

文章编号: 1000694X(2010)02036306

# 三江源区温性草原蒸散量与主要影响因子的相关分析

张耀生<sup>1</sup>, 赵新全<sup>1</sup>, 赵双喜<sup>1,2</sup>, 冯承彬<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院 西北高原生物研究所 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 100049)

**摘要:** 以小型自动气象站观测资料为基础, 采用 FAO Penman-Monteith 方法估算三江源温性草原参考作物蒸散量, 并结合 FAO256 的推荐值进行了草地实际蒸散量的计测。结果表明, 蒸散量季节动态呈单峰曲线变化趋势, 在8月中旬达到年度最高值, 平均为  $1194 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ , 年蒸散总量达到  $275136 \text{ mm}$ , 暖季日蒸散量明显大于冷季。对实际蒸散量与各个主要环境因子的相关性进行了分析, 结果可按照相关系数排序: 空气温度(T) > 太阳辐射( $R_a$ ) > 空气相对湿度(RH) > 风速( $u_2$ )。辐射量与实际蒸散量具有较高的线性相关。根据蒸散量与相关环境因子关系分析的结果, 建立了适合三江源区域温性草原的蒸散量简化计测公式。

**关键词:** 三江源; 温性草原; 蒸散量; 气候因子

中图分类号: S812.1 文献标识码: A

三江源自然保护区地处青藏高原腹地, 是我国乃至亚洲重要的水源涵养地。近年来由于受气候暖干化以及人为因素的影响, 草原退化日趋严重<sup>[1]</sup>。为了保护三江源区域的生态环境, 国家在这一地区建立了全国面积最大的自然保护区。近年来, 有关三江源区生态环境方面的研究已有不少报道<sup>[1-6]</sup>, 其中对草地水分动态的研究正在成为热点。草地蒸散量季节变化规律研究是揭示草地初级生产力形成机制和生态系统功能的重要基础性工作, 探索蒸散量及其影响因子的相互关系, 也是揭示三江源区水源涵养功能机制的重要前提。国内外对农田蒸散的研究报道较多, 已有了较成熟的方法<sup>[7-14]</sup>, 而草地蒸散的研究起步较晚。近年来一些学者对不同区域草地的蒸散进行了研究<sup>[15-23]</sup>, 但三江源区域的相关研究还不多见。笔者以2006) 2007年的观测数据为基础, 利用 FAO Penman-Monteith 公式结合 FAO256 的推荐值测算了三江源区温性草原的实际蒸散量及其季节变化动态, 并分析了蒸散量与主要影响因子的相互关系。研究结果可为建立该类型草地水分动态模型奠定基础。

## 1 试验区概况

试验区位于黄河上游的青海省同德县, 地处海

南、黄南、果洛3个自治州交界处。根据三江源自然保护区建设规划, 该区域属于自然保护区3个保护级别(核心区、缓冲区、试验区)的试验区。同德县地势高寒, 属于大陆高原性气候区。据5三江源自然保护区生态环境6资料, 年均气温 $-3.0 \sim 6.1 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右, 最热月(7月)的月平均气温 $11.9 \text{ }^\circ\text{C}$ , 最冷月(1月)的月平均气温 $-13.2 \text{ }^\circ\text{C}$ ; 年降水量为230~540 mm, 各地降水差异悬殊, 雨量分布呈南多北少、东多西少的趋势, 降水多集中在5) 9月, 占年总降水量的85%以上, 季节分布极不均匀; 年蒸发量为1466 mm; 无霜期28~64 d; 年日照时数2550~2760 h。

试验研究选择具有典型代表性的温性草原植被<sup>[1]</sup>。该类型草地主要分布于2800~3500 m海拔高度, 总面积达12176万 $\text{hm}^2$ , 占同德县草原总面积的29161%。该区域气候相对比较温和, 是同德县重要的居民集中分布区和生态移民定居点分布地。地带性植被组成以短花针茅(*Stipa breviflora*)、西北针茅(*S. krylovii*)、青海固沙草(*Orinus kokonorica*)、芨芨草(*Achnatherum splendens*)和各种蒿类植物(*Artemisia* spp.)为主, 群落总盖度为35%~65%。土壤以栗钙土为主, 有机质含量较低<sup>[1]</sup>, 一般在2510~5010 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

