灌木蒸散特征

表 1 为不同降雨年型乔、灌木生长季实际蒸散量的统计学特征。2010 年(丰水年)乔木与灌木生长季实际蒸散量分别介于  $203.8 \sim 390.6 \text{ mm}$  和  $133.2 \sim 415.6 \text{ mm}$  之间,最大值均出现在山西省离石地区;乔木生长季实际蒸散量最小值出现在陕西省米脂地区,灌木最小值则出现在陕西省神木地区。乔木生长

季实际蒸散量平均为 292.0 mm, 变异系数为 20.0%; 灌木平均为 230.1 mm, 变异系数为 41.1%。2011 年(干旱年)乔木与灌木生长季实际蒸散量分别介于 188.7~473.6 mm 和 167.8~394.6 mm 之间, 最大值均出现在青海省大通地区, 乔木实际蒸散量最小值出现在甘肃省环县, 灌木最小值则出现在青海省共和地区。乔木生长季平均实际蒸散量为 332.1 mm,

变异系数为 25.3%; 灌木平均为 298.7 mm, 变异系数为 29.1%。由此可见, 无论是丰水年还是干旱年, 乔木生长季平均实际蒸散量均比灌木蒸散量高, 且乔木实际蒸散量的变异系数较灌木低。两种植被类型生长季实际蒸散量在空间分布上都没有明显的变化规律, 这可能是因为测定范围有限, 不能反映黄土高原水、热空间分布规律。

表 1 研究区不同降雨年型乔、灌木生长季实际蒸散量的统计学特征

降雨年型	植被类型	样本数	均值/mm	标准差/mm	最大值/mm	最小值/mm	变异系数/%
丰水年	乔木	7	292.0	58.5	390.6	203.8	20.0
	灌木	7	230.1	94.6	415.6	133.2	41.1
干旱年	乔木	10	332.1	84.0	473.6	188.7	25.3
	灌木	8	298.7	87.0	394.6	167.8	29.1

## 2.2 乔灌木生长季实际蒸散量与降水量的关系

通常, 实际蒸散量与降水量的比值(ET/P)是区域水分盈亏的体现, 也在一定程度上反映生态系统涵养水源功能。试验结果表明, 丰水年乔木实际蒸散量占同期降水量的 59%~77%, 灌木实际蒸散量占同期降水量的 38%~82%。在丰水年, 两种植被类型生长季实际蒸散量均小于同期降水量, 说明在植被生长发育阶段降水总量足以满足蒸散的需求, 生长季末土壤剖面储水量显著增加。干旱年, 两种植被类型生长季实际蒸散量均大于同期降水量, 乔木实际蒸散量占同期降水量的 108%~193%, 灌木实际蒸散量占同期降水量的 107%~217%, 说明干旱年生长季降水量不足以满足植被蒸散的需求, 土壤蒸发和植物蒸腾将消耗土壤前期储水, 使土壤含水量减少, 土壤水

分出现亏缺。

根据对两种植被类型生长季实际蒸散量与降水量变化特征分析可知, 无论是丰水年还是干旱年, 随着生长季降水量的增加, 实际蒸散量也增大。为进一步评估降水变化对实际蒸散的影响, 对不同降雨年型两种植被类型生长季降水量与实际蒸散量进行了相关分析(图 1)。丰水年, 乔木生长季实际蒸散量与同期降水量相关系数为 0.907( $p < 0.01$ ), 灌木为 0.870( $p < 0.05$ ); 干旱年, 乔木生长季实际蒸散量与同期降水量相关系数为 0.786( $p < 0.01$ ), 灌木为 0.834( $p < 0.05$ )。结果表明, 无论是丰水年还是干旱年, 两种植被类型生长季累积蒸散量与同期累积降水量均呈显著线性相关关系, 说明生育期降水量是该区植被生长的主要水分来源, 对植被可持续生长具有决定性作用。

