

祁连山北坡草地蒸散量及其与影响因子的关系

赵双喜^{1,2}, 张耀生¹, 赵新全¹, 孙广春^{1,2}, 冯承彬^{1,2}

(1 中国科学院 西北高原生物研究所, 中国科学院 高原生物适应与进化重点实验室, 青海 西宁 810001;

2 中国科学院 研究生院, 北京 100001)

[摘要]【目的】研究祁连山北坡草地蒸散与其环境因子的关系, 为该牧区草场的科学经营、草地退化的防治以及区域草地生态环境建设等提供科学依据。【方法】以小型自动气象站(HOBO Weather Station, U. S. A)气象观测资料为基础, 采用 FAO Penman-Monteith 方法估算了祁连山北坡草地参考作物蒸散量(ET_0), 并结合 FAO-56 的推荐值, 分析了草地实际蒸散量(ET_c)的动态变化, 同时模拟研究了相关环境因子对实际蒸散量的影响。【结果】夏季(7 和 8 月)草地的实际蒸散量较大, 冬季(12 和 1 月)较小, 在 7 月中旬达到年度最高值, 平均为 3.40 mm/d; 按相关系数的高低, 环境因子对实际蒸散量的影响表现为空气温度 > 空气相对湿度 > 土壤含水量(0~40 cm) > 太阳辐射 > 风速; 土壤水分对实际蒸散量的影响表现为土壤深度越大, 土壤水分对实际蒸散量的影响越小; 太阳辐射量与实际蒸散量呈线性关系。【结论】祁连山北坡草地实际蒸散量的年际变化符合当地环境的变化规律, 环境因子对其不同程度的影响表明, 在今后的草场管理、退化防止、生态建设中应采取适当的措施, 以确保草地的良性发展。

[关键词] FAO Penman-Monteith; 祁连山; FAO-56; 蒸散量; 环境因子

[中图分类号] S812.1; P332.2

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2008)01-0109-07

Research on evapotranspiration and its impact factors on grassland in the northern slopes of Qilianshan Mountains

ZHAO Shuang-xi^{1,2}, ZHANG Yao-sheng¹, ZHAO Xin-quan¹,
SUN Guang-chun^{1,2}, FENG Cheng-bin^{1,2}

(1 Northwest Plateau Institute of Biology, Key Laboratory of Adaptation and Evolution of Plateau Biota, Chinese Academy of Sciences, Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining, Qinghai 810001, China;

2 Post graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100001, China)

Abstract: 【Objective】The research on evapotranspiration and environmental factors of grassland was to provide scientific management of pasture and protection of grassland. 【Method】Based on meteorological data of HOBO Weather Station(U. S. A), the FAO Penman-Monteith was used to calculate the reference evapotranspiration(ET_0) of grassland in the northern slopes of Qilianshan Mountains. The actual evapotranspiration(ET_c) was estimated by FAO-56. 【Result】The analysis results showed that the maximum was in July or August, and the minimum was in December or January. Some discussions on the influences of several relative environmental factors were conducted. The calculation results showed that the order of the effect was as follows: the air temperature, air relative humidity, soil moisture(0 - 40 cm), solar radiation and wind speed. And the relationship between the effect of soil moisture and soil depth was opposite. The

【收稿日期】 2006-12-20

【基金项目】 国家科技攻关重大项目(0113014614); 中国科学院知识创新工程重大项目(KZCKI-09-01)

【作者简介】 赵双喜(1981-), 男, 山东济宁人, 在读硕士, 主要从事土壤水分和蒸散研究。

E-mail: zhaoshuangxi05@mails.gucas.ac.cn

【通讯作者】 张耀生(1953-), 男, 陕西凤翔人, 硕士生导师, 主要从事草地土壤水分研究。E-mail: zys@nwipb.ac.cn

actual evapotranspiration was linearly correlated with solar radiation. 【Conclusion】 Thus, it is regular for the actual evapotranspiration of grassland in the northern slopes of Qilianshan Mountains, with the research on the influences of several relative environmental factors. Therefore many appropriate measures to improve the conditions of grassland should be taken.

