

# 额济纳绿洲草地蒸散系数研究

侯兰功<sup>1</sup>, 肖洪浪<sup>2</sup>

(1. 滁州学院 地理信息与旅游学院, 安徽 滁州 239000; 2. 中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000)

**摘要:**联合国粮农组织推荐的蒸散计算方法中,蒸散系数是计算实际蒸散必不可少的参数。本文从蒸散系数的定义出发,在 2005 年额济纳绿洲生长季连续观测的基础上,运用波文比能量平衡法计算额济纳绿洲草地的实际蒸散量,利用 FAO 56 Penman-Monteith 模型计算草地的参考蒸散,将实际蒸散与参考蒸散相除即得到额济纳绿洲草地的蒸散系数。通过研究发现:生长季草地的蒸散量(ETc)为 446.96 mm,从生长季初期开始,草地的蒸散量开始增加,在 6 月后半月达到最大值 6.724 mm/d,此后蒸散量开始快速下降,在生长季末期达到最低值 1.215 mm/d;蒸散系数(Kc)呈现出与蒸散量(ETc)相同的变化趋势,自生长季初期开始蒸散系数快速上升,在 6 月后半月达到生长季最大值 0.623,之后随着草地生长减缓,蒸散系数快速下降,直至生长季末期草地停止生长。对额济纳绿洲草地蒸散系数的计算可以为该地区准确估算草地生态需水量提供依据。

**关键词:**额济纳绿洲; 生长季; 蒸散系数; 蒸散发

中图分类号:S718.5

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2012)00-0126-04

## Study on Evapotranspiration Coefficient of Grassland during the Growing Season in the Ejina Oasis

HOU Lan-gong<sup>1</sup>, XIAO Hong-lang<sup>2</sup>

(1. College of Geographic Information and Tourism, Chuzhou University, Chuzhou, Anhui 239000, China;

2. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** According to works of Food and Agriculture Organization of the United Nations, evapotranspiration coefficient is essential parameter to calculate actual evapotranspiration. Based on the definition of evapotranspiration coefficient and successive observation, evapotranspiration (ETc) of grassland in the Ejina oasis of northwest China was estimated by application of Bowen ration-energy balance method (BREB), and reference evapotranspiration was calculated by using FAO 56 Penman-Monteith model during the growing season in 2005. Then, according to the definition, the evapotranspiration coefficient of grassland was given in the Ejina oasis. During the growing season, total ETc was 446.96 mm. From the beginning of growing season, the ETc increased gradually, and reached its maximum value of 6.724 mm/d in the last fifteen days of June. Hereafter the ETc dropped rapidly, and reached its minimum value of 1.215 mm/d at the end of growing season. The variation pattern of crop coefficient ( $K_c$ ) was similar to that of ETc. From the beginning of growing season, the  $K_c$  value increased rapidly, and reached its maximum value of 0.623 in the last fifteen days of June. Afterward, with slowing growth of grassland, the value dropped rapidly at the end of growing season. The evapotranspiration coefficient is helpful to estimate accurately ecological water demand of grassland in the Ejina oasis.

**Key words:** Ejina oasis; the growing season; evapotranspiration coefficient; evapotranspiration

黑河流域下游的额济纳绿洲处于阿拉善高原与北山荒漠的交界带,气候极端干旱,自然条件极为严

酷,生态环境极端脆弱。在这里,水是生态环境演化的关键驱动因子和生态系统维持的主要制约因

收稿日期:2012-03-01

修回日期:2012-04-22

资助项目:安徽高校省级自然科学基金项目(KJ2012B124);安徽省高校省级优秀青年人才基金项目(2012SQRL158);安徽省自然科学基金资助项目(1208085QD73);滁州学院科研启动基金(2011qd04)

作者简介:侯兰功(1979—),男,安徽淮南人,博士,主要从事生态水文与水资源管理研究。E-mail:soundskyhlg@163.com

素<sup>[1-3]</sup>。对植物蒸散发的研究有助于更深入地了解极端干旱区荒漠绿洲的水分平衡问题,并能够为确定绿洲的实际生态需水量提供依据,从而为合理的利用水资源,保护和维持荒漠绿洲生态系统的稳定性提供帮助。

## 1 研究区与研究方法

### 1.1 研究区概况

本研究的野外波文比能量平衡观测站点位于内蒙古自治区阿拉善盟额济纳旗七道桥胡杨林保护区(42°21'N, 101°15'E), 高程 920.5 m, 面积 1 333 hm<sup>2</sup>。该地区深处内陆, 气候极端干旱, 多年平均气温 8.2℃, 多年平均降水量为 36.6 mm, 且主要集中在 6—8 月。多年平均自由水面蒸发量为 3 505.7 mm, 大约是降水量的 100 倍。年均相对湿度为 42%~35%, 湿润系数低于 0.009%, 是中国最干旱的地区之一。