收稿日期: 200820221; 改回日期: 200903203

基金项目: 国家科技支撑计划项目/高寒草地退化生态系统综合整治技术研究(2006BAC01A02); 中国科学院西部行动计划项目/三江源区退化生态系统受损与修复机制及可持续管理(KZCX2XB20601)资助

作者简介: 张耀生(1953), 男, 陕西人, 副研究员, 主要从事草地生态方面研究。Email: zys@nwipb.ac.cn

## 2 研究方法

### 2.1 数据观测

试验区位于青海省同德县境内,地处 35b15c N、100b51c E。植被为典型温性草原。年平均气温 01.4 e。在试验区选择具有典型代表性的围栏封闭草地架设小型自动气象站,进行空气温度(T)、空气相对湿度(RH)、风速( $u_2$ )和太阳辐射( $R_a$ )等数据的观测。观测点的选择充分考虑了植被结构、土壤条件、地形地貌等因素能够代表广布于青藏高原的温性草原的典型特征,设点的时候对多个备选方案进行了慎重的挑选,选定的试验点草场开阔、植被结构均一,放牧利用程度中等,具有较好的代表性。

数据分析使用 2006211201) 2007210231 的观测数据。观测年度未出现大旱或者短期多雨等反常变化,因此分析结果具有一定的参考应用价值。

### 2.2 蒸散量的计测

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<sup>[17-20]</sup>。本研究选取标准化、统一化后 FAO 推荐的 Penman2Monteith(P2M)公式来计算参考作物蒸散量,以此研究草地实际蒸散量( $ET_c$ )的变化特征。

草地实际蒸散量计算采用传统的参考作物蒸散量)))作物系数法。其公式为:

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

式中: $ET_c$  为实际蒸散量( $mm \# d^{-1}$ );  $K_c$  为作物系数; $ET_0$  为参考作物蒸散量( $mm \# d^{-1}$ )。参考作物蒸散量( $ET_0$ )由 FAO2Penman2Monteith 公式计算<sup>[21]</sup>。作物系数( $K_c$ )采用 FAO256 的推荐值并经调整得出。

### 2.3 参考作物蒸散量 $ET_0$ 的确定

为解决 Penman2Monteith 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,1992 年 Smith 在总结试验的基础上提出了计算蒸散量的 P2M 简化公式。该公式全面考虑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,其公式形式为:

$$ET_0 = \frac{0.408 \$ (R_n - G) + \frac{C_n Q_{u2} (e_s - e_a)}{(T + 273)}}{\$ + Q(1 + C_d u_2)} \quad (2)$$

式中: $ET_0$  为参考作物蒸散量( $mm \# d^{-1}$ );  $\$$  为饱和水汽压曲线对温度的斜率( $kPa \# e^{-1}$ );  $R_n$  为净辐射( $MJ \# m^{-2} \# d^{-1}$ ),  $G$  为地热通量( $MJ \# m^{-2} \# d^{-1}$ );  $C$  为干湿表常数( $kPa \# e^{-1}$ );  $C_n$  和  $C_d$  分别是以 1 d 为步长的彭曼公式设置常数( $C_n = 900, C_d = 01.34$ );  $e_s$ 、 $e_a$  分别为饱和水汽压和实际水汽压( $kPa$ );  $T$  为日平均温度( $e$ );  $u_2$  为 2 m 高处的风速( $m \# s^{-1}$ )。