Key words: FAO Penman-Monteith; Qilianshan Mountains; FAO-56; evapotranspiration; environmental factor

祁连山北坡草原地处我国西北干旱、半干旱地带,是优良的天然牧区。该地区气候温凉,草地资源丰富,具有发展畜牧业的良好基础^[1]。但近年来,由于牲畜超载、鼠害泛滥等影响因素增多,加之气候干旱,致使该地区土地荒漠化形势日益严峻,草地植被退化,严重影响了当地畜牧业的发展。有关空气温度和降水量等气候因子对草地生态环境的影响的研究^[2-3]表明,对草地植被而言,实际蒸散量(Actual evapotranspiration)是综合反映牧草水分生态的一个重要指标。目前,国内外对农作物蒸散问题的研究较多,并已有较为成熟的方法^[4-5]。牧草的蒸散与大多数作物的蒸散具有共性^[6],虽然许多学者对不同区域草地的蒸散进行了研究^[7-10],但总体而言,草地蒸散研究还处于试验阶段。本研究以气象观测资料为基础,利用 FAO Penman-Monteith 公式,结合 FAO-56 的推荐值计算了祁连山北坡草地的实际蒸散量;并在分析实际蒸散量及其影响因子变化趋势的基础上,研究了祁连山北坡草地实际蒸散量的变化动态及其与影响因子的关系,旨在为祁连山北坡牧区草地资源的合理利用、草地退化的防治以及区域草地生态环境建设等提供理论依据。

1 试验区概况

试验区设在黑河上游的甘肃省肃南县境内。该县地处祁连山北坡中段,河西走廊南侧,属大陆性高寒半干旱气候,是甘肃省主要畜牧业县之一。全县总面积 204.56 万 hm^2 ,可利用草原面积 117.66 万 hm^2 ,其中冬春放牧草地 51.14 万 hm^2 ,夏秋放牧草地 60.05 万 hm^2 。由于长期利用方式不当以及气候变化的影响,全县 44.5% 的天然草地已经退化^[11]。

试验区天然草地类型主要是山地草甸,呈带状分布,海拔为 2 900~3 800 m。年均空气温度 0~-5.4℃,年均降水量 300~500 mm,7~8 月降水约占年降水量的 60% 以上,年潜在蒸发量约 1 000 mm,是降水量的 2~3 倍。山地草甸是优良夏秋场,总面积达 25.26 万 hm^2 ,占全县草原总面积的 21.47%。金露梅、线叶蒿草和委陵菜为优势群落,小灌木等镶嵌出现。牧草利用率达 70%,草本层高 10~30 cm,植被

覆盖度在 90% 以上。试验区土壤为亚高山灌丛草甸土或草原土,表层土壤 pH 值为 7~8。

2 研究方法

在试验区设立小型自动气象站,按照地面气象观测规范的要求和试验研究的需要,进行空气温度(T)、空气相对湿度(RH)、气压、风速(u^2)、太阳辐射(R_a)、降水量和土壤含水量(SW)的观测。数据每 20 min 自动采集 1 次,储存在数采仪内,由计算机取出。本研究使用 2005-09-01~2006-08-31 的气象观测数据。

3 蒸散量的计算

以往根据常规气象资料确定蒸散量的研究很多,并且有较高的精度^[12-13]。本研究选取 FAO 推荐且经标准化、统一化后的 Penman-Monteith (P-M) 公式来计算祁连山北坡草地的参考作物蒸散量^[14-15],以此研究草地实际蒸散量(ET_c)的变化特征。

草地实际蒸散量的计算采用传统的参考作物蒸散量即作物系数法。其公式为:

$$ET_c = K_c \times ET_0 \quad (1)$$

式中: ET_c 为实际蒸散量(mm/d), K_c 为作物系数, ET_0 为参考作物蒸散量(mm/d)。参考作物蒸散量(ET_0)由 FAO-Penman-Monteith 公式计算^[14]。由于无实测资料,作物系数(K_c)采用 FAO-56 的推荐值并经调整得出^[14]。

3.1 参考作物蒸散量 ET_0 的确定

为解决 Penman-Monteith 模式中空气动力学阻力和植被冠层表面阻力取值比较困难的问题,Smith 在总结试验结果的基础上,于 1992 年提出了计算蒸散量的 P-M 简化公式。该公式全面考虑了影响田间水分散失的大气因素和作物因素,将能量平衡、空气动力学参数和表面参数结合在一起,可应用于世界各个地区,估值精度较高且具有良好的可比性^[15],其公式形式为:

$$ET_0 = \frac{0.408 (R_n - G) + \frac{C_n \times u_w \times (e_s - e_a)}{(T + 273)}}{(1 + C_d \times u_w)} \quad (2)$$

