



Evapotranspiration Characteristics of Forest and Grass Vegetation and Its Response to Environmental Factors on the Loess Plateau

Wang Fu, Sha Xiao Yan, He Qian, Zhao Qiang, Han Fen, Zhang He

Pingliang Institute of Soil and Water Conservation, Pingliang, China

Email address:

2640189616@qq.com (WangFu), 1039714213@qq.com (ShaXiaoYan), 271685340@qq.com (HeQian), 365393688@qq.com (ZhaoQiang), 455573021@qq.com (HanFen), 407645612@qq.com (ZhangHe)

To cite this article:

Wang Fu, Sha Xiao Yan, He Qian, Zhao Qiang, Han Fen, Zhang He. Evapotranspiration Characteristics of Forest and Grass Vegetation and Its Response to Environmental Factors on the Loess Plateau. *Science Discovery*. Vol. 11, No. 6, 2023, pp. 189-204.

doi: 10.11648/j.sd.20231106.12

Received: October 19, 2023; **Accepted:** November 6, 2023; **Published:** November 13, 2023

Abstract: In this paper, the evapotranspiration characteristics and water consumption rules of different types of vegetation in tree forest, shrub forest and grassland in the Loess Plateau of Longzhong region were analyzed, and the response relationship between vegetation evapotranspiration and meteorological factors was established by regression analysis method. The results showed that: (1) The monthly variation of Ea values of vegetation in this region showed an obvious inverted U-shaped bimodal variation, which the lowest Ea values were found in the germination stage of vegetation in early April and the dormancy stage of leaf litter in October, and the Ea values increased greatly in May and June with the enhancement of vegetation transpiration and soil evaporation by an average increase of 74.31%. The Ea values of all types of vegetation in this region reached the maximum value in July and August and began to decline significantly from September by an average decrease of 7.42mm and an average decrease of 24.31%. In October, the Ea values of vegetation rapidly decreased to the level of early April by an average decrease of 15.67mm and a decrease of 51.52% compared with August. (2) The difference in the perspective of spatial distribution of evapotranspiration water consumption of vegetation in this region was mainly manifested in the difference between east and west but a little difference between north and south. In Pingliang City, vegetation evapotranspiration water consumption in the east was higher than that in the west, the south was higher than that in the north, and the Jinghe River basin was higher than that in the Hulu River basin. The average difference of the total evapotranspiration water consumption of the same type of vegetation during the growth period was 19.43mm from east to west, 2.2mm from north to south, and 19.43mm from basin to basin. (3) Radiation and precipitation were the main influencing factors of Ea. Among the independent variable factors affecting evapotranspiration of forest and shrub forest, the difference of significance from large to small was the average monthly temperature, average monthly precipitation, average monthly wind speed and average monthly precipitation days. The effect of monthly mean wind speed on grassland Ea was relatively small.

Keywords: Forest and Grass Vegetation, Evapotranspiration, Characteristic of Water Consumption, Response of Environmental Factors, The Loess Plateau, Middle-East of Gansu Province

陇中东黄土高原林草植被蒸散耗水特性及其环境因子响应

王辅, 沙小燕, 何倩, 赵强, 韩芬, 张鹤

平凉市水土保持科学研究所, 平凉市, 中国

邮箱

2640189616@qq.com (王辅), 1039714213@qq.com (沙小燕), 271685340@qq.com (何倩), 365393688@qq.com (赵强), 455573021@qq.com (韩芬), 407645612@qq.com (张鹤)

摘要: 本文分析了陇中东黄土高原地区乔木林、灌木林和草地不同类型植被的蒸散耗水特性和耗水规律, 并通过回归分析方法建立了植被蒸散与气象因子之间的响应关系, 结果表明: ①本地区植被Ea值月际变化呈现明显的倒“U”型双峰变化分布特征, 即在植被生长期4月份初的萌芽生长阶段和10月份落叶进入休眠阶段均为Ea最低值, 5月、6月随着植被自身的蒸腾作用和土壤蒸发都增强而大大增加, Ea值平均增加了74.31%, 7月、8月本地区所有类型植被Ea值均达到最大值, 从9月开始出现明显的下降, Ea值平均减少7.42mm, 平均下降24.31%, 10月份植被Ea值快速减少到4月初的水平, 与8月份相比较平均减少15.67mm, 降幅达51.52%; ②从空间分布上看本地区植被蒸散耗水量的差异主要表现在东西差异上, 南北差异不大。平凉市植被蒸散耗水量总体上东部高于西部、南部高于北部、泾河流域高于葫芦河流域, 同一类型植被生长期蒸散耗水总量东西平均相差19.43mm, 南北平均相差2.2mm, 流域间平均相差19.43mm; ③辐射和降水为Ea的主导影响因子。影响乔木林和灌木林蒸散量的自变量因子中差异显著性从大到小排序依次为月平均气温、月平均降水量、月平均风速、月平均降水天数; 而月平均风速对于草地Ea的影响相对较小。

关键词: 林草植被, 蒸散, 耗水特性, 环境因子响应, 黄土高原, 陇中东

1. 引言

黄土高原地区是我国典型的生态敏感区, 同时存在着干旱与水土流失两大生态环境问题, 而恢复植被覆盖是改善生态环境的关键举措[1]。近年来, 随着水土保持和生态环境建设不断推进, 黄土高原地区水土流失治理程度不断提高, 植被覆盖率也得到大幅度提高, 生态环境质量也得到一定程度的改善提升。但黄土高原大部分地区地处干旱半干旱地区, 水分是制约其植被恢复的主要因素[2, 3, 16], 根据“以水定树(草)”基本原理维持降水和植被蒸散耗水发之间的平衡则是区域生态恢复的重要基础[1, 5, 9, 15]。因此, 在植被恢复与重建过程中, 首先必须考虑植被恢复与水资源之间的耦合关系[4]。相关研究已经表明, 由于大规模植被恢复正在或已经造成区域蒸散发增加, 导致土壤有效储水量减少, 径流量减少, 生态需水量随之增大, 植被恢复与水资源的矛盾日益凸显[4]。从这个意义上说, 黄土高原大规模植被恢复产生的生态水文效应必然会对区域水平衡产生影响, 可能会进一步加剧区域水资源短缺的态势。长期以来, 植被恢复过程中存在着植被种类选择不当、乔灌木配置结构失衡、密度过大等问题。事实上, 一个地区的气候资源及其空间分配的异质性在很大程度上决定着所能承载的植被类型、格局、数量和结构[5]。为了提供科学合理的植被恢复依据, 首先必须认识该地区植被蒸散耗水特性, 掌握植被蒸散耗水的时空变化及其对水文循环、水资源形成及植被生长的影响以及对环境因子的响应关系。

植被蒸散是土壤—植物—大气体系 (SPAC) 中水分运动与平衡的重要过程, 同时也是一个复杂的物理学过程和生物学过程。植被的蒸散耗水量包括林草地地表土壤水分蒸发量与植物体内水分的蒸腾量[5, 6]。本地区气候类型属于温带、暖温带大陆性半干旱半湿润气候, 根据本地区植被的生物学特性, 90%以上的植被蒸腾主要发生在植被生长期 (4—10月), 尽管在植被休眠期 (11—3月) 地表土壤的水分蒸发仍在进行, 但由于这一阶段土壤蒸发量很少, 同时冬季和初春降水对土壤水分的补充完全可以达到水量平衡, 土壤蒸发量可以忽略不计[7-12]。因此, 本

项研究中的植被蒸散是指植被生长期的4—10月的蒸散耗水。

2. 研究区域概况

平凉市位于甘肃省中东部, 辖1市5县1区, 东部为黄河流域渭河水系一级支流泾河流域, 西部为葫芦河流域, 土地总面积11119.07km²。气候类型为温带半湿润半干旱气候, 多年平均降水量533.1mm, 多年平均干旱指数为1.65, 植被类型为温带森林草原, 种类主要有落叶阔叶林、针阔混交林、森林草原等。

根据第三次全国国土调查数据, 平凉市现有森林面积354702.23hm², 其中乔木林305166.14hm², 灌木林49536.09hm², 主要树种为刺槐 (*Robinia pseudoacacia* L.)、阔叶混交林、栎类 (*Quercus* L.)、杨类 (*Populus* L.)、落叶松 (*Larix gmelinii* (Rupr.) Kuzen.)、油松 (*P. tabuliformis*) 等29种, 经济林主要为人工栽植的红富士苹果 (*Malus pumila* Mill)。草地面积68572.19hm², 多为人工草地, 品种有70余种, 大多为禾本科、菊科植物。森林覆盖率达到33.8%, 高于黄土高原森林覆盖率平均水平 (21.83%); 林草覆盖率达到50.57%, 接近于黄土高原植被覆盖率平均水平 (59.0%)。

3. 研究方法

分析植被蒸散量的方法很多, 例如水文法中的水量平衡法、水分运动通量法和蒸渗仪测定法、微气象学方法中的波文比—能量平衡法 (BREB)、能量平衡—空气动力学综合法、空气动力学法、涡度相关法及其他微气象模拟法, 植物生理学方法中的气孔计法、同位素法, 遥感辐射法, 气候学法等[9-13]。本项研究采用植被蒸散量的气候学方法进行分析。蒸散气候学方法, 通常根据气温、降雨量、辐射量、水气压、风速等气象资料进行估算, 如彭曼公式、布得科公式、Thorntwaite公式、Makkink公式、Morton公式等。除此之外, 还有很多改进的经验公式和模型, 适合计算大面积或流域的月蒸散量或年蒸散量。本文采用蒸散气候学研究方法中的经验模型法, 根据改进的HAMON模型计算潜在蒸散量 (Ep) 值, 引入ZHANG等经验模型 (Zhang et al) [14]计算本

地区不同植被类型的实际蒸散量（Ea），在此基础上进一步分析不同类型植被的蒸散耗水特性和规律，采用最佳子集回归分析方法确定不同类型植被蒸散的敏感影响因子组合，并通过线性回归分析方法建立植被蒸散与气象因子之间的响应关系。