### 2.4 综合作物系数 $K_c$ 的计算

FAO256 中对牧草生育期作了划分。由于试验区属于高寒气候,植物生长期短暂,枯草期长达 6 个月,各个生育阶段的划分具有明显的独特性。根据实际观测资料,2006) 2007 年牧草生育期划分如下:2006211201) 2007204230 为非生长期;2007205201) 2007205231 为初始生长期;2007206201) 2006208231 日为生长中期;2007209201) 2007210231 日为生长后期。FAO256 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:  $K_{c(int)} = 01.4$ ,  $K_{c(mid)} = 11.05$ ,  $K_{c(end)} = 01.85$ 。根据吴锦奎等人对草地不同阶段蒸散研究的经验<sup>[22-24]</sup>,对不同生育期作物系数的取值进行调整。非生长期和初始生长期采用推荐值  $K_{c(int)}$ ,而生长中期和后期作物系数  $K_{c(mid)}$  和  $K_{c(end)}$  调整如下:

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

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( $m \# s^{-1}$ ),  $1 m \# s^{-1} [u_2 [6 m \# s^{-1}]$ ;  $h$  为计算时段内的平均株高(m),  $01.1 m [h < 10 m$ 。

## 3 结果与分析

### 3.1 实际蒸散量及其季节变化

根据计算结果绘制了三江源温性草原 2006) 2007 年一个观测周期实际蒸散量的动态变化(图 1)。

按照上述方法进行蒸散量计测的结果,非生长期、生长初期、生长中期以及生长末期的实际蒸散量依次为: 731.47 mm、331.14 mm、1281.33 mm、401.42 mm,年蒸散总量为 2751.36 mm。蒸散量的季节动态具有明显的规律性(图 1):草地的实际蒸散量暖季明显大于冷季,8 月中旬达到年度最高值,平均为 11.94  $mm \# d^{-1}$ ,表现为明显的单峰曲线变化总趋势。蒸散量的季节动态主要受降水动态和太阳辐射动态和植物生长动态的影响,和这些因素的季节动

态亦步亦趋。6 月和 9 月的小幅度波动,是由于降水分布以及晴天日数的小范围波动所致。

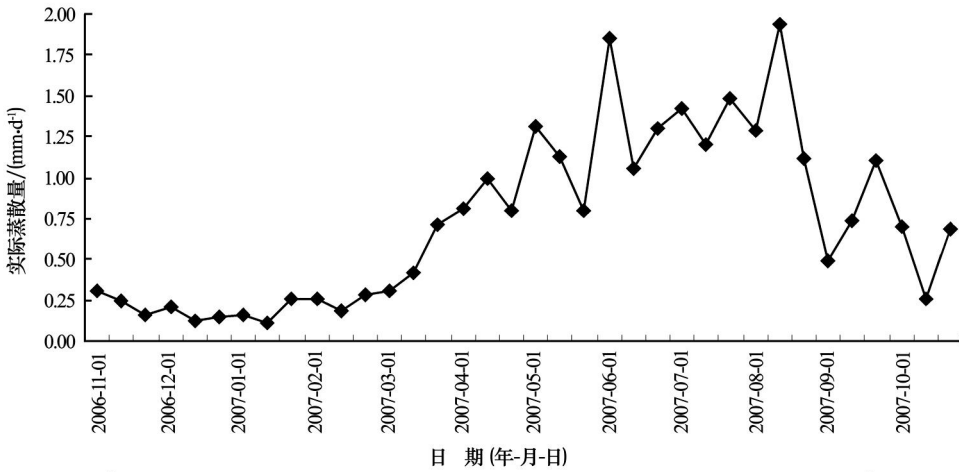


图 1 实际蒸散量的季节动态变化

Fig. 1 Season dynamic of actual evapotranspiration

### 3.2 蒸散量与环境因子的关系

#### 3.2.1 蒸散量与空气温度的关系

蒸散过程受多种因素的影响<sup>[24-29]</sup>,其中有关空气温度对蒸散的影响很早就引起了研究者的重视。研究表明,随着近地面空气温度的升高,下垫面的水分运动加快,蒸散速率增加。在三江源区,由于空气