式中: ET_0 为参考作物蒸散量 (mm/d), e_s 为饱和水汽压曲线对温度的斜率 (kPa/°C), R_n 为净辐射 (MJ/(m²·d)), G 为地热通量 (MJ/(m²·d)), γ 为干湿表常数 (kPa/°C), C_n 和 C_d 分别是以 1 d 为步长的彭曼公式设置常数 ($C_n = 900, C_d = 0.34$), e_s, e_a 分别为饱和水汽压和实际水汽压 (kPa), T 为日平均温度 (°C), u_2 为 2 m 高处的风速 (m/s)。

3.2 综合作物系数 K_c 的计算

FAO-56 对牧草生育期作了划分,根据本研究区的霜期和气温等实际资料,确定 2005~2006 年试验区牧草的生育期:2005-11-01~2006-04-30 为非生长期;2006-05-01~2006-06-30 为初始生长期;2006-07-01~2006-08-31 为生长中期;2005-09-01~2005-10-31 为生长后期。FAO-56 推荐的牧草初始生长期、生长中期和生长后期的作物系数分别为: $K_{c(iini)} = 0.4, K_{c(mid)} = 1.05, K_{c(end)} = 0.85$ ^[14]。对于非生长期,由于牧草地干草覆盖及土壤冻结等原因,牧草作

物系数较 $K_{c(iini)}$ 值略小^[16]。由于本区气候条件与标准条件有一定差异,作物系数的具体取值需要通过调整推荐值的调整来确定。

对牧草生长中期和后期的作物系数 $K_{c(mid)}$ 和 $K_{c(end)}$ 具体调整如下^[14]:

$$K_c = K_{c(推荐)} + [0.04(u_2 - 2) - 0.004(RH_{min} - 45)](h/3)^{0.3} \quad (3)$$

式中: RH_{min} 为每日最小空气相对湿度的平均值 (%), $20\% < RH_{min} < 80\%$; u_2 为 2 m 高处的风速 (m/s), $1 \text{ m/s} < u_2 < 6 \text{ m/s}$; h 为计算时段内的平均株高 (m), $0.1 \text{ m} < h < 10 \text{ m}$ 。

4 结果与分析

4.1 祁连山北坡草地实际蒸散量的变化特征

根据计算结果绘制了祁连山北坡草地实际蒸散量的动态变化过程,其结果见图 1。

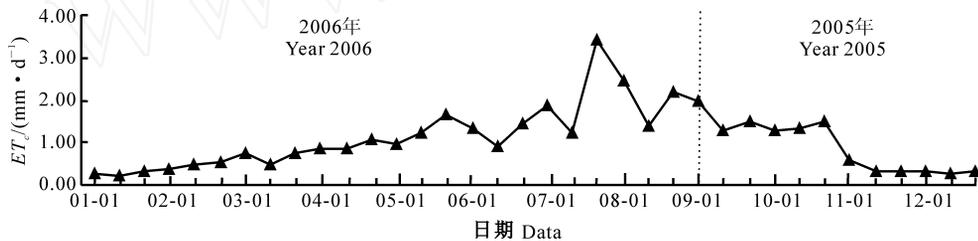


图 1 祁连山北坡草地实际蒸散量的动态变化

Fig. 1 Dynamic variation of actual evapotranspiration of grassland in the northern slopes of Qilianshan Mountains

由图 1 可知,草地实际蒸散量的动态变化表现为夏季(7 和 8 月)较大,冬季(12 和 1 月)较小。7 月中旬达到年度最高值,平均为 3.40 mm/d,这主要与空气温度、湿度、风速和太阳辐射有关。草地实际蒸散量在达到峰值之前,由于空气温度的回升、雪水的融化以及牧草的生长,蒸散过程在生长初期(5 月下旬)出现了一次小时段的峰值。在随后的 7 和 8 月,随着空气温度的持续升高和降水的增多,草地实际蒸散量出现了不同程度的波动。9 月是牧草生长中、末期实际蒸散量的分界线。从 9 月上旬开始直至 10 月下旬,虽然蒸散过程出现了小幅度的波动,但由于降水的减少、空气温度的降低及牧草长势的下降,此时可供蒸散的水分已经非常少,所有的这些因素都减缓了生长末期的蒸散过程。对于非生长期,牧草地为干草覆盖,加之积雪较厚,土壤冻结等原因,实际蒸散量较小。

4.2 祁连山北坡草地蒸散与环境因子的关系

蒸散过程主要是通过土壤表面的蒸发和植被表

面的蒸腾进行的。在蒸发过程中,表层以下的水分以水汽扩散和毛管水的形式向上运动,这种水分输送量的多少与土壤的有效含水量有关。植物蒸腾的变化除受根系吸水过程的影响外,植物蒸腾过程的振动和光合“午休”现象,均是调节实际蒸散量与水分供应量之间关系的有效途径,这使得实际蒸散量与土壤含水量以及气象要素之间的关系更趋复杂^[17]。