4. 基础资料 and 计算方法

4.1. 资料来源

采用本地区1997—2000年的气象统计资料，气候资源数据分别见表1、表2、表3。

表1 平凉市气象要素表。

月份	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月
平均温度	10.5	15.2	19.0	21.1	19.9	14.8	8.7
平均降水量	31.4	45.6	64.1	109.2	96.9	61.5	38.3
平均风速	2.4	2.2	0.9	1.9	1.9	1.7	1.8
降水天数	7.9	9.6	10.7	12.4	12.9	11.5	9.2

表2 植被生长期（4—10月）平凉市各行政区多年月平均气温表。

行政区	多年月平均气温（℃）						
	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月
崆峒区	13	17	21	23.5	22	17	11
泾川县	13.5	18	22.5	25	24	18.5	12
灵台县	13.5	18	22.5	24.5	24	18.5	12
崇信县	13.5	17.5	22	24.5	23.5	18	11.5
华亭市	11	15	19.5	21.5	20.5	15.5	9.5
庄浪县	11	15	19.5	21.5	21	16	10
静宁县	10.5	15.5	19.5	21.5	20.5	15	9.5
平凉市平均	10.5	15.2	19	21.1	19.9	14.8	8.7

表3 植被生长期（4—10月）平凉市各行政区多年平均月降水量表（mm）。

行政区	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	全年	生长期
崆峒区	33	45.7	63.2	107	108.6	82.2	41.2	533.4	480.9
泾川县	35.4	47.9	57	111.9	114.7	92.2	42.4	551.5	501.5
灵台县	33	47.9	70.9	119	101.2	106.6	46.3	578.8	524.9
崇信县	35.6	47.9	57.8	110.3	100.4	89.9	41.7	527.6	483.6
华亭市	34.5	52.5	66.4	122.5	111.7	120.1	49	607.4	556.7
庄浪县	35	49.8	68.4	108.1	102.1	81.5	40.8	518.4	485.7
静宁县	29.2	46.5	57.9	90.2	87.2	74.9	36.1	451	422
平凉市平均	33.2	48	63.4	108.5	102.7	91	42.1	533.1	488.9

4.2. 计算模型

本文采用蒸散气候学研究方法中的经验模型法—ZHANG等经验模型（Zhang et al, 2012），模型公式为：

Ea=Q*(1+w*Ep/Q)/[(1+W*Ep/Q+(Ep/Q)-1] (1)

式中：
Ea：地表实际蒸散量（mm）； Q：降水量（mm）；
w：无量纲植物水利用系数（乔木林2.0，灌木1.5，草地0.5），为了更加区分草地类型，本文将草地划分为高覆盖度草地（覆盖度大于50%，w=0.5）、中覆盖度草地（覆盖度20%~50%，w=0.3）和低覆盖度草地（覆盖度5%~20%，w=0.2）；
Ep：地表潜在蒸散量（mm）。
Ep根据HAMON模型计算得到：

Ep=0.1651*d1*TRHOSA (2)

TRHOSA=216.7*TESA/(Tm+273.3) (3)

TESA=6.108*exp[17.27*Tm/(Tm+237.3)] (4)

d1：日照数数（h/d），本文取d1=12h； TRHOSA：月平均气温条件下的饱和水汽密度（g.m⁻³）； TESA：特定温度条件下的饱和蒸气压(kpa)； Tm：月平均气温(℃)。

5. 结果分析

5.1. 不同类型植被生长期（4—10月）实际蒸散量月际变化

(1)乔木林
从乔木林实际蒸散量分析，划分为3个明显的蒸散区间：低蒸散耗水区间（17.63mm≤Ea≤21.56mm）、中高蒸散耗水区间（25.27mm≤Ea≤30.56mm）、高蒸散耗水区间（31.97mm≤Ea≤47.57mm），其中生长期4月和10月，平凉市全部范围内乔木林均处于低蒸散耗水区间；实际蒸散量处于中高蒸散区间的时间和区域为5月份平凉市全部区域和9月份的崆峒区、华亭市、庄浪县、静宁县；实际蒸散量处于高蒸散耗水区间的时间和区域为6—8月份平凉市全部区域和9月份的泾川县、灵台县、崇信县；其中分布于静宁县的乔木林在4月初出现蒸散量最低值

(17.63mm)，乔木林月实际蒸散量最大值(47.57mm)发生在泾川县，时间为7月中旬。

从月实际蒸散量均值分析，平凉市范围内乔木林生长期(4—10月)内，月实际蒸散量Ea逐月均值依次为19.94mm、26.75mm、34.66mm、43.40mm、41.13mm、30.75mm、19.91mm，10月Ea值最小，7月中旬Ea均值最大。

(2)灌木林

从灌木林实际蒸散量Ea值分析，划分为3个明显蒸散区间：低蒸散区间(16.54mm≤Ea≤20.11mm)、中高蒸散区间23.59mm≤Ea≤29.91mm)、高蒸散区间(30.37mm≤Ea≤44.34mm)，灌木林生长期4月和10月，平凉市全境灌木林均处在低蒸散区间；实际蒸散量处于中高蒸散区间的时间和区域为5月份平凉市全部、6月份的静宁县、9月份的崆峒区、华亭市、庄浪县、静宁县；6月份除静宁县全市其他区域(崆峒区、泾川县、灵台县、崇信县、华亭市、庄浪县)的灌木林均处在高蒸散区间，7、8月份全市所有区域的灌木林均处在高蒸散区间，9月份泾川县、灵台县、崇信县的灌木林仍处在高蒸散区间。其中分布于静宁县的灌木林在4月初出现蒸散量最低值(16.54mm)，蒸散量最大值(44.34mm)发生在7月中旬的泾川县。

从灌木林实际蒸散量均值分析，平凉市范围内灌木林生长期(4—10月)内，月实际蒸散量Ea逐月均值依次为18.70mm、25.04mm、32.44mm、40.48mm、38.36mm、28.74mm、18.58mm，10月Ea均值最小，7月Ea均值最大。

(3)草地

从草地实际蒸散量Ea值分析，划分为3个明显蒸散区间：低蒸散区间(12.87mm≤Ea≤20.82mm)、中高蒸散区间21.23mm≤Ea≤28.75mm)、高蒸散区间(29.28mm≤Ea≤36.82mm)，草地生长期4月和10月平凉市全境草地Ea值均处在低蒸散区间，5月份除泾川县和灵台县其他地区草地维持在低蒸散区间，9月份静宁县境内草地也维持在低蒸散区间；实际蒸散量处于中高蒸散区间的时间和区域为5月份泾川县和灵台县、6月份全部地区、8月份静宁县、9月份除静宁县全市其他区域(崆峒区、泾川县、灵台县、崇信县、华亭市、庄浪县)的草地均处在中高蒸散区间；7月份全市草地均处在高蒸散区间，8月份全市除静宁县外其他所有区域的草地均处在高蒸散区间。其中分布于静宁县的低覆盖度草地(覆盖度5%~20%)在4月初出现月实际蒸散量最低值(12.87mm)，草地月蒸散量Ea最大值(36.82mm)发生在7月中旬的泾川县高覆盖度草地(覆盖度大于50%)。

从实际蒸散量均值分析，平凉市范围内草地生长期(4—10月)内，月实际蒸散量Ea逐月均值依次为14.97mm、20.07mm、26.01mm、33.02mm、31.28mm、23.77mm、14.98mm，4月Ea均值最小，7月Ea均值均值最大。

5.2. 不同类型植被生长期(4—10月)月实际蒸散量变化特性

(1)乔木林

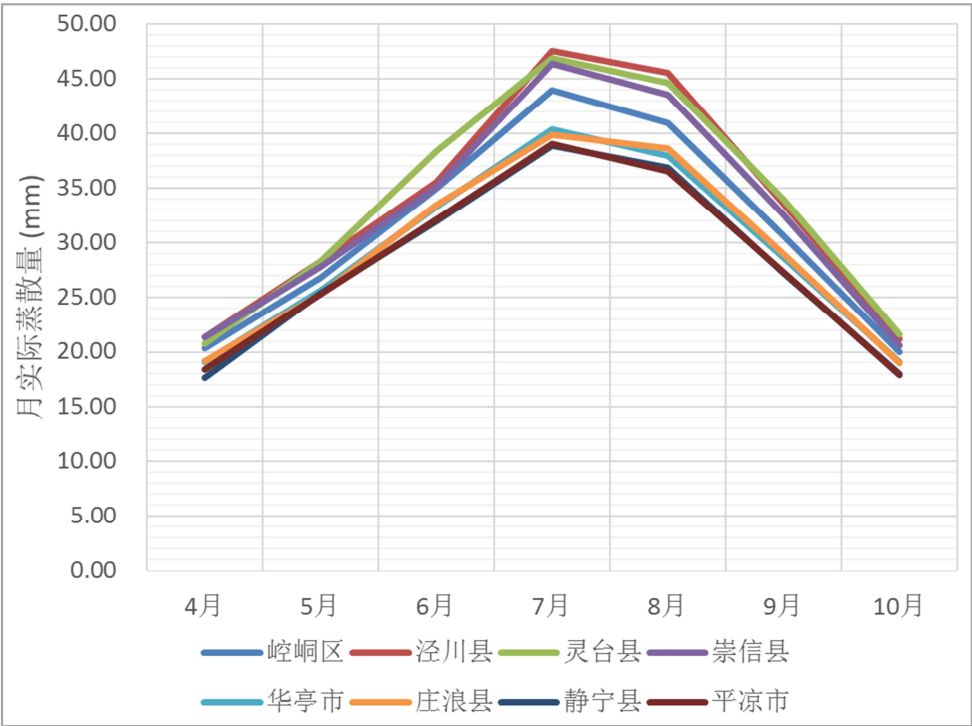


图1 不同区域乔木林生长期(4—10月)实际蒸散量月际变化。

生长期乔木林月蒸散耗水量月际变化呈现较为明显的倒“U”型月变化分布特征(见图1)，即4~5月乔木林蒸散耗水量偏低并且从西部葫芦河流域乡东部泾河流域逐渐缓慢升高，Ea值变化范围为17.63mm(静

宁县)≤Ea≤28.28mm(泾川县)，均值从19.94mm提高到26.75mm，6月开始平凉市全境乔木林Ea值明显升高，均值从5月份的26.75mm提高到34.66mm，Ea值变化范围为31.97mm(静宁县)≤Ea≤38.38mm(灵台县)，