温度的日变化和季节变化较大,对蒸散的影响更为显著。由图 2 可知,三江源温性草原的空气温度在 7) 8 月达到年度的峰值。从季节动态特征来看,蒸散量和气温的变化趋势基本一致:在植物生长季,随着季节变化、气温的逐渐升高,草地实际蒸散量亦呈逐渐增大的趋势。9 月以后,伴随气温的逐渐降低,日蒸散量逐步降低。冷季的蒸散量伴随温度的下降

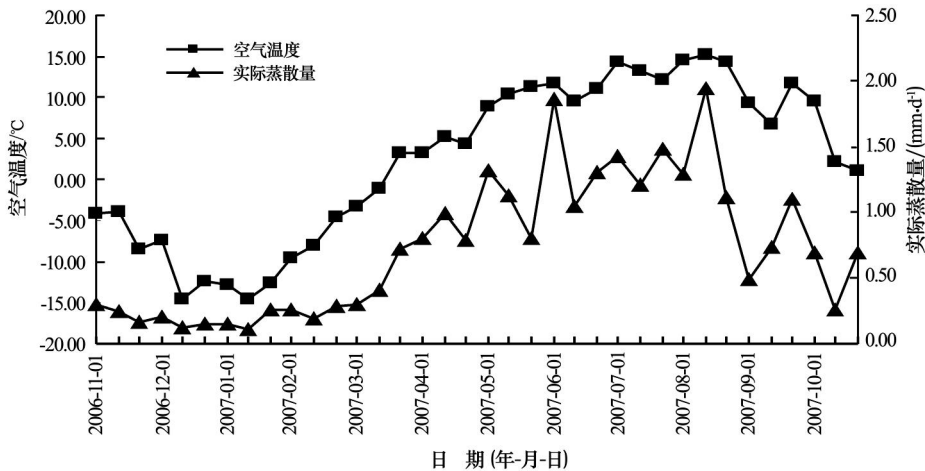


图 2 空气温度和蒸散量的关系

Fig. 2 Relation between air temperature and actual evapotranspiration

而下降,在 1) 2 月达到变化曲线的谷值。

#### 3.2.2 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。当空气中相对湿度大的时候,下垫面的水分交换减少;空气相对湿度越小,地表和大气的水分交换越多。

温性草原的空气湿度与蒸散量的关系如图 3 所示。近地面空气相对湿度的时间动态变化表现为:6) 10 月相对湿度较大,之后逐渐降低。而实际蒸散量时间动态和相对湿度的变化不很一致。说明相

对湿度对蒸散的影响还受到其他环境因素的制约。

#### 3.2.3 蒸散与风速的关系

近地面空气流动过程伴随水汽和二氧化碳的扩散传递以及热能的传递,进而影响植物蒸腾和地表蒸发。在三江源区,有风天数比较多、平均风速较大,风速对蒸散的影响比较显著。图 4 为平均风速和蒸散量的关系曲线。由图 4 可知,风速的动态变化表现为:冷季风速较大,暖季则较小。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