由上述研究与分析可知,蒸散量的变化主要取决于影响蒸散的气候因子和下垫面条件。气候因子主要有空气温度、空气相对湿度、风速和太阳辐射;下垫面条件为土壤含水量等。

4.2.1 蒸散与空气温度的关系 有关空气温度对蒸散的影响,很早就已引起了研究者的重视^[18]。大量研究表明,随着空气温度的升高,水分的运动加快,蒸散速率增加^[19]。在祁连山北坡,由于空气温度的日变化和季节变化较大,其对蒸散的影响更为显著。

由图 2 可知,草地空气温度的动态变化表现为

夏季(6 和 7 月)较大,冬季(1 月)较小,在 6 月下旬达到年度的峰值,平均为 14.95 。气温的变化与草地的海拔及太阳辐射强度密切相关。

总的来说,随着空气温度的升高,草地实际蒸散量呈增加的趋势。在整个生长期内表现出 3 个特

点:春季,随着空气温度的持续升高,实际蒸散量缓慢增加;夏季,随着空气温度的逐渐升高或缓慢下降,实际蒸散量有所波动;秋季,随着空气温度的持续下降,实际蒸散量也缓慢下降。

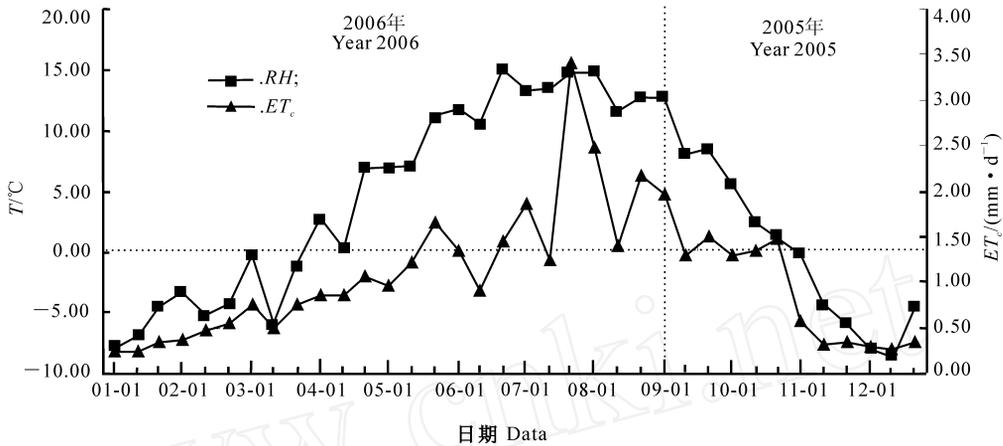


图 2 祁连山北坡草地空气温度对蒸散量的影响

Fig. 2 Dynamic variation of air temperature of grassland in the northern slopes of Qilianshan Mountains

4.2.2 蒸散与空气相对湿度的关系 蒸散的大小与近地面层的空气相对湿度有关。当空气中的相对湿度较大时,植物蒸发到空气的水分减少;反之,空气相对湿度越小,蒸散就越快、越多。在连续晴热高温时,空气较为干燥,而太阳辐射强度较大,土壤蒸发和植物蒸腾就会加大,容易发生干旱。

由图 3 可知,夏季空气相对湿度变化明显较其他季节大,并且 7 月中旬前后是空气相对湿度急剧

变化的阶段,7 月中旬以前,空气相对湿度的变化较为缓慢,但蒸散降低的速率较大;7 月下旬以后,随着空气相对湿度升高速率的加快,实际蒸散量增大的速率相对减慢。由此可知,在一定程度上,空气相对湿度的变化与实际蒸散量的变化是相反的。其次,在 11 月中旬又出现空气相对湿度变化的另一个拐点,可以预测空气相对湿度可能会随着冬季的来临而逐渐升高,实际蒸散量将会随之降低。