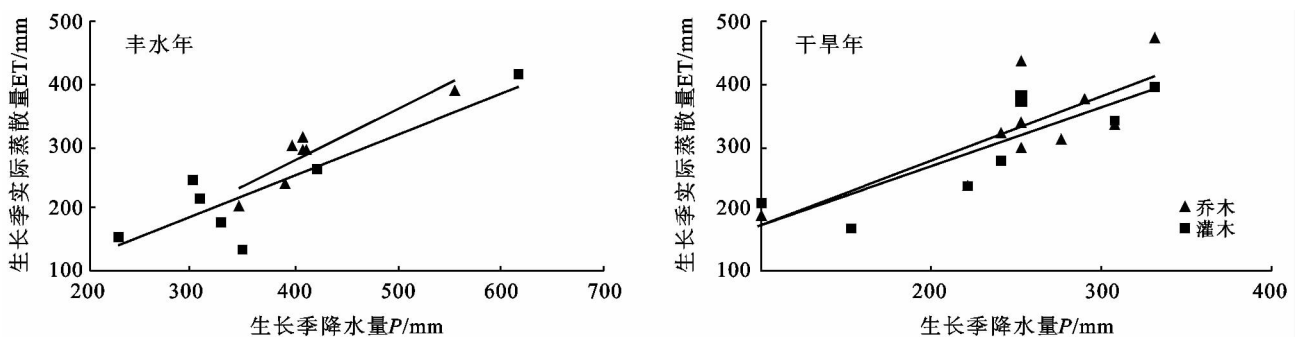


图 1 研究区乔、灌木生长季蒸散量与降水量变化关系

王新平<sup>[14]</sup>等人在宁夏回族自治区沙坡头地区利用 lysimeter 试验结果表明, 生长季灌丛累积蒸散量是同期累积降水量的函数。Liu 等<sup>[15]</sup>研究发现, 干旱半干旱地区毛乌素地区乌审县的实际蒸散量与降水量的空间分布具有一致性, 且二者具有较好的线性关系。Zhang<sup>[16]</sup>等分析了全球范围的 250 个集水区域后发

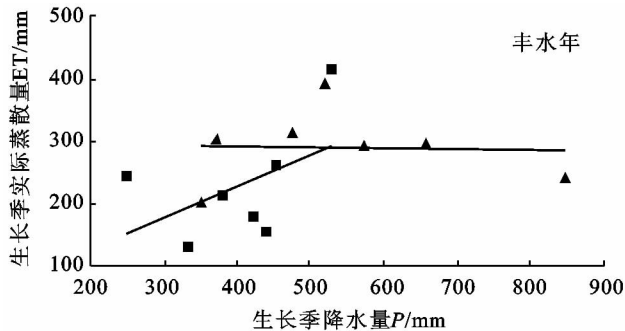
现, 在一定的森林盖度下, 长期的平均降水量与实际蒸散量之间有很好的相关关系, 实际蒸散量随着降水量的增加而增加。以上研究报道与本研究结果一致。

## 2.3 乔灌木生长季实际蒸散量与前期土壤储水量的关系

在干旱和半干旱地区, 植物生长季耗水主要来源

于生长季的有效降水和土壤前期储水量。根据试验结果分析可知,丰水年两种植被类型土壤前期储水量对生长季实际蒸散量的影响均未达到 0.05 的统计显著性,说明丰水年生长季降水量能满足植被蒸散的需求,植被蒸散不受土壤水分限制,土壤前期储水量不是影响植被实际蒸散的主要因素。

干旱年两种植被类型生长季实际蒸散量都随土



壤前期储水量(5 m)增加而增大,两者呈线性相关关系(图 2)。

其中,乔木生长季蒸散量与土壤前期储水量相关系数为 0.822( $p < 0.01$ ),灌木生长季蒸散量与土壤前期储水量相关系数为 0.833( $p < 0.05$ )。显然,干旱年生长季降水满足不了植物耗水需求,其中不足部分由土壤前期储水量提供。