7月中旬出现乔木林月蒸散发的最大值(47.57mm, 泾川县), 8月份乔木林Ea值仍维持在高蒸散区间(36.82mm(静宁县) \leq Ea \leq 45.52mm(泾川县)), Ea值变化范围为31.97mm(静宁县) \leq Ea \leq 38.38mm(灵台县), 9月中旬乔木林蒸散发开始缓慢减少, 但泾川县、灵台县和崇信县的乔木林仍维持在高蒸散区间, 崆峒区、华亭市、庄浪县和静宁县区域内乔木林月蒸散量开始缓慢递减, 变化范围为27.16mm(庄浪县) \leq Ea \leq 30.56mm(崆峒区); 从10月开始乔木林月蒸散量迅速递减, 月实际蒸散量Ea值维持在低蒸散区间, Ea值变化范围为18.03mm(静宁县) \leq Ea \leq 21.56mm(灵台县)。

(2) 灌木林

从图2可以得出, 灌木林生长期蒸散耗水量月际变化和乔木林一样呈现较为明显的倒“U”型月变化分布特征, 即4~5月蒸散耗水量偏低并且自西部葫芦河流域向东部泾河流域缓慢升高, Ea值变化范围为16.54mm(静宁县) \leq Ea \leq 26.52mm(泾川县、灵台县),

均值从18.7mm提高到25.04mm, 6月份开始灌木林实际蒸散量逐渐升高, 均值从5月份的25.04mm提高到32.44mm, Ea值变化范围为29.91mm(静宁县) \leq Ea \leq 35.89mm(灵台县), 7月中旬出现月蒸散发的最大值(44.34mm, 泾川县), 蒸散量均值提高到40.48mm, 8月份灌木林实际蒸散量仍维持在高蒸散区间, Ea均值较7月略有缓慢下降, 递减到38.36mm, Ea值变化范围为34.32mm(静宁县) \leq Ea \leq 42.44mm(泾川县), 9月中旬灌木林实际蒸散发开始缓慢减少, Ea均值下降到28.74mm, 但泾川县、灵台县和崇信县境内的灌木林仍维持在高蒸散区间, 崆峒区、华亭市、庄浪县和静宁县区域内灌木林实际蒸散量开始缓慢递减, 变化范围为25.35mm(庄浪县) \leq Ea \leq 31.72mm(灵台县); 从10月开始灌木林实际蒸散量Ea值迅速减少, Ea均值下降到18.58mm, 比4月份Ea均值更低, 全域灌木林实际蒸散量回落到低蒸散区间, Ea值变化范围为16.66mm(静宁县) \leq Ea \leq 20.11mm(灵台县)。

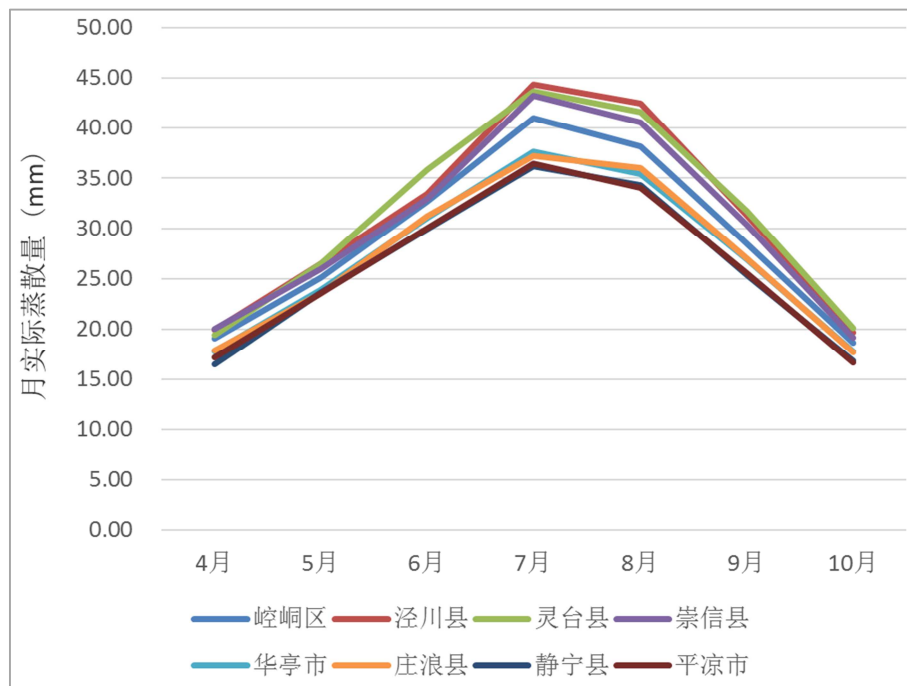


图2 不同区域灌木林生长期(4—10月)实际蒸散量月际变化。

(3) 草地

草地生长期蒸散耗水量月际变化和乔木林、灌木林具有一致性特征, 同样呈现较为明显的倒“U”型月变化分布特征(见图3), 即4~5月草地月蒸散耗水量偏低并且缓慢升高, Ea值变化范围为13.25mm(静宁县) \leq Ea \leq 21.23mm(泾川县、灵台县), 均值从14.97mm提高到20.07mm, 6月开始逐渐升高, 均值从5月份的20.07mm提高到26.01mm, Ea值变化范围为23.95mm(静宁县) \leq Ea \leq 28.75mm(灵台县), 7月中旬草地月实际蒸散量Ea达到最大值(35.97mm, 泾川县), 草地月实际蒸散量均值

提高到33.02mm, 8月份草地仍维持在高蒸散区间, 草地月实际蒸散量Ea均值较7月略有缓慢下降, 为31.28mm, Ea值变化范围为27.85mm(静宁县) \leq Ea \leq 34.60mm(泾川县), 9月中旬草地月实际蒸散发开始缓慢减少, Ea均值下降到23.77mm, 除静宁县外其他地区草地仍维持在中高蒸散区间, Ea值变化范围为20.82mm(静宁县) \leq Ea \leq 26.36mm(灵台县); 从10月开始草地月实际蒸散量Ea值出现迅速减少, Ea均值下降到14.98mm, 基本回落到4月份Ea均值水平(14.97mm), Ea值变化范围为13.52mm(庄浪县、静宁县) \leq Ea \leq 16.21mm(灵台县)。

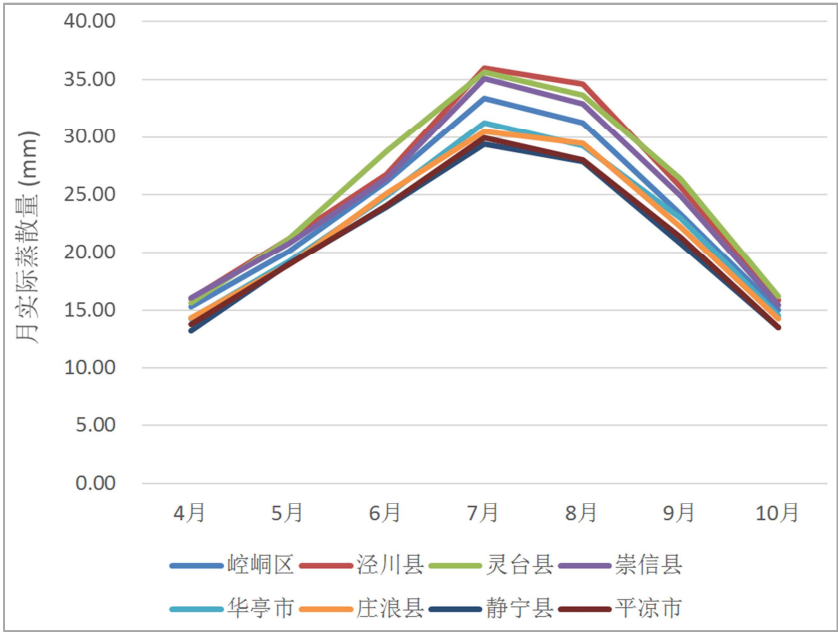


图3 不同区域草地生长期（4—10月）实际蒸散量月际变化。

5.3. 不同类型植被生长期（4—10月）月实际蒸散量时空变化

(1) 乔木林

乔木林Ea值月际变化差异分析：从图4可以看出，乔木林生长期（4—10月）内月实际蒸散量Ea值4月和10月最低且没有显著差异，Ea曲线基本重合，7月达到最大值，从小到大排序依次为：Ea（10月）≈Ea（4月）<Ea（5月）<Ea（9月）<Ea（6月）<Ea（8月）<Ea（7月）。

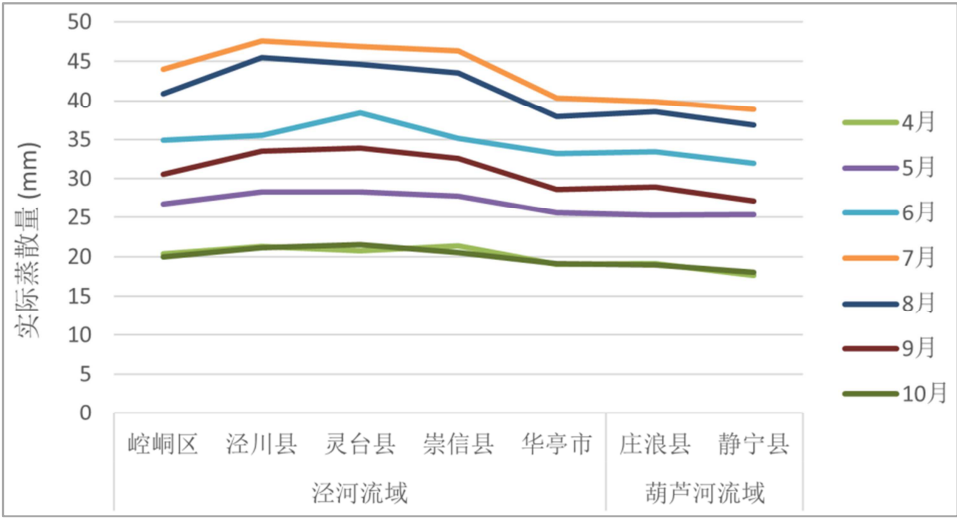


图4 乔木林在不同区域月实际蒸散量（Ea）变化曲线。

乔木林Ea值空间分布变化：通过图4中乔木林在不同区域变化趋势分析，可以看出，乔木林生长期（4—10月）内，实际蒸散量Ea值自东向西具有明显的梯度递减特征，即从泾河流域的崆峒区—泾川县—灵台县—崇信县—华亭市向葫芦河流域的庄浪县—静宁县呈现从高到低梯度递减的趋势，其中泾川县和灵台县出现各月Ea最大值，静宁县出现各月Ea最小值。