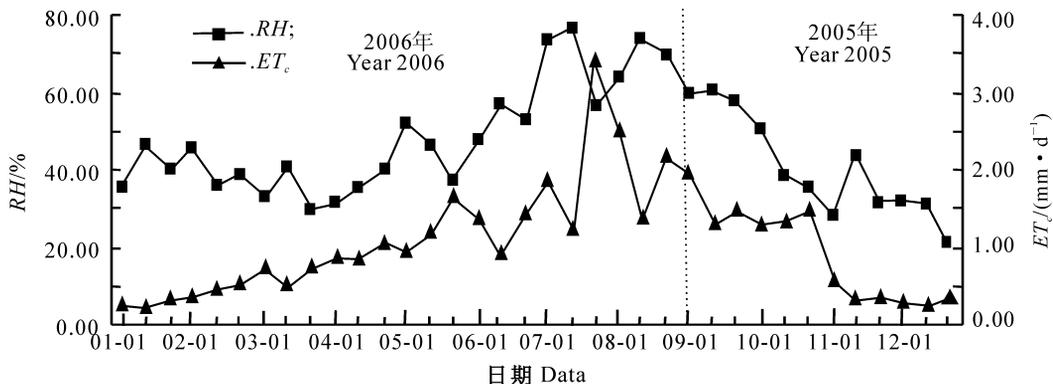


图 3 祁连山北坡草地空气相对湿度对蒸散量的影响

Fig. 3 Dynamic variation of air relative humidity of grassland in the northern slopes of Qilianshan Mountains

4.2.3 蒸散与风速的关系 风具有输送水热和二氧化碳的作用,是影响蒸散的重要因素之一,所以在计算蒸散时,风速是必须考虑的因素。特别是在干旱半干旱地区,因平均风速较大,其对蒸散的影响尤为显著。

由图 4 可知,草地风速的动态变化表现为春季

较大,夏季次之,秋季较小。对风速与实际蒸散量的相关分析表明,风速与实际蒸散量呈正相关关系,即风速越大,蒸散量也相应增加,反之亦然,这与康绍忠等^[20]对农田蒸散的研究结论基本一致。但是,当风速超过 4 m/s 时,蒸散过程的变化趋于复杂,可能是由于风速的变化导致空气相对湿度的变化紊乱所

致。

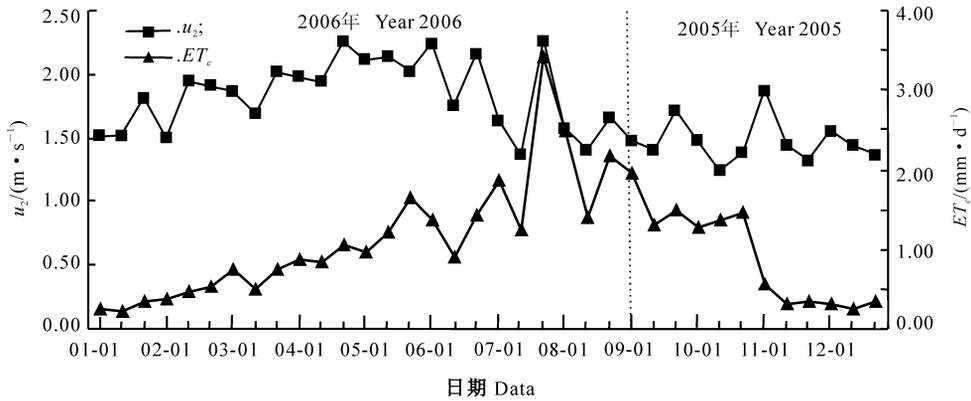


图 4 祁连山北坡草地风速对蒸散量的影响

Fig. 4 Dynamic variation of wind speed of grassland in the northern slopes of Qilianshan Mountains

4.2.4 蒸散与太阳辐射的关系 当太阳辐射存在时,太阳辐射产生的能量可能被植物所吸收,也可能以热能的形式散发掉,太阳辐射对空气温度及植物体温度的影响极大,当空气温度上升时,水分的蒸散量也随之增加。

由图 5 可知,草地太阳辐射的动态变化表现为春末夏初(5 和 6 月)较大,冬季(1 月)较小。对太阳辐射与实际蒸散量的相关分析表明,太阳辐射量与实际蒸散量呈线性关系,这与 Kim 等^[21]对草地早熟禾的研究结论一致。