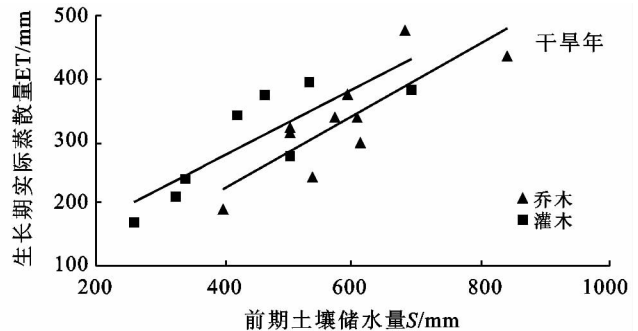


图 2 研究区乔、灌木实际蒸散量与土壤前期储水量变化关系

由于黄土高原经常出现连续少雨年,干旱年乔、灌木蒸散需水量超过年降水量,植物蒸发蒸腾过量耗水造成植物根系作用范围内土壤水分长时间亏缺,天然有效降水不能有效地予以补偿,长期下去,引起土壤含水量降低,形成干燥化土层。据调查,土壤干层普遍存在于黄土高原全区,无论是乔木还是灌木,土壤层中都常伴有干层形成。土壤干层的出现会造成树干弯曲、树冠分枝少和生长缓慢等现象,黄土高原的“小老头树”就是典型的土壤干层发育的结果<sup>[17]</sup>。李巍等<sup>[18]</sup>研究发现,在持续干旱的年份,土层较薄且储水能力较低的半干旱地区,人工林会部分或大面积干枯死亡,而土层深厚且储水能力较高的地区,人工林吸收深层土壤水分,大面积死亡的现象不会发生。因此,在气候波动较大的干旱、半干旱地区,保持一定土壤储水量对植物抵御气候干旱,保持可持续生长具

有重要意义。

#### 2.4 乔灌木生长季蒸散量与潜在蒸散量的关系

不同降雨年型,两种植被类型生长季的实际蒸散量与潜在蒸散量的相关性不一致。丰水年,两种植被类型实际蒸散量与潜在蒸散量均呈线性相关关系,实际蒸散量随潜在蒸散量的增大而增加(图 3)。乔木实际蒸散量与潜在蒸散量相关系数为 0.824,灌木实际蒸散量和潜在蒸散量相关系数为 0.811,两者均达到显著水平( $p < 0.05$ )。

而在干旱年,两种植被类型实际蒸散量与潜在蒸散量相关系数均未通过 0.05 的显著性检验。说明在丰水年植被生长季内实际蒸散除受降水影响之外,还受大气蒸发能力(潜在蒸散量)的影响;而干旱年,由于受有限水资源量的影响,大气蒸发能力不是影响植被实际蒸散的主要因素。

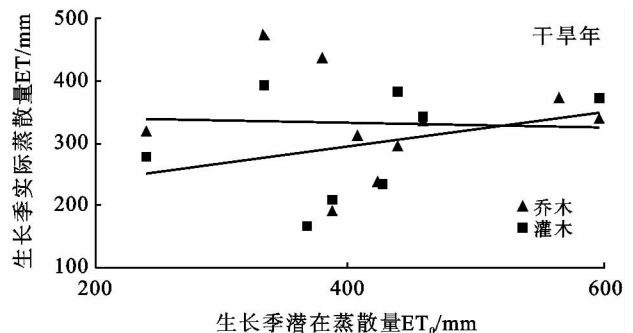
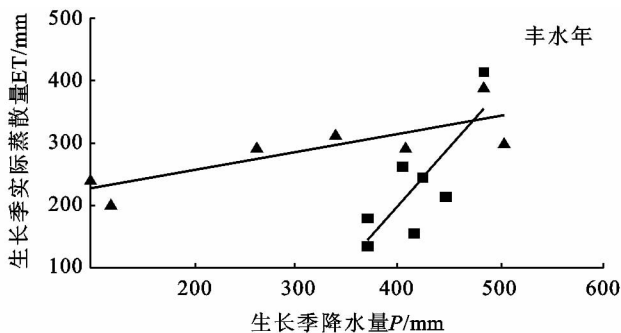