(2) 灌木林

灌木林Ea值月际变化差异分析：从图5可以看出，灌木林生长期（4—10月）内月实际蒸散量4月Ea值和10月Ea值最小，在平凉市境内不同区域、不同流域基本上为同一水平且没有显著差异，4月、10月Ea曲线也基本重合，5月、6月、7月、8月、9月Ea值存在明显的梯度差异，其中7月份平凉市全境Ea值达到最大值，灌木林Ea值月际变化从小到大排序依次为：Ea（10月）≈Ea（4月）<Ea（5月）<Ea（9月）<Ea（6月）<Ea（8月）<Ea（7月）。

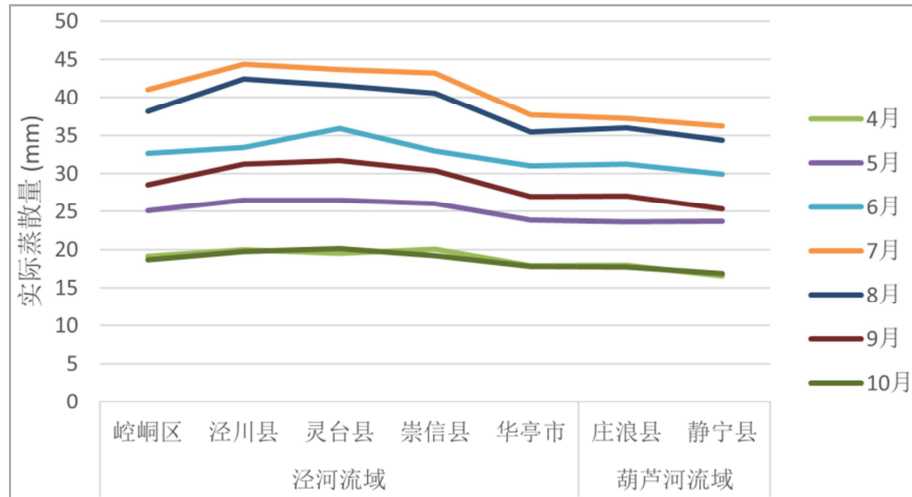


图5 灌木林在不同区域月实际蒸散量（Ea）变化曲线。

灌木林Ea值空间分布变化：通过图5中灌木林在不同区域变化趋势分析，可以看出，灌木林生长期（4—10月）内，各月实际蒸散量Ea值自东向西具有明显的梯度递减特征，即从泾河流域的崆峒区—泾川县—灵台县—崇信县—华亭市向葫芦河流域的庄浪县—静宁县呈现从高到低梯度递减的趋势，其中泾川县和灵台县出现各月灌木林Ea最大值，静宁县出现各月灌木林Ea最小值。

(3)草地

草地Ea值月际变化差异分析：从图6可以看出，草地生长期（4—10月）内月实际蒸散量Ea值4月和10月最低，在平凉市境内不同区域、不同流域基本上为同一水平且没有显著差异，Ea曲线也基本重合，5月、6月、7月、8月、9月Ea值存在明显的梯度差异，其中7月份平凉市全境Ea值达到最大值，草地Ea值月际变化从小到大排序依次为：Ea（10月） \approx Ea（4月）<Ea（5月）<Ea（9月）<Ea（6月）<Ea（8月）<Ea（7月）。

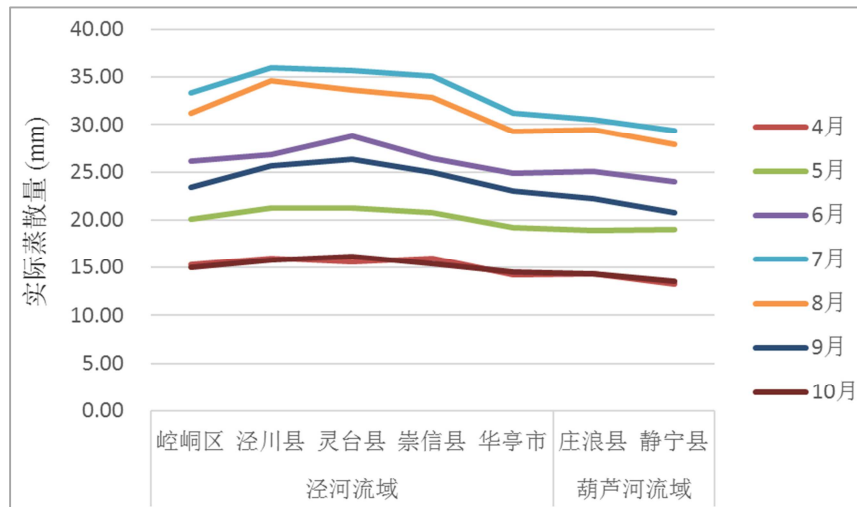


图6 草地在不同区域月实际蒸散量（Ea）变化曲线。

草地Ea值空间分布变化：通过图6中草地在不同区域变化趋势分析，可以看出，草地生长期（4—10月）内，各月实际蒸散量Ea值自东向西具有明显的梯度递减特征，即从泾河流域的崆峒区—泾川县—灵台县—崇信县—华亭市向葫芦河流域的庄浪县—静宁县呈现从高到低梯度递减的趋势，其中泾川县和灵台县出现各月草地Ea最大值，静宁县出现各月草地Ea最小值。

5.4. 植被类型差异对实际蒸散耗水总量的影响分析

研究结果表明，不同植被类型植被生长期（4—10月）的实际蒸散总量差异较大（见表5），从表5中可以看出，

平凉市境内乔木林生长期实际蒸散总量平均为216.55mm，灌木林生长期实际蒸散总量平均为202.33mm，草地生长期实际蒸散耗水总量平均为164.09mm，为乔木林的75.8%、灌木林的81.1%，其中高覆盖度草地（覆盖度大于50%）实际蒸散总量平均为168.09mm，中覆盖度草地（覆盖度20%~50%）实际蒸散总量平均为164.13mm，低覆盖度草地（覆盖度5%~20%）实际蒸散总量平均为160.06mm。不同植被类型生长期（4—10月）实际蒸散总量存在明显的差异，乔木林高于灌木林，灌木林高于草地。草地生长期实际蒸散总量随覆盖度增加而增大，高覆盖度草地实际的

蒸散总量大于中覆盖度草地，中覆盖度草地大于低覆盖度草地。

5.5. 植被实际蒸散耗水总量的空间分布特征

从空间分布分析，相同类型植被实际蒸散耗水总量在不同区域也存在明显的差异，同一植被类型生长期实际蒸散耗水总量泾河流域都明显高于葫芦河流域（见表4和图8）。从图7可以看出，平凉市境内同一类型植被生长期实际蒸散耗水总量灵台县最大，静宁县最低，极差为38.55mm，平凉市乔木林蒸散总量平均为216.55mm，按大小依次为：灵台县234.35mm、泾川县232.85mm、崇信县227.18mm、崆峒区217.46mm、庄浪县204.28mm、华亭市203.89mm、静宁县

195.8mm，按大小排序为：灵台县>泾川县>崇信县>崆峒区>庄浪县>华亭市>静宁县；灌木林蒸散总量平均为196.47mm，按大小排序为：灵台县219.00mm>泾川县217.68mm>崇信县212.32mm>崆峒区203.17mm>庄浪县190.65mm>华亭市190.60mm>静宁县182.86mm，极差为36.14mm；草地蒸散总量平均为183.5mm，按大小排序为：灵台县177.47mm>泾川县176.09mm>崇信县171.55mm>崆峒区164.50mm>华亭市156.45mm>庄浪县154.88mm>静宁县147.72mm，极差为29.75mm，见表5。因此，植被生长期实际蒸散耗水总量在流域尺度空间分布上呈现从泾河流域向葫芦河流域递减的显著特征。

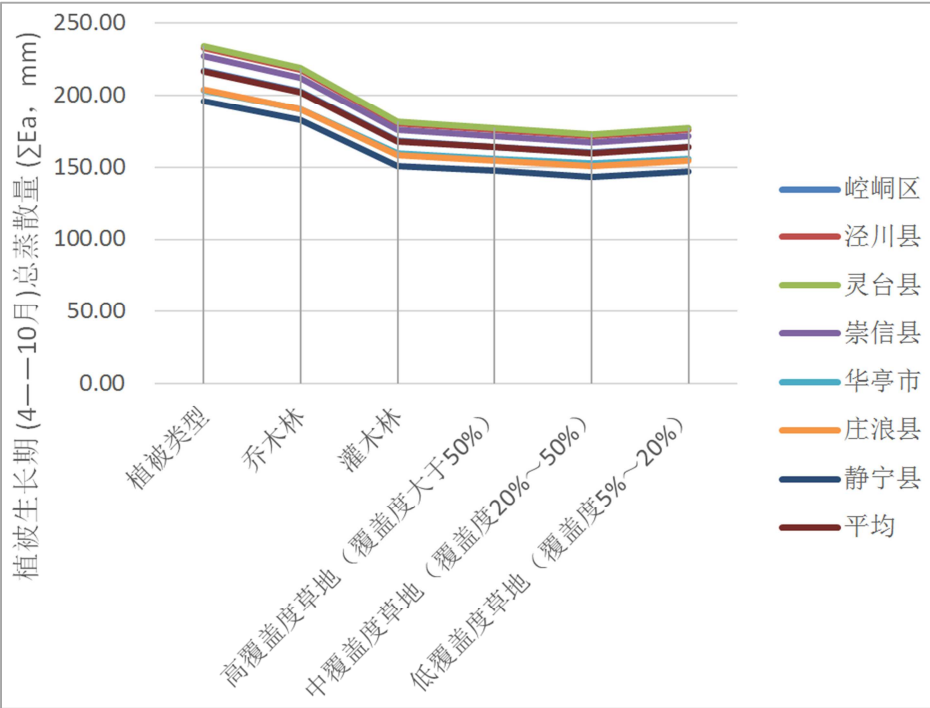


图7 不同区域不同类型植被生长期（4—10月）实际蒸散总量比较（ΣEa，mm）。

表4 不同流域相同类型林草植被生长期（4—10月）实际蒸散总量（ΣEa，mm）。

植被类型	泾河流域	葫芦河流域
乔木林	223.15	200.04
灌木林	208.56	186.75
高覆盖度草地（覆盖度大于50%）	173.34	154.98
中覆盖度草地（覆盖度20%~50%）	169.25	151.33
低覆盖度草地（覆盖度5%~20%）	165.05	147.58
草地平均	169.21	151.30