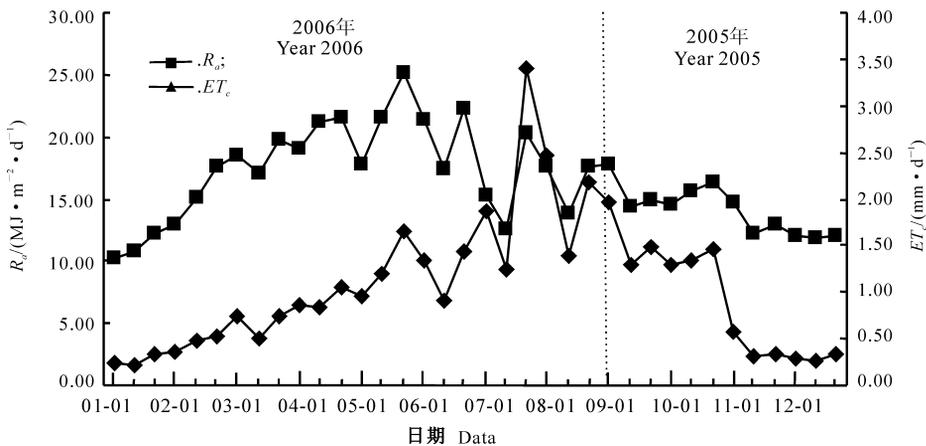


图 5 祁连山北坡草地太阳辐射对蒸散量的影响

Fig. 5 Dynamic variation of solar radiation of grassland in the northern slopes of Qilianshan Mountains

4.2.5 蒸散与土壤水分的关系 蒸散是土壤-植被-大气系统水分交换的主要方式,在描述其相互作用的关系时,降水入渗不仅依赖于随机的降水事件,而且受制于土壤水分状况^[22];同时,不同植被类型的土壤具有不同的水分平衡关系,土壤湿度依赖于植被类型和土壤特性,但反过来又是决定不同植被蒸散量的关键因素^[23]。

天然草地实际蒸散量与 0~60 cm 不同土层土壤含水量的关系拟合结果见表 1。由表 1 可知,土壤表层 0~20 cm 土层的土壤含水量对实际蒸散量影响最大,回归分析显示该层土壤含水量与实际蒸

散量呈显著直线相关,相关系数为 0.896,这主要是由于土壤表层是土壤-植被-大气系统的临界面,蒸散首先从表层土壤开始;20~40 cm 土层土壤含水量对实际蒸散量的影响也呈显著的线性相关,由于 20~40 m 土层是大量根系集中分布的主要层次,其与植物根系吸水的多少及植物的生长发育状况密切相关,但相对较 0~20 cm 土层含水量对实际蒸散量的影响小;40~60 cm 土层含水量对实际蒸散量的影响不显著,即该层土壤水分对实际蒸散量的影响较小,这是因为表层土壤及植被限制了深层土壤水分的蒸散,减缓了深层土壤水分蒸散的过程。由此

可知,土壤水分对实际蒸散量的影响表现为土壤深度越大,其对实际蒸散量的影响越小。

表 1 祁连山北坡草地实际蒸散量(ET_c)与不同土层含水量(SW)的关系

Table 1 Mode between actual evapotranspiration and soil moisture of grassland in the northern slopes of Qilianshan Mountains

土层深度/cm Soil depth	拟合曲线 Mode	相关系数 Coefficient of correlation	显著水平 Significance level
0~20	$ET_c = 0.075 SW - 0.013$	0.896	0.000
20~40	$ET_c = 0.067 SW - 0.135$	0.846	0.001
40~60	$ET_c = 0.066 SW - 0.027$	0.655	0.021

对实际蒸散量与气候单因子进行线性拟合,以其相关系数大者为最佳拟合式(表 2)。根据表 1,2,由相关系数的高低可知环境因子对蒸散影响的大小顺序为:空气温度 > 空气相对湿度 > 土壤含水量(0~40 cm) > 太阳辐射 > 风速。

表 2 祁连山北坡草地实际蒸散量(ET_c)与气候因子的关系

Table 2 Model between daily actual evapotranspiration and single climate factor of grassland in the northern slopes of Qilianshan Mountains

相关因子 Correlation factor	拟合曲线 Simulation curve	相关系数 Coefficient of correlation	显著水平 Significance level
空气温度(T) Air temperature	$ET_c = 0.633e^{0.088T}$	0.943	0.000
空气相对湿度(RH) Air relative humidity	$ET_c = 1.436RH^2 + 2.879RH - 0.588$	0.901	0.001
太阳辐射(R_a) Solar radiation	$ET_c = 0.078R_a - 0.219$	0.398	0.200
风速(u_2) Wind speed	$ET_c = 0.363e^{0.493u_2}$	0.167	0.604

5 结论

1) 本研究采用 FAO Penman-Monteith 方法,结合 FAO-56 的推荐值,分析了祁连山北坡年际草地实际蒸散量(ET_c)的动态变化。结果表明,夏季(7 和 8 月)实际蒸散量较大,冬季(12 和 1 月)较小,在 7 月中旬达到年度最高值,平均为 3.40 mm/d。