图 3 研究区乔、灌木实际蒸散与潜在蒸散变化关系

通过以上对不同降雨年型乔、灌木生长季实际蒸散影响因素分析,确定降水量、土壤前期储水量和潜

在蒸散量为植被蒸散的主要影响因子。为了提高预测准确性,通过逐步回归法进行回归分析,回归分析

结果详见表2。

回归的标准化估计(SE)用于评价影响因素对实

际蒸散量的相对重要性。SE值越大说明因素对植被实际蒸散的影响越大。

表2 不同降雨年型乔、灌木生长季实际蒸散量影响因素的多元线性回归分析

降雨年型	植被类型	因素/mm	系数	t 值	$P>t$	SE	调整后 $R^2$
丰水年	乔木	截距	-0.345 2	-0.01	0.994 6	0.000 0	0.916 1
		降水量	0.582 4	4.35	0.012 1*	0.644 0	
		潜在蒸散量	0.155 7	2.95	0.041 9*	0.437 0	
	灌木	截距	-403.238 5	-2.78	0.049 7*	0.000 0	
		降水量	0.461 7	3.59	0.022 9*	0.609 5	
		潜在蒸散量	1.113 7	2.83	0.047 5*	0.479 1	
干旱年	乔木	截距	-58.483 2	-0.87	0.414 3	0.000 0	0.788 5
		降水量	0.630 5	2.60	0.035 2*	0.478 2	
		前期储水量	0.393 5	3.04	0.018 7*	0.559 1	
	灌木	截距	-71.191 3	-1.28	0.269 3	0.000 0	
		降水量	0.542 5	3.07	0.037 4*	0.480 2	
		前期储水量	0.334 0	3.43	0.026 6*	0.534 5	

注: \*表示  $t$  检验在  $p=95\%$  水平显著; SE 为标准化估计。

逐步回归分析结果表明,不同降雨年型,两种植被类型最终进入回归模型的自变量不同,说明在不同降雨年型,乔灌木生长季实际蒸散受不同环境因子控制。丰水年,乔灌木降水的 SE 值均大于潜在蒸散量的 SE 值,说明影响乔灌木实际蒸散的主要因素为降水,其次为潜在蒸散量。同时考虑降水和潜在蒸散的变异,乔木能解释实际蒸散变异的 91.6% ( $p < 0.01$ ),比只考虑某一因素变异时分别高出 9.4% 和 23.7%;灌木能解释实际蒸散变异的 87.9% ( $p < 0.01$ ),比只考虑某一因素变异时分别高出 12.1% 和 22.1%。这是由于丰水年水分丰富,生长季降水量能满足植被蒸散的需要,前期土壤储水量对植物实际蒸散没有影响,因此,潜在蒸散成为除降水外影响乔灌木实际蒸散的主要因素。干旱年,乔灌木前期土壤储水量的 SE 值均大于降水的 SE 值,说明影响乔灌木实际蒸散的主要因素为土壤前期储水量,其次为降水。同时考虑降水和土壤前期储水量的变异时,乔木可解释实际蒸散变异的 78.9% ( $p < 0.01$ ),大于只考虑某一因素变异时的情况(分别高出 17.1% 和 11.3%);灌木可解释实际蒸散变异的 89.4% ( $p < 0.01$ ),也大于只考虑某一因素变异时的情况(分别高出 19.9% 和 20.0%)。这是由于干旱年植物生长季降水量不能满足植物耗水的需求,前期土壤储水量部分被植物吸收利用,因此前期土壤储水量影响乔灌木实际蒸散量。由于没有足够水分提供植物用水,潜在蒸散量对植被实际蒸散的影响很小,实际蒸散主要由供水条件(降水和土壤前期储水量)决定。

### 3 结论

(1) 黄土高原地区不同降雨年型,影响乔灌木生长季实际蒸散的因素不同,但都与区域降水过程密切相关,两种植被类型生长季累积蒸散量均与同期累积降水量呈显著正相关关系,说明该地区植被生长季实际蒸散受降水影响强烈。

(2) 通过逐步回归分析发现,不同降雨年型,两种植被类型实际蒸散的主要影响因素不同。丰水年,潜在蒸散量是除降水外影响乔灌木实际蒸散的主要因素;而干旱年影响乔灌木生长季实际蒸散的主要因素为前期土壤储水量,其次为降水。