表5 不同类型林草植被生长期（4—10月）实际蒸散总量（ΣEa，mm）。

植被类型	崆峒区	泾川县	灵台县	崇信县	华亭市	庄浪县	静宁县	平均
乔木林	217.46	232.85	234.35	227.18	203.89	204.28	195.80	216.55
灌木林	203.17	217.68	219.00	212.32	190.60	190.65	182.86	202.33
高覆盖度草地（覆盖度大于50%）	168.56	180.51	181.83	175.87	159.91	158.55	151.41	168.09
中覆盖度草地（覆盖度20%~50%）	164.54	176.14	177.51	171.60	156.47	154.91	147.75	164.13
低覆盖度草地（覆盖度5%~20%）	160.39	171.63	173.06	167.18	152.96	151.18	143.99	160.06
草地平均	164.50	176.09	177.47	171.55	156.45	154.88	147.72	164.09

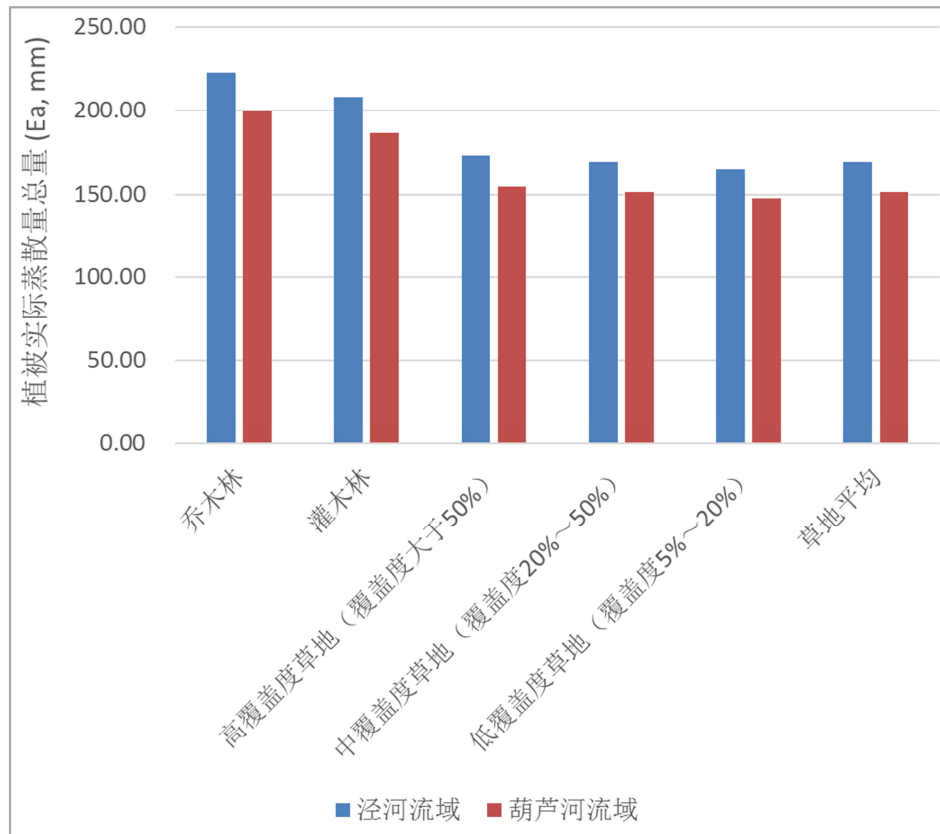


图8 不同流域相同类型林草植被生长期（4—10月）实际蒸散总量比较（ $\sum Ea$, mm）。

5.6. 平凉市林草植被蒸散耗水规律

5.6.1. 不同植被类型蒸散耗水差异

同一区域地点在气候条件相同的情况下，但由于不同类型植被的生物学特性有很大差异，导致植被自身蒸腾耗水量出现很大差异，从而直接影响植被的实际蒸散耗水量。

从图9可以看出，本地区不同类型植被的实际蒸散耗水量都存在同样趋势：乔木林耗水量>灌木林耗水量>草地耗水量，草地蒸散耗水量随着覆盖度增大而增加。当然，可以肯定的是同一地点不同树种草种间蒸散耗水量也存在差异。

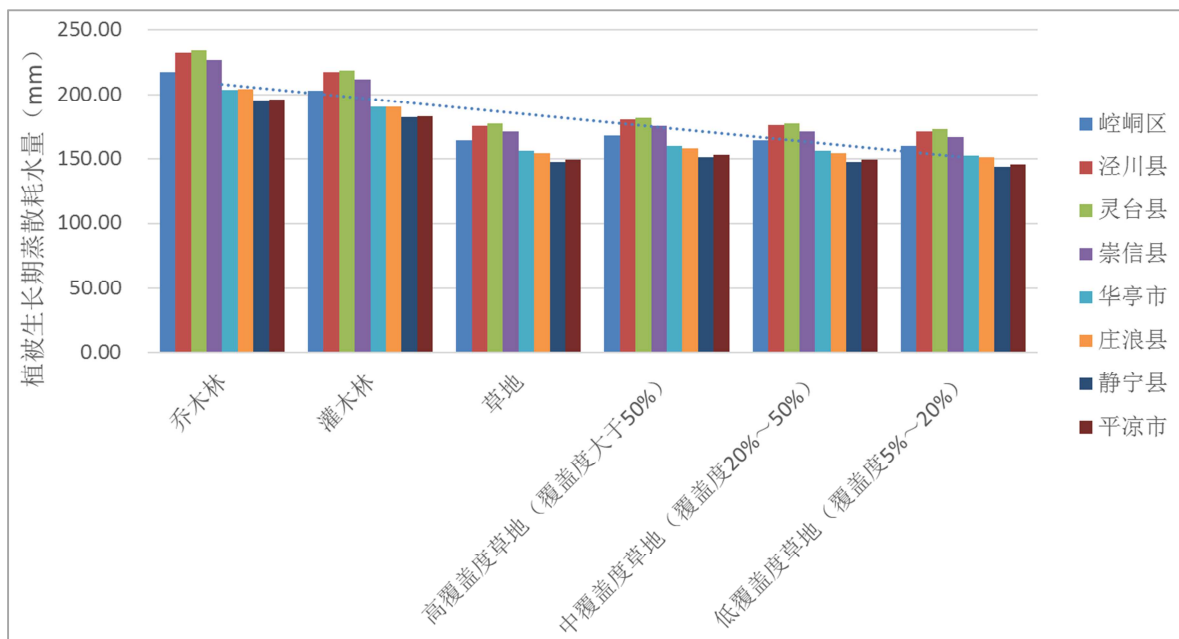


图9 不同区域不同类型植被生长期（4—10月）实际蒸散耗水量比较。

5.6.2. 植被生长期月际蒸散耗水特征

受气温、降水等因素的影响，植被生长期不同月份间的蒸腾速率不同，植被蒸散耗水量差别较大[14, 15]。从图1、图2、图3可以看出，本地区植被生长季蒸散耗水的基本特征是：植被实际蒸散量变化呈现明显的双峰变化分布特征，即在植被生长期4月份初的萌芽生长阶段和10月份落叶进入休眠阶段均为蒸散量最低值，主要由于该阶段均为本地区植被生活力最弱的时期，其中最为根本的是植被由于处在萌芽期尚未形成完整的枝叶或者到10月份已经落叶，从而导致叶面积指数急剧下降，几乎丧失蒸腾作用或者没有蒸腾作用，因而大大减少了蒸腾耗水量；5月、6月随着气温逐渐升高、降水逐渐增加大部分植被快速生

长，植被自身的蒸腾作用和土壤蒸发都大大增强，蒸散耗水量大大增加，经计算，从4月到6月植被蒸散耗水量平均增加了74.31%；7月、8月本地区所有类型植被实际蒸散耗水量均达到最大值，经计算，7月和8月植被实际蒸散耗水量差别不大，耗水量7月比8月平均高出2.13mm，呈现明显的双峰特征[15]；大部分区域植被的蒸散耗水量从9月开始出现明显的下降，与8月份相比较蒸散耗水量平均减少7.42mm，平均下降24.31%；10月份植被蒸散耗水量快速减少到4月初的耗水水平，与8月份相比较蒸散耗水量平均减少15.67mm，平均下降51.52%，下降幅度最大。植被蒸散耗水量随气温、降水、风速、降水日数变化特征曲线见图10。