2) 本研究在分析实际蒸散量及其影响因子变化趋势的基础上,得到了草地实际蒸散量与环境因子的关系:随着空气温度的回升,实际蒸散量逐渐增加,但二者并非简单的线性相关。7 月中旬以前,空气相对湿度变化比较缓慢,但蒸散降低的速率较大;7 月下旬以后,随着空气相对湿度升高速率的加快,蒸散增加的速率相对减慢。由此可见,在一定程度上,空气相对湿度的变化趋势与蒸散的变化趋势相反。风速与实际蒸散量呈正相关关系,即风速越大,实际蒸散量也相应增加。辐射的变化趋势与蒸散的变化较为一致,并呈线性关系,线性方程为 $ET_c = 0.078R_a - 0.219$ 。

3) 利用 SPSS 统计软件对实际蒸散量与环境单因子进行拟合。结果表明,按相关系数的高低,环境因子对蒸散影响的大小顺序为:空气温度(T) > 空气相对湿度(RH) > 土壤含水量(SW)(0~40 cm)

以实际蒸散量为因变量,以各个环境因子为自变量,用 SPSS 统计软件进行多元线性回归分析^[24],得到实际蒸散量与环境因子的综合关系式为:

$$ET_c = 0.04T + 2.04RH - 1.13u_2 + 0.08R_a - 0.005SW + 0.677$$

> 太阳辐射(R_a) > 风速(u_2),土壤水分对实际蒸散量的影响表现出土壤深度越大影响越小的规律。并拟合得到了实际蒸散量与环境因子的综合关系式,即 $ET_c = 0.04T + 2.04RH - 1.13u_2 + 0.08R_a - 0.005SW + 0.677$ 。

【参考文献】

- [1] 马兴祥,刘明春,尹东. 祁连山草地气候和草地资源开发利用[J]. 草原与草坪,2000(3):37-40.
Ma X X, Liu M C, Yin D. Utilization of pasturage resource and climate in qilian mountain[J]. Grassland and Turf, 2000(3): 37-40. (in Chinese)
- [2] 李栋梁,冯建英,陈雷,等. 黑河流量和祁连山气候的年代际变化[J]. 高原气象,2003,22(2):104-110.
Li D L, Feng J Y, Chen L, et al. Study on interdecadal change of heihe run off and qilian mountain s climate[J]. Plateau Meteorology, 2003, 22(2): 104-110. (in Chinese)
- [3] 李栋梁,刘洪兰. 黑河流量对祁连山气候年代际变化的响应[J]. 中国沙漠,2004,21(4):385-391.
Li D L, Liu H L. Responding of heihe river runoff to decadal climate change in qilian mountain area[J]. Journal of Desert Research, 2004, 21(4): 385-391. (in Chinese)
- [4] Rana G, Katerji N. Measurement and estimation of actual evapotranspiration in the field under mediterranean climate: a review[J]. European Journal of Agronomy, 2000, 13: 125-153.
- [5] 王笑影. 农田蒸散估算方法研究进展[J]. 农业系统科学与综合研究, 2003, 19(2): 81-84.