(3) 无论是丰水年还是干旱年,乔木生长季实际蒸散量均高于灌木。因此,在黄土高原地区进行植被建设应考虑乔、灌木的适生区。

(4) 由于资料限制本研究未考虑土壤质地、地形和叶面积指数等因素对乔灌木实际蒸散的影响。黄土高原地形破碎,同一地区,由于坡向、坡度和坡位的差异,同一植物的实际蒸散量也可能存在较大变化;另外,同一植物类型,由于覆盖度不同,实际蒸散量差别也很大。因此,下一步应考虑土壤质地、小地形和植被盖度等因素对实际蒸散的影响,以便更准确地分析不同植被类型实际蒸散的动态变化特征。

#### [参考文献]

- [1] Nemani R R, White M A, Thornton P, et al. Recent trends in hydrologic balance have enhanced the terrestrial carbon sink in the United States[J]. Geophysical Re-

- search Letters, 2002, 29(10):1061-1064.
- [2] 马宁,王乃昂,王鹏龙,等. 黑河流域参考蒸散量的时空变化特征及影响因素的定量分析[J]. 自然资源学报, 2012, 27(6):875-989.
- [3] 孙睿,刘昌明,李小文. 利用累积 NDVI 估算黄河流域年蒸散量[J]. 自然资源学报, 2003, 18(2):155-160.
- [4] 余卫东,闵庆文,李湘阁. 黄土高原地区降水资源特征及其对植被分布的可能影响[J]. 资源科学, 2002, 24(6):55-60.
- [5] 杨文治. 黄土高原土壤水资源与植树造林[J]. 自然资源学报, 2001, 16(5):433-438.
- [6] 姚玉璧,王润元,杨金虎,等. 黄土高原陆地表层最大可能蒸散量的变化特征[J]. 生态环境学报, 2011, 20(8/9):1189-1195.
- [7] 王幼奇,樊军,邵明安,等. 黄土高原地区近 50 年参考作物蒸散量变化特征[J]. 农业工程学报, 2008, 24(9):6-10.
- [8] 刘普幸,卓玛兰草. 甘肃省 1960—2008 年潜在蒸散量时空变化及其影响因子[J]. 自然资源学报, 2012, 27(9):1561-1571.
- [9] He Xiubin, Li Zhanbin, Hao Mingde, et al. Down-scale analysis for water scarcity in response to soil water conservation on Loess Plateau of China[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2003, 94(3):355-361.
- [10] 陈云明,梁一民,程积民. 黄土高原林草植被建设的地带性特征[J]. 植物生态学报, 2002, 26(3):339-345.
- [11] 李玉山,韩仕峰,汪正华. 黄土高原土壤水分性质及其分区[J]. 西北水土保持研究所集刊, 1985(2):1-17.
- [12] Wang Yunqiang, Shao Mingan, Zhu Yuanjun, et al. Impacts of land use and plant characteristics on dried soil layers in different climatic regions on the Loess Plateau of China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2011, 151(4):437-448.
- [13] Allen R G, Pereira L S, Raes D. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56[R]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations(FAO), 1998.
- [14] 王新平,李新荣,康尔泗,等. 沙坡头地区固沙植物油蒿、柠条蒸散状况的研究[J]. 中国沙漠, 2002, 22(4):363-367.
- [15] Liu Shaomin, Bai Jia, Zhou Huizhen, et al. Estimation of evapotranspiration in the Mu Us Sandland of China [J]. Hydrology and Earth System Sciences Discussions, 2009, 14(6):5977-6006.
- [16] Zhang L, Dawes W R, Walker G R, Predicting the effect of vegetation changes on catchment average water balance[R]. Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology, CSIRO Land and Water, Technical Report 99/12, November, 1999:35.
- [17] 何福红,黄明斌,党廷辉. 黄土高原沟壑区小流域土壤干层的分布特征[J]. 自然资源学报, 2003, 18(1):30-36.
- [18] 李巍,郝明德,王学春. 黄土高原沟壑区不同种植系统土壤水分消耗和恢复[J]. 农业工程学报, 2010, 26(3):99-105.