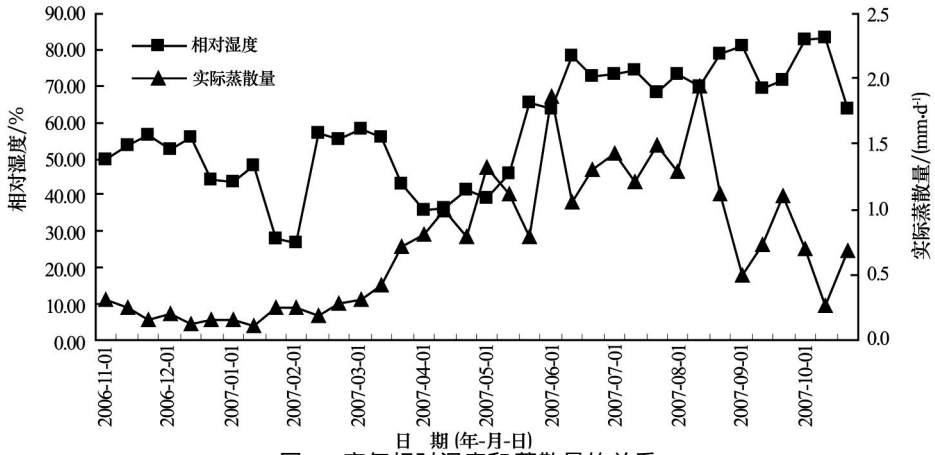


图 3 空气相对湿度和蒸散量的关系

Fig. 3 Relation between relative humidity and actual evapotranspiration

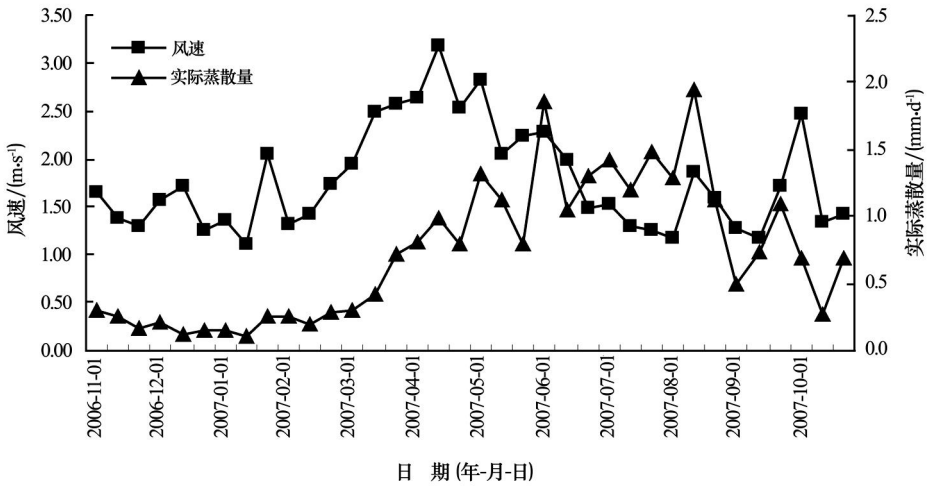


图 4 风速和蒸散量的关系

Fig. 4 Relation between wind speed and actual evapotranspiration

相关关系,即风速越大,蒸散也相应增大,反之亦然,这与康绍忠等<sup>[27]</sup>在农田的研究结论基本一致。

### 3.2.4 蒸散与太阳辐射的关系

太阳辐射是蒸散过程的主要驱动力。辐射对空

气和植物体产生增温效应,也是植物生长的能源提供者。当气温上升时蒸散强度也随之增大。由图 5 可知,太阳辐射与蒸散量的时间动态关系呈现比较一致的趋势。对辐射与蒸散量的相关分析表明,辐