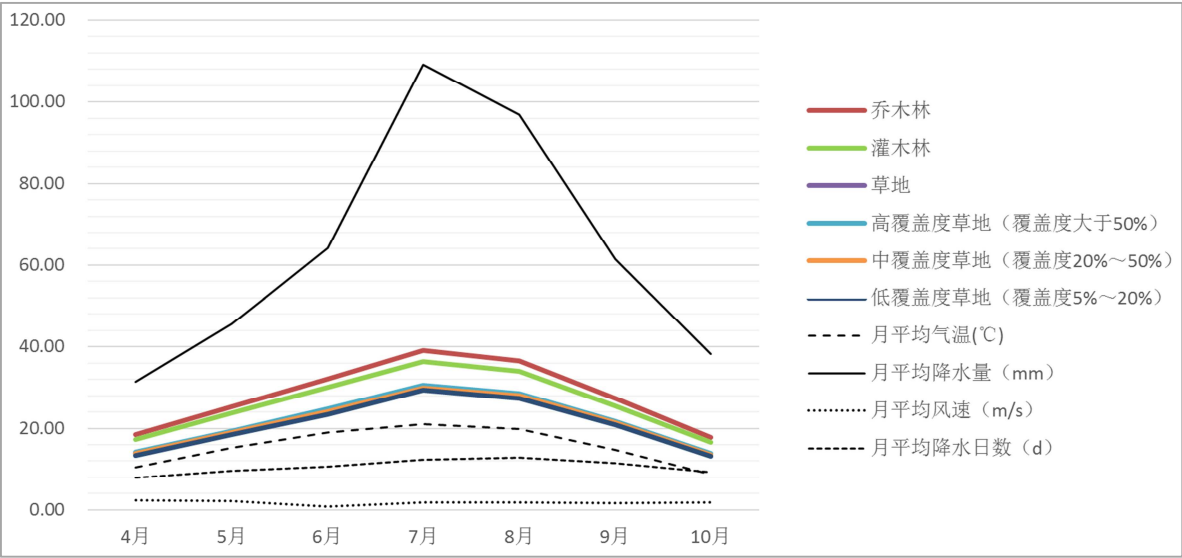


图10 不同类型植被蒸散耗水量随气温、降水、风速、降水日数变化特征曲线。

5.6.3. 植被生长期蒸散耗水量空间分布特征

(1)蒸散耗水量区域尺度变化

从区域分布上看，平凉市植被蒸散耗水量总体上东部高于西部、南部高于北部。经计算同一类型植被生长期蒸散耗水总量东西平均相差19.43mm，东部乔木林、灌木林和草地分别比西部平均高23.11mm、21.8mm、17.91mm，其中植被蒸散耗水量东部的灵台县最高，西部的静宁县最低，同一类型植被灵台县比静宁县平均分别高38.55mm、36.14mm、29.75mm；经计算，南部同一类型植被生长期蒸散耗水量比北部平均略高2.2mm。因此，本地区植被蒸

散耗水量的差异主要表现在东西差异上，南北差异不大。见表6和图11。

(2)植被蒸散耗水量流域尺度变化

从表6可以看出，植被生长期实际蒸散耗水量在流域尺度空间分布上呈现从泾河流域向葫芦河流域递减的显著特征，植被蒸散耗水量泾河流域比葫芦河流域平均高出19.43mm，其中乔木林蒸散耗水量高23.11mm，灌木林蒸散耗水量高21.8mm，草地蒸散耗水量高17.91mm，蒸散耗水量流域间差异显著。

表6 植被生长期蒸散耗水量空间差异。

植被类型	植被平均蒸散耗水量（mm）					
	北部平均	南部平均	南北差异	东部泾河流域	西部葫芦河流域	东西差异
乔木林	215.37	217.43	2.06	223.15	200.04	23.11
灌木林	201.24	203.14	1.91	208.56	186.75	21.80
草地平均	162.77	165.09	2.32	169.21	151.30	17.91
高覆盖度草地（覆盖度大于50%）	166.83	169.04	2.21	173.34	154.98	18.35
中覆盖度草地（覆盖度20%~50%）	162.81	165.12	2.31	169.25	151.33	17.92
低覆盖度草地（覆盖度5%~20%）	158.67	161.10	2.43	165.05	147.58	17.46
均差	177.95	180.15	2.20	184.76	165.33	19.43

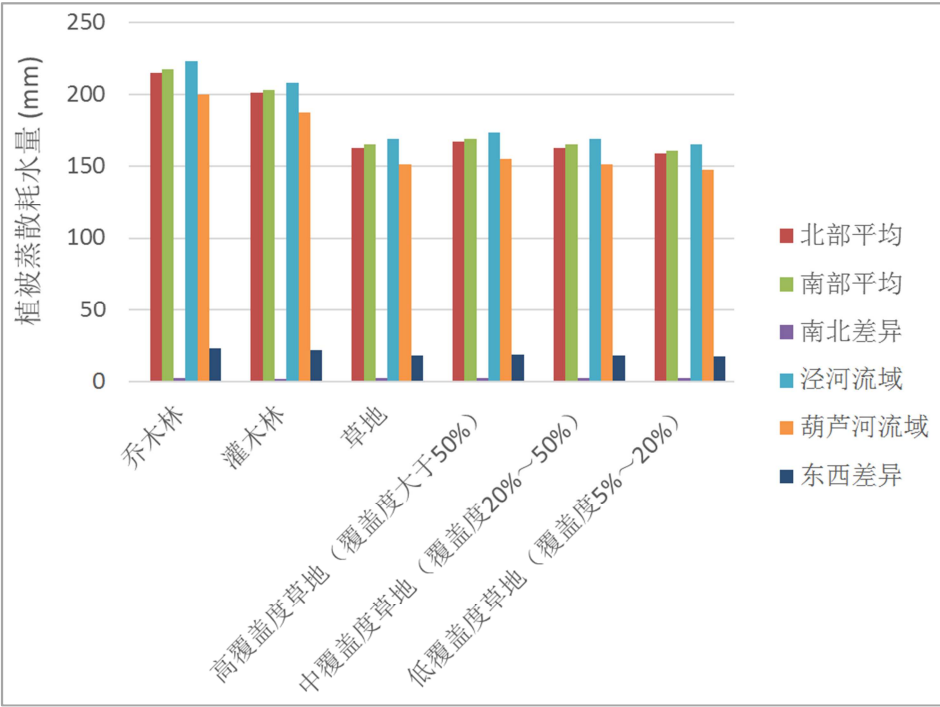


图11 不同类型植被生长期蒸散耗水量空间分布异质性。

6. 植被蒸散耗水的环境因子响应

通常讲，植被实际蒸散量主要受以下三方面的因素制约：①大气的干燥程度、辐射条件及风力大小所综合决定的蒸发势。②土壤湿润程度和导水能力所决定的土壤供水状况。③植被状况，包括植物水分输导组织、叶片气孔数量与大小以及群体结构对湍流交换系数的影响等[16]。因此在这个意义上林草植被的实际蒸散量是蒸散势、土壤含水量及植被覆盖状况的函数。由于植被蒸散耗水包括土壤蒸发和植被蒸腾，因此，影响林草植被蒸散耗水的因子主要包括土壤因素、气象因素和植被类型特征。

6.1. 植被实际蒸散量最佳子集回归分析

最优子集（Best Subset Selection）回归分析基本原理和方法：从零号模型（null model） M_0 开始，这个模型只有截距项而没有任何自变量。然后用不同的特征组合进行拟合，从中分别挑选出一个最好的模型（RSS最小或 R^2 最大），也就是包含1个特征的模型 M_1 ，包含2个特征的模型 M_2 ，直

至包含 p 个特征的模型 M_p 。然后根据拟合系数 R^2 、交叉验证误差 C_p 、Std. Error或拟合修正系数adjusted R^2 从这总共 $p+1$ 个模型中选出其中最好的模型。这个最好模型所配置的特征就是筛选出的特征。优点：因为遍历了所有可能的特征组合，因此筛选出的特征必定是最优特征组合。

为了详细阐明植被实际蒸散量的气候影响，本研究分别选取平凉市月平均气温（ $^{\circ}C$ ）、月平均降水量（mm）、月平均风速（m/s）、月平均降水天数（d）作为自变量因子，采用最佳子集回归分析方法，系统分析不同类型林草植被实际蒸散量的最佳气候影响因子及其影响程度大小。本文采用SigmaPlot分析软件进行最优子集回归分析。

6.1.1. 最佳子集回归分析基础数据

利用气候模型计算的平凉市不同类型林草植被月实际蒸散量（mm）作为因变量因子、平凉市植被生长期（4—10月）月平均气象因子作为自变量因子，基础数据见表7和表8。

表7 平凉市不同植被类型生长期月实际蒸散量。

月份	生长期月实际蒸散量 E_a （mm）					
	乔木林	灌木林	高覆盖度草地 （覆盖度大于50%）	中覆盖度草地 （覆盖度20%~50%）	低覆盖度草地 （覆盖度5%~20%）	草地平均
4月	18.43	17.24	14.18	13.81	13.43	13.81
5月	25.24	23.69	19.41	18.91	18.40	18.91
6月	32.13	29.99	24.71	24.09	23.44	24.08
7月	39.06	36.45	30.60	29.97	29.32	29.96
8月	36.48	34.05	28.61	28.02	27.42	28.02
9月	27.26	25.52	21.73	21.33	20.92	21.32
10月	17.87	16.66	13.84	13.52	13.19	13.52

表8 平凉市植被生长期（4—10月）月气象特征值。

月份	月平均气温（℃）	月平均降水量（mm）	月平均风速（m/s）	月平均降水天数（d）
4月	10.50	31.40	2.40	7.9
5月	15.20	45.60	2.20	9.6
6月	19.00	64.10	0.90	10.7
7月	21.10	109.20	1.90	12.4
8月	19.90	96.90	1.90	12.9
9月	14.80	61.50	1.70	11.5
10月	8.70	38.30	1.80	9.2

6.1.2. 不同植被类型实际蒸散量最佳子集回归分析及结果

表9. 最优子集回归分析中的自变量描述。

最优子集回归分析中的自变量因子：

Variable	Symbol
月平均气温（℃）	A
月平均降水量（mm）	B
月平均风速（m/s）	C
月平均降水天数（d）	D

不同类型植被实际蒸散量最佳子集回归分析结果分别见表10、表11、表12、表13、表14和表15。

(1) 乔木林

表10. 乔木林最优子集回归分析结果。

Model #	Variable	Cp	Rsqr	Adj Rsqr	MSerr	A	B	C	D
1	1	5320.805	0.964	0.956	3.002	*			
2	2	192.071	0.999	0.998	0.136	*	*		
3	3	27.295	1.000	1.000	0.025	*	*	*	
4	4	5.000	1.000	1.000	0.003	*	*	*	*