- Wang X Y. Study of the estimating methods for evapotranspiration in farmland [J]. *System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture*, 2003, 19(2): 81-84. (in Chinese)
- [6] 赵炳祥, 陈佐忠, 胡林, 等. 草坪蒸散研究进展[J]. *生态学报*, 2003, 23(1): 148-157.
Zhao B X, Chen Z Z, Hu L, et al. Turf grass evapotranspiration: a review [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(1): 148-157. (in Chinese)
- [7] 宋炳煜. 草原区不同植物群落蒸发蒸腾的研究[J]. *植物生态学报*, 1995, 19(4): 319-328.
Song B Y. Studies on evapotranspiration from different plant communities in steppe region of inner monglia [J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 1995, 19(4): 319-328. (in Chinese)
- [8] 程积民. 黄土丘陵半干旱区几种牧草蒸腾作用的研究[J]. *干旱区研究*, 1989(2): 62-65.
Chen J M. A study on the transpiration of a few species of herbage in the semi-arid zone of loess hills [J]. *Arid Zone Research*, 1989(2): 62-65. (in Chinese)
- [9] 王根绪, 沈永平, 钱鞠, 等. 高寒草地植被覆盖变化对土壤水分循环影响研究[J]. *冰川冻土*, 2003, 25(6): 653-659.
Wang G X, Shen Y P, Qian J, et al. Study on the influence of vegetation change or soil moisture cycle in alpine meadow [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, 25(6): 653-659. (in Chinese)
- [10] 宋克超, 康尔泗, 金博文, 等. 黑河流域山区植被带草地蒸散发试验研究[J]. *冰川冻土*, 2004, 26(3): 349-356.
Song K C, Kang E S, Jin B W, et al. An experimental study of grassland evapotranspiration in the mountain watershed of the hei river basin [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2004, 26(3): 349-356. (in Chinese)
- [11] 宁宝英, 樊胜岳, 赵成章. 肃南县草原退化原因分析与分区治理对策[J]. *中国草地*, 2004, 26(3): 65-68.
Ning B Y, Fan S Y, Zhao C Z. Study on the reasons resulting in natural grassland degradation and classified management strategies of sunan county [J]. *Grassland of China*, 2004, 26(3): 65-68. (in Chinese)
- [12] Brenner A J, Incoll L D. The effect of clumping and stomatal response on evaporation from sparsely vegetated shrublands [J]. *Agri For Meteorol*, 1997, 84: 187-205.
- [13] Dolman A J. A multiple-source and surface energy balance model for use in general circulation models [J]. *Agri For Meteorol*, 1993, 65: 21-45.
- [14] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. FAO irrigation and drainage paper no. 56, crop evapotranspiration [M]. Rome, Italy: FAO, 1998.
- [15] 李晓军, 李取生. 东北地区参考作物蒸散确定方法研究[J]. *地理科学*, 2004, 24(2): 212-216.
- Li X J, Li Q S. Study on calculating methods for reference crop evapotranspiration in northern china [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2004, 24(2): 212-216. (in Chinese)
- [16] 吴锦奎, 丁永建, 沈永平, 等. 黑河中游地区湿草地蒸散量试验研究[J]. *冰川冻土*, 2005, 27(4): 582-590.
Wu J K, Ding Y J, Shen Y P, et al. Experimental study on evapotranspiration of swampy meadow in the middle reach of heihe river [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2005, 27(4): 582-590. (in Chinese)
- [17] 王新平, 张利平, 刘立超, 等. 干旱沙区陆面蒸散量与土壤水分关系的数值计算[J]. *中国沙漠*, 1996, 16(4): 388-391.
Wang X P, Zhang L P, Liu L C, et al. Numerical calculation of the relationship between evapotranspiration and soil moisture in arid sandy region [J]. *Journal of Desert Research*, 1996, 16(4): 388-391. (in Chinese)
- [18] 王积强, 李国振, 陈韶君. 土壤水分不停运动和转化不存在零通量面[J]. *干旱区地理*, 1992, 15(3): 92-99.
Wang J Q, Li G Z, Chen S J. No zero flux plane in soil water moving and changing (first) [J]. *Arid Land geography*, 1992, 15(3): 92-99. (in Chinese)
- [19] 张富仓, 张一平, 张君常. 温度对土壤水分保持影响的研究[J]. *土壤学报*, 1997, 34(2): 160-169.
Zhang F C, Zhang Y P, Zhang J C. Temperature effect on soil water retention [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1997, 34(2): 160-169. (in Chinese)
- [20] 康绍忠, 刘晓明, 高新科, 等. 土壤-植物-大气连续体水分传输的计算机模拟[J]. *水利学报*, 1992(3): 1-12.
Kang S Z, Liu X M, Gao X K, et al. Computer simulation of water transport in soil-plant-atmosphere continuum [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1992(3): 1-12. (in Chinese)
- [21] Kim K S, Beard J B. Comparative evapotranspiration rates and associated plant morphological characteristics [J]. *Crop Science*, 1988, 28: 328-331.
- [22] Zhang L, Dawas W R, Reece P H. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale [J]. *Water Resources Research*, 2001, 37(3): 701-708.
- [23] Rodriguez I. Ecohydrology: A hydrological perspective of climate-soil-vegetation dynamics [J]. *Water Resources Research*, 2000, 36(1): 3-9.
- [24] 司建华, 冯起, 张小由, 等. 极端干旱条件下柽柳种群蒸散量的日变化研究[J]. *中国沙漠*, 2005, 25(3): 380-385.
Si J H, Feng Q, Zhang X Y, et al. Diurnal variation of evapotranspiration of vegetation under extreme dry condition [J]. *Journal of Desert Research*, 2005, 25(3): 380-385. (in Chinese)