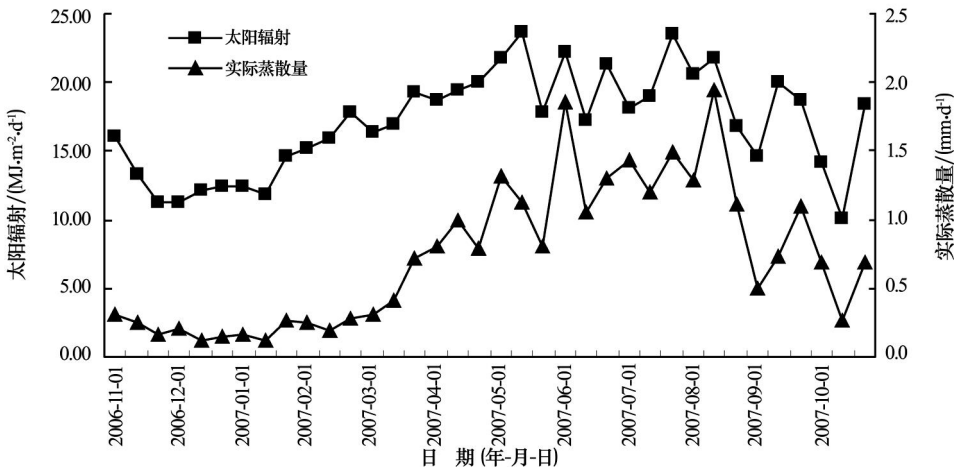


图 5 太阳辐射和蒸散量的关系

Fig. 5 Relation between solar radiation and actual evapotranspiration

射量与实际蒸散量呈线性相关关系, 这与 Kim 等<sup>[28]</sup>对草地早熟禾的研究结论一致。

### 3.2.5 蒸散与环境因子关系的拟合曲线

对实际蒸散量与各种气候因子的相关性进行直

线或者曲线拟合, 择其相关系数大者为最佳拟合式(表 1)。按相关系数的高低可知, 4 种主要环境因子对蒸散影响的大小顺序依次为空气温度(T) > 太阳辐射(R<sub>a</sub>) > 空气相对湿度(RH) > 风速(u<sub>2</sub>)。

表 1 实际蒸散量(ET<sub>c</sub>)与气候因子关系的拟合

Table 1 Fitting curve of actual evapotranspiration with climate factors

相关因子	拟合曲线	相关系数(R)	显著水平
空气温度(T)	$ET_c = 0.4529e^{0.0837T}$	0.981	0.000
太阳辐射(R <sub>a</sub> )	$ET_c = 0.1356R_a - 1.5849$	0.880	0.000
空气相对湿度(RH)	$ET_c = 0.0006RH^2 - 0.0456RH + 1.3862$	0.589	0.147
风速(u <sub>2</sub> )	$ET_c = 0.2098e^{0.5436u_2}$	0.303	0.337

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逐步回归分析<sup>[29]</sup>, 得到实际蒸散量与环境因子的综合关系式:

$$ET_c = 3.4 @ 10^{-2} T + 5.7 @ 10^{-2} R_a - 2.0 @ 10^{-3} RH - 0.135u_2 + 0.017 \quad (4)$$

(4) 式的拟合关系有待进一步的观测数据检验。通过这一途径有望建立适合实验区域的计算蒸散量的简化公式, 这将有待于多年观测数据的积累与分析。

## 4 结论

1) 采用 FAO Penman2Monteith 方法, 结合 FAO256 的推荐值, 计测了三江源温性草原实际蒸散量(ET<sub>c</sub>)的动态变化, 结果表明: 蒸散量的冷暖季差异明显, 日平均蒸散量在 8 月中旬达到年度最高值, 为 1194 mm # d<sup>-1</sup>。

2) 在分析实际蒸散量及其影响因子变化趋势及其相互关系的基础上, 建立了草地实际蒸散量与环境因子的拟合曲线。其中辐射与蒸散的相关性比较显著, 可以建立直线相关关系, 线性方程为 ET<sub>c</sub> = 0.1356R<sub>a</sub> - 1.5849。

3) 对实际蒸散量与各种环境因子进行拟合的结果表明, 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) > 太阳辐射(R<sub>a</sub>) > 空气相对湿度(RH) > 风速(u<sub>2</sub>)。

4) 建立了三江源区温性草原蒸散量简化计测公式:

$$ET_c = 3.4 @ 10^{-2} T + 5.7 @ 10^{-2} R_a - 2.0 @ 10^{-3} RH - 0.135u_2 + 0.017$$

## 参考文献(References):

[1] 三江源自然保护区生态环境 6 编辑委员会. 三江源自然保护区生态环境[M]. 西宁: 青海人民出版社, 2002: 99- 113.

[2] 杨建平, 丁永建, 陈仁升. 长江黄河源区生态环境脆弱性评价初探[J]. 中国沙漠, 2007, 27(6): 1012- 1017.

[3] 姚玉璧, 王润元, 邓振镛, 等. 黄河上游主要产流区气候变化及其对水资源的影响)) 以甘南高原为例[J]. 中国沙漠, 2007, 27(5): 903- 909.

[4] 李生辰, 徐亮, 郭英香, 等. 近 34 a 青藏高原年降水变化及其分布[J]. 中国沙漠, 2007, 27(2): 307- 314.