(2) 灌木林

表11. 灌木林最优子集回归分析结果。

Model #	Variable	Cp	Rsqr	Adj Rsqr	MSerr	A	B	C	D
1	1	1921.558	0.965	0.958	2.501	*			
2	2	65.292	0.999	0.998	0.108	*	*		
3	3	17.680	1.000	0.999	0.036	*	*	*	
4	4	5.000	1.000	1.000	0.006	*	*	*	*

(3) 草地

表12. 草地林最优子集回归分析结果。

Model #	Variable	Cp	Rsqr	Adj Rsqr	MSerr	A	B	C	D
1	1	136.233	0.948	0.938	2.577	*			
2	2	8.822	0.996	0.995	0.227	*	*		
3	3	3.516	0.999	0.998	0.078	*	*		*
4	4	5.000	0.999	0.998	0.093	*	*	*	*

(4) 高覆盖度草地（覆盖度大于50%）

表13. 高覆盖度草地（覆盖度大于50%）最优子集回归分析结果。

Model #	Variable	Cp	Rsqr	Adj Rsqr	MSerr	A	B	C	D
1	1	160.181	0.952	0.942	2.501	*			
2	2	9.592	0.997	0.995	0.203	*	*		
3	3	3.827	0.999	0.998	0.072	*	*		*
4	4	5.000	0.999	0.998	0.077	*	*	*	*

(5) 中覆盖度草地（覆盖度20%~50%）

表14. 中覆盖度草地（覆盖度20%~50%）最优子集回归分析结果。

Model #	Variable	Cp	Rsqr	Adj Rsqr	MSerr	A	B	C	D
1	1	131.038	0.949	0.938	2.579	*			
2	2	8.582	0.996	0.994	0.230	*	*		
3	3	3.525	0.999	0.998	0.081	*	*		*
4	4	5.000	0.999	0.998	0.096	*	*	*	*

(6) 低覆盖度草地（覆盖度5%~20%）

表15. 低覆盖度草地（覆盖度5%~20%）最优子集回归分析结果。

Model #	Variable	Cp	Rsqr	Adj Rsqr	MSerr	A	B	C	D
1	1	110.916	0.945	0.934	2.669	*			
2	2	7.918	0.996	0.994	0.261	*	*		
3	3	3.289	0.999	0.998	0.089	*	*		*
4	4	5.000	0.999	0.997	0.117	*	*	*	*

6.1.3. 不同植被类型实际蒸散量最佳子集回归结果分析

以上最优子集回归结果显示：

①所有类型植被月实际蒸散量随着自变量因子数（Variable）增加其对应的模型拟合系数 R^2 值和拟合修正系数adjusted R^2 值均随之增大，在所有植被类型中Model #3和Model #4模型的 R^2 值达到最大，充分说明因子A（月平均气温（ $^{\circ}\text{C}$ ））、B（月平均降水量（mm））、C（月平均风速（m/s））、D（月平均降水天数（d））与所有植被类型月实际蒸散量存在显著相关性；

②随着自变量因子数增加，乔木林和灌木林月实际蒸散量最优子集回归模型中交叉验证误差Cp值随之减小，其中Model #4的Cp值达到最小，说明Model #4模型最优；

③结合①和②分别确定不同植被类型月实际蒸散量的最优子集回归模型：乔木林月实际蒸散量最优子集为Model #4(ABCD, $R^2=1.000$, Adj Rsqr=1.000, Cp=5.000)，灌木林月实际蒸散量最优子集为Model #4 (ABCD,

$R^2=1.000$, Adj Rsqr=1.000, Cp=5.000)，草地月实际蒸散量最优子集为Model #3 (ABD, $R^2=0.999$, Adj Rsqr=0.998, Cp=3.516)，其中高覆盖度草地（覆盖度大于50%）Cp=3.827，中覆盖度草地（覆盖度20%~50%）Cp=3.525，低覆盖度草地（覆盖度5%~20%）Cp=3.289；

因此④，由于拟合系数 R^2 值达到1.00，乔木林和灌木林月实际蒸散量可以通过Model #4 (ABCD, $R^2=1.000$, Adj Rsqr=1.000, Cp=5.000)中的4个全部自变量得到最精确预测；对于草地而言，不同覆盖度草地的月实际蒸散量通过Model #3(ABD, $R^2=0.999$, Adj Rsqr=0.998, Cp=3.516)3个自变量预测的结果最为精确，也可以通过Model #4 (ABCD, $R^2=0.999$, Adj Rsqr=0.998, Cp=3.516)4个全部自变量得到较为精确的预测值。

⑤对于不同植被类型来说，4个自变量对于植被月实际蒸散量回归的显著性存在差异，从p值大小可以得到反映，见表16。

表16 不同类型植被月实际蒸散量最优子集回归模型p值比较。

自变量 (Variable)	符号 (Symbol)	乔木林	灌木林	草地	高覆盖	中覆盖	低覆盖
月平均气温 ($^{\circ}\text{C}$)	A	<0.001	<0.001	0.008	0.006	0.008	0.011
月平均降水量 (mm)	B	<0.001	0.002	0.034	0.027	0.035	0.043
月平均风速 (m/s)	C	0.010	0.038	0.547	0.459	0.544	0.645
月平均降水天数 (d)	D	0.039	0.062	0.158	0.158	0.163	0.163

从表9可以看出，影响乔木林和灌木林月实际蒸散量的自变量因子中差异显著性从大到小排序依次为月平均气温（ $^{\circ}\text{C}$ ）（A）、月平均降水量（mm）（B）、月平均风速（m/s）（C）、月平均降水天数（d）（D），其中主要影响因子为月平均气温和月平均降水量，说明辐射和降水是主导影响因子；影响草地月实际蒸散量的自变量因子中差异显著性从大到小排序依次为月平均气温（ $^{\circ}\text{C}$ ）（A）、月平均降水量（mm）（B）、月平均降水天数（d）、月平均风速（m/s）（C），说明影响草地月实际蒸散量的主导气象因子为月平均气温和月平均降水量，其次为月平均降水天数（ $p=0.158>0.05$ ），相对于乔木林和灌木林，月平均风速对于草地月实际蒸散量的影响相对较小（ $p=0.547>0.05$ ）。由此可见：

⑥在所有影响因子中由于辐射和降水对于蒸散量的影响最为明显，可以通过气温和降水量为主要因子的模型计算植被蒸散量，从而使Zhang等的蒸散量经验模型的可靠性得到验证；除此之外还可以建立气温和降水量的二元回归模型进行植被蒸散量预测。

⑦基于结果分析③和④，根据当地气候特征可以采用多变量因子的多元回归分析模型来计算本地区不同植被类型的蒸散量是完全可行和可靠的。

6.2. 不同类型植被实际蒸散量线性回归分析

依据上述最优子集回归分析结果的可靠性，为了进一步分析不同植被类型蒸散量与多种影响因子之间的相关关系，采用一元或多元回归分析方法，以确定植被月实际蒸散量与影响因子之间的定量关系。一元回归能够更加直

接地反映植被蒸散量与影响因子之间的定量关系，回归结果可以用于单个因子对于蒸散量的影响评价，而多元回归能够更加客观地反映植被蒸散量与影响因子之间的交叉影响，回归结果可用于比较精确地预测植被蒸散量，进而用于计算特定范围内植被的蒸散耗水量。变量名称及变量符号见表17。

表17 不同类型植被实际蒸散量线性回归分析变量。

因变量名称 (y)	乔木林月实际蒸散量 (mm)	灌木林月实际蒸散量 (mm)	草地月实际蒸散量 (mm)	高覆盖度草地月实际蒸散量 (mm)	中覆盖度草地月实际蒸散量 (mm)	低覆盖度草地月实际蒸散量 (mm)
因变量符号	y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6
自变量名称 (x)	平均温度 (°C)	平均降水量 (mm)	平均风速 (m/s)	降水天数 (d)		
自变量符号	X1	X2	X3	X4		

6.2.1. 不同类型植被实际蒸散量基于气温或降水量的一元线性回归分析

表18 一元回归分析结果统计。

因变量 (y, 月实际蒸散量)	回归方程及相关系数 (x1, 月平均气温)	回归方程及相关系数 (x2, 月平均降水量)
乔木林 (y1)	Y1 = 1.233 + (1.720 * x1), R²=0.964	Y1 = 10.80 + (0.270 * x2), R²=0.918
灌木林 (y2)	Y2 = 1.207 + (1.604 * x1), R²=0.965	Y2 = 10.156 + (0.252 * x2), R²=0.916
草地 (y3)	Y3 = 0.670 + (1.327 * x1), R²=0.948	Y3 = 7.838 + (0.212 * x2), R²=0.933
高覆盖度草地 (覆盖度大于50%) (y4)	Y4 = 0.750 + (1.354 * x1), R²=0.952	y 4 = 8.106 + (0.216 * x2), R²=0.930
中覆盖度草地 (覆盖度20%~50%) (y5)	y 5 = 0.665 + (1.328 * x1), R²=0.949	y 5 = 7.836 + (0.212 * x2), R²=0.933
低覆盖度草地 (覆盖度5%~20%) (y6)	y 6 = 0.580 + (1.301 * x1), R²=0.945	y 6 = 7.559 + (0.209 * x2), R²=0.936

一元线性回归结果表明（见表18）：
①所有植被类型的实际蒸散量与月平均气温或月降水量都存在高度正相关，R²值均超过0.9，即植被实际蒸散量随着月平均气温或月降水量的增加而增大，反之亦然。从回归方程可以计算出，月平均气温每升高或降低1°C，乔木林、灌木林、草地的月实际蒸散量分别增加或减少2.953mm、2.811mm、1.997mm，其中高覆盖度草地（覆盖度大于50%）增加或减少2.104mm、中覆盖度草地（覆盖度20%~50%）增加或减少1.993mm、低覆盖度草地（覆盖度5%~20%）增加或减少1.881mm；月平均降水量每增加或减少1mm，乔木林、灌木林、草地的月实际蒸散量分别增加或减少11.07mm、10.41mm、8.05mm，其中高覆盖度草地（覆盖度大于50%）增加或减少8.322mm、中覆盖度草地（覆盖度20%~50%）增加或减少8.048mm、低覆盖度草地（覆盖度5%~20%）增加或减少7.768mm。不同类型植被月实际蒸散量随月平均气温和月降水量的线性变化见表19。