[5] 蓝永超, 林舒, 李州英, 等. 近 50 a 来黄河上游水循环要素变化分析[J]. 中国沙漠, 2006, 26(5): 849- 854.

[6] 乔艳丽, 古松, 唐艳鸿, 等. 青藏高原的散射辐射特征[J]. 南开大学学报(自然科学版), 2008, 41(3): 69- 78.

[7] 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.

[8] 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, 24(4): 385- 391.

[9] 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.

[10] 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.

[11] 杨兴国, 杨启国, 柯晓新, 等. 旱作春小麦蒸散量测算方法的比较[J]. 中国沙漠, 2004, 24(5): 651- 656.

[12] 郭瑞萍, 莫兴国. 森林、草地和农田典型植被蒸散量的差异[J]. 应用生态学报, 2007, 18(8): 1751- 1757.

[13] 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.

[14] 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.

[15] 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.

[16] 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.

- [17] 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.
- [18] Brenner A J, Incoll L D. The effect of clumping and stomata response on evaporation from sparsely vegetated shrublands [J]. *Agri For Meteorol*, 1997, 84: 187- 205.
- [19] 何明珠, 李新荣, 张景光, 等. 土壤生物结皮蒸散特征研究[J]. 中国沙漠, 2006, 26(2): 161- 164.
- [20] 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.
- [21] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. FAO irrigation and drainage paper No. 56, crop evapotranspiration[M]. Rome, Italy: FAO, 1998.
- [22] 李晓军, 李取生. 东北地区参考作物蒸散发确定方法研究[J]. 地理科学, 2004, 24(2): 212- 216.
- [23] 李玉霖, 崔建垣, 张铜会. 参考作物蒸散发量计算方法的比较研究[J]. 中国沙漠, 2002, 22(4): 372- 376.
- [24] 吴锦奎, 丁永建, 沈永平, 等. 黑河中游地区湿草地蒸散发量试验研究[J]. 冰川冻土, 2005, 27(4): 582- 590.
- [25] 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(一)[J]. 干旱区地理, 1992, 15(3): 92- 99.
- [26] 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.
- [27] 康绍忠, 刘晓明, 高新科, 等. 土壤2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.
- [28] Kim K S, Beard J B. Comparative evapotranspiration rates and associated plant morphological characteristics [J]. *Crop Science*, 1988, 28: 328- 331.
- [29] 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.

## Correlation between Evapotranspiration and Climate Factors in Warm Steppe in Source Region of Yangtze, Yellow and Yalu Tsangpo Rivers

ZHANG Yao2sheng<sup>1</sup>, ZHAO Xin2quan<sup>1</sup>, ZHAO Shuang2xi<sup>1,2</sup>, FENG Cheng2bin<sup>1,2</sup>

(1 Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences; Key Laboratory of Adaptation and Evolution of Plateau Biota, Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810001, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Based on the meteorological data of HOBO Weather Station(U. S. A), the reference evapotranspiration of crop in warm steppe in source region of Yangtze, Yellow and Yalu Tsangpo rivers was calculated by the FAO Penman-Monteith equation, by which in combination with FAO256 recommended value the actual evapotranspiration was calculated. The results show that: there is obviously seasonal variation of the actual evapotranspiration and its curve is unimodal type with the largest 1194 mm/d<sup>1</sup> in middle2August; the annual evapotranspiration is up to 2751.36 mm and the daily evapotranspiration in warm season is larger than that in cold season. Analyzing result of correlation between actual evapotranspiration and climate factors suggests that the significance from larger to smaller are as: air temperature> solar radiation> air relative humidity> wind speed. Based on the results of correlation analysis, a simplified calculation equation was established to calculate the evapotranspiration of in warm steppe in source region of Yangtze, Yellow and Yalu Tsangpo rivers.

**Keywords:** evapotranspiration; climate factor; warm steppe; source region of Yangtze, Yellow and Yalu Tsangpo rivers