表19 不同类型植被月实际蒸散量随月平均气温和月降水量的变化量（mm）。

植被类型	月平均气温变化 (+/-1°C)	月平均降水量变化 (+/-1mm)
乔木林	2.953	11.07
灌木林	2.811	10.41
草地	1.997	8.05
高覆盖度草地 (覆盖度大于50%)	2.104	8.322
中覆盖度草地 (覆盖度20%~50%)	1.993	8.048
低覆盖度草地 (覆盖度5%~20%)	1.881	7.768

②对比发现，月平均降水量对植被月实际蒸散量的影响程度远远大于月平均气温的影响。
③在气温和降水2个因子相同条件影响和作用下，对不同类型植被的月实际蒸散量影响也存在差异，影响大小排序为：乔木林>灌木林>草地，其中对草地的影响随着覆盖度的增加而略微增大。

6.2.2. 不同类型植被实际蒸散量基于气温和降水量的二元线性回归分析

表20 二元回归分析结果统计。

因变量 (y, 月实际蒸散量)	回归方程及相关系数 (自变量: x1/月平均气温、x2/月平均降水量)
乔木林 (y1)	Y1 = 3.791 + (1.085 * x1) + (0.115 * x2), R²=0.999
灌木林 (y2)	Y2 = 3.544 + (1.024 * x1) + (0.105 * x2), R²=0.999
草地 (y3)	Y3 = 2.998 + (0.749 * x1) + (0.105 * x2), R²=0.996
高覆盖度草地 (覆盖度大于50%) (y4)	y 4 = 3.050 + (0.783 * x1) + (0.104 * x2), R²=0.997
中覆盖度草地 (覆盖度20%~50%) (y5)	y5 = 2.992 + (0.750 * x1) + (0.105 * x2), R²=0.996
低覆盖度草地 (覆盖度5%~20%) (y6)	y 6 = 2.938 + (0.715 * x1) + (0.106 * x2), R²=0.996

从回归方程可以看出（见表20）：①所有植被类型的实际蒸散量与月平均气温和月降水量都存在明显的正相关， $R^2>0.99$ ，即所有类型植被的月实际蒸散量随着月平均气温和月降水量的增加而增大，反之亦然。从回归方程可以计算出，月平均气温每升高或降低 1°C 、同时月平均降水量每增加或减少 1mm ，乔木林、灌木林、草地的月实际蒸散量分别增加或减少 4.991mm 、 4.673mm 、 3.852mm ，

其中高覆盖度草地（覆盖度大于 50% ）增加或减少 3.937mm 、中覆盖度草地（覆盖度 $20\%\sim 50\%$ ）增加或减少 3.847mm 、低覆盖度草地（覆盖度 $5\%\sim 20\%$ ）增加或减少 3.759mm 。②在气温和降水2个因子相同条件共同影响和作用下，对不同类型植被的月实际蒸散量影响也存在差异，影响大小排序为：乔木林>灌木林>草地，其中对草地的影响随着覆盖度的增加而略微增大。

6.2.3. 不同类型植被实际蒸散量多元线性回归分析

表21 多元回归分析结果统计。

因变量（y，月实际蒸散量）	回归方程及相关系数（自变量：x1/月平均气温，x2/月平均降水量，x3/平均风速，x4/降水天数）
乔木林（y1）	$Y1 = 4.059 + (1.031 x1) + (0.111 x2) - (0.558 x3) + (0.177 x4)$ ， $R^2=1.000$
灌木林（y2）	$Y2 = 3.242 + (0.981 x1) + (0.0978 x2) - (0.424 x3) + (0.209x4)$ ， $R^2=1.000$
草地（y3）	$Y3 = -0.479 + (0.737x1) + (0.0772 x2) + (0.512 x4)$ ， $R^2=0.999$
高覆盖度草地（覆盖度大于 50% ）（y4）	$y4 = -0.211 + (0.771 x1) + (0.0777 x2) + (0.481 x4)$ ， $R^2=0.999$
中覆盖度草地（覆盖度 $20\%\sim 50\%$ ）（y5）	$y5 = -0.492 + (0.737 x1) + (0.0772 x2) + (0.513 x4)$ ， $R^2=0.999$
低覆盖度草地（覆盖度 $5\%\sim 20\%$ ）（y6）	$y6 = -0.787 + (0.702 x1) + (0.0767 x2) + (0.549 x4)$ ， $R^2=0.999$

7. 结论

- 本地区植被实际蒸散量变化呈现明显的双峰变化分布特征，即在植被生长期4月份初的萌芽生长阶段和10月份落叶进入休眠阶段均为蒸散量最低值，5月、6月随着植被自身的蒸腾作用和土壤蒸发都增强而大大增加，从4月到6月植被蒸散耗水量平均增加了 74.31% ；7月、8月本地区所有类型植被实际蒸散耗水量均达到最大值，呈现明显的双峰特征；从9月开始出现明显的下降，与8月份相比较蒸散耗水量平均减少 7.42mm ，平均下降 24.31% ；10月份植被蒸散耗水量快速减少到4月初的耗水平，与8月份相比较平均减少 15.67mm ，降幅达 51.52% 。
- 从空间分布上看，平凉市植被蒸散耗水量总体上东部高于西部、南部高于北部、泾河流域高于葫芦河流域。同一类型植被生长期蒸散耗水总量东西平均相差 19.43mm ，南北平均相差 2.2mm ，流域间平均相差 19.43mm ，因此，本地区植被蒸散耗水量的差异主要表现在东西差异上，南北差异不大。
- 影响乔木林和灌木林蒸散量的自变量因子中差异显著性从大到小排序依次为月平均气温（ $^{\circ}\text{C}$ ）、月平均降水量（ mm ）、月平均风速（ m/s ）、月平均降水天数（ d ），其中主要影响因子为月平均气温和月平均降水量，说明辐射和降水主导影响因子；影响草地实际蒸散量的自变量因子中差异显著性从大到小排序依次为月平均气温（ $^{\circ}\text{C}$ ）、月平均降水量（ mm ）、月平均降水天数（ d ）、月平均风速（ m/s ），说明影响草地月实际蒸散量的主导气象因子为月平均气温和月平均降水量，其次为月平均降水天数，相对于乔木林和灌木林，月平均风速对于草地月实际蒸散量的影响相对较小。

致谢

本文为2023年度甘肃省科技计划项目《基于水资源耦合关系的林草植被蒸散耗水特性研究》（23JRRL0006）和2021年度平凉市科技计划项目《基于平凉市生态保护与高质量发展的林草植被恢复与重建关键技术研究示范》（平科任自[2021]2号）的阶段性成果之一。

ORCID

王辅（Wang Fu）：0009-0009-1833-7414
沙小燕（Sha Xiao Yan）：0009-0009-5732-8254
何倩（He Qian）：0009-0007-3393-9697
赵强（Zhao Qiang）：0009-0005-7534-5075
韩芬（Han Fen）：0009-0000-3861-0582
张鹤（Zhang He）：0009-0009-8480-5802

参考文献

- 邵蕊., 黄土高原大规模植被恢复的区域蒸散耗水规律及其生态水文效应 [D]. 兰州大学, 2020.
- 葛鹏, 周梅, 宝虎, 赵鹏武, 王梓璇, 冯倩倩, 石亮, 王鼎, 舒洋, 张波. 森林植被蒸散耗水测定方法研究进展 [J]. 内蒙古林业调查设计, 2017, 40 (03): 101-104.
- 杨宪龙. 黄土高原北部典型灌丛降水再分配特征及其蒸散耗水规律 [D]. 西北农林科技大学, 2016.
- 丰华丽, 夏军, 占车生. 生态环境需水研究现状和展望 [J]. 地理科学进展, 2003, (06): 591-598.
- 王彦辉, 熊伟, 于澎涛, 沈振西, 郭明春, 管伟, 马长明, 叶兵, 郭浩. 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.

- [6] 鱼腾飞, 冯起, 司建华, 席海洋, 陈丽娟. 遥感结合地面观测估算陆地生态系统蒸散发研究综述 [D]. 地球科学进展, 2011, 26 (12): 1260-1268.
- [7] 闵庆文, 何永涛, 李文华, 李贵才. 基于农业气象学原理的林地生态需水量估算——以泾河流域为例 [J]. 生态学报, 2004 (10): 2130-2135.
- [8] 闵庆文, 耿艳辉. 泾河流域草地生态需水量的估算与分析 [J]. 资源科学, 2005, 27 (04): 14-17.
- [9] 朱德兰, 杨涛, 王得祥, 蔺雨阳, 钱红格, 周金星. 黄土丘陵沟壑区三种不同植被土壤水分动态及蒸散耗水规律研究 [J]. 水土保持研究, 2009, 01.
- [10] 刘增进, 柴红敏, 李宝萍. 豫西黄土丘陵区林草植被蒸散量估算研究 [J]. 灌溉排水学报, 2012, 31 (03): 99-102+138.
- [11] 司建华, 冯起, 张小由, 张艳武, 苏永红. 植物蒸散耗水量测定方法研究进展 [J]. 水科学进展, 2005 (03): 450-459, 2006 (04): 19-25+32.
- [12] 于红博, 杨劼, 宋炳煜. 黄土丘陵沟壑区植物蒸腾和植被蒸散估算尺度转换模型研究 [J]. 水土保持研究, 2010, 17 (06): 90-94+0+2.
- [13] 靳新红. 黄土高原主要造林树种苗木蒸散耗水模型 [D]. 北京林业大学, 2007.
- [14] 张晓琳, 熊立华, 林琳等. 五种潜在蒸散发公式在汉江流域的应用 [J]. 干旱区地理, 2012, 35 (02): 229-235.
- [15] 潘迪, 毕华兴, 次仁曲西等. 晋西黄土区典型森林植被耗水规律与环境因子关系研究 [J]. 北京林业大学学报, 2013, 35 (04): 16-18.
- [16] 赵一蕾, 黄文婕, 曹明, 齐威, 李俊生. 1961—2019年黄土高原植被潜在蒸散及影响因子 [J]. 环境科学研究, 2021, 34 (09): 2208-2219.