### 1.2 研究方法

1.2.1 观测方法 波文比—能量观测系统是由美国 COMBELL 公司生产的。将波文比观测系统的上下臂分别安装在研究区空旷的草地冠层顶部上方的 0.25 m 和 1.25 m 处, 上下臂安装有空气温度、相对湿度探头; 在 1.25 m 处安装风速和风向探头, 并在 1.25 m 处安装总辐射和净辐射探头, 在地下 8 cm 处安装土壤温度、土壤水分、热通量探头, 所有项目每 20 min 观测一次。

1.2.2 实际蒸散量(ET<sub>c</sub>)计算 波文比能量平衡法(BREB)已经被广泛用来估算蒸散耗水量<sup>[4-7]</sup>, 计算蒸散系数<sup>[8]</sup>, 研究植物与水的关系<sup>[9-11]</sup>, 校正其他的蒸散模型计算结果<sup>[12-14]</sup>。该方法只需要空气温度和湿度梯度以及太阳净辐射与土壤热通量即可计算蒸散量, 因此被认为是估算实际蒸散发较为简便、有效的方法。该方法表达式如下:

$$ET_c = \frac{1}{\lambda} \frac{R_n - G}{1 + \gamma \Delta T / \Delta e} \quad (1)$$

式中:  $R_n$ ——太阳净辐射(W/m<sup>2</sup>);  $ET_c$ ——实际蒸散发(mm);  $G$ ——土壤热通量(W/m<sup>2</sup>);  $\Delta T$ ——上下空气温度差(℃);  $\Delta e$ ——上下水汽压差(kPa);  $\lambda$ ——汽化潜热(MJ/kg);  $\gamma$ ——干湿球常数(kPa/℃)。

本文收集了研究区 2005 年 5 月 16 日至 9 月 30 日的连续波文比观测数据与自动气象站数据。为了体现植物在生长季节的快速变化, 本文选用半个月为一个时间步长, 运用式(1)计算绿洲草地在生长季节每半个月的实际蒸散量。

1.2.3 参考蒸散(ET<sub>0</sub>)与蒸散系数(K<sub>c</sub>)的计算 利

用波文比能量平衡法估算出植物的实际蒸散量(ET<sub>c</sub>), 按照蒸散系数(K<sub>c</sub>)的定义<sup>[15]</sup>, 即蒸散系数(K<sub>c</sub>)等于实际蒸散量(ET<sub>c</sub>)与参考蒸散量(ET<sub>0</sub>)的比值, 就可以很容易的确定所研究植物的蒸散系数。对于参考蒸散发的计算, 联合国粮农组织推荐的 FAO56 Penman—Monteith(简称 FAO56 P—M)模型只需要输入很少的几个气象参数即可进行计算, 被公认为不论在湿润气候条件下还是干旱气候条件下计算参考蒸散量最精确的模型之一<sup>[15-18]</sup>。因此, 只要确定某种植物的蒸散系数, 即可利用少量的气象参数, 不依赖于特定的蒸散观测点, 就可以很容易地估算出该植被区的实际蒸散量。FAO56 P—M 计算公式如下:

$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma [900 / (T_a + 273)] u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)} \quad (2)$$

式中:  $ET_0$ ——每天的参考蒸散发(mm/d);  $R_n$ ——太阳净辐射[MJ/(m<sup>2</sup>·d)];  $G$ ——土壤热通量[MJ/(m<sup>2</sup>·d)];  $\Delta$ ——饱和水汽压曲线斜率(kPa/℃);  $\gamma$ ——干湿球常数(kPa/℃);  $T_a$ ——平均大气温度(℃);  $u_2$ ——2 m 处风速(m/s);  $e_s$ ——饱和水汽压(kPa);  $e_a$ ——实际水汽压(kPa)。

蒸散系数计算公式如下:

$$K_c = \frac{ET_c}{ET_0} \quad (3)$$

## 2 结果与分析

### 2.1 绿洲草地生长季蒸散(ET<sub>c</sub>)变化

2005 年生长季(5 月 16 日—9 月 30 日)草地的蒸散发量随时间的变化情况如图 1 所示, 整个生长季内草地的蒸散量呈单峰型分布趋势。在生长季初期(5 月后半月)草地平均蒸散量为 3.519 mm/d; 进入 6 月份后蒸散量快速增加, 在 6 月后半月达到整个生长季的最大值 6.724 mm/d; 此后蒸散量随时间呈逐渐下降趋势, 在 9 月后半月达到生长季的最低值 1.215 mm/d。而整个生长季内(大约 138 d), 草地总的蒸散量为 446.96 mm。

在生长季内, 草地的蒸散量与太阳净辐射和土壤含水量的变化趋势基本一致, 太阳净辐射和土壤含水量的峰值都是出现在草地蒸散最旺盛的 6 月份(图 1a, 1c); 而气温的变化趋势相对滞后于蒸散量的变化, 气温的最大值出现在 7 月份(图 1d); 蒸散量与空气相对湿度的变化趋势相反, 相对湿度的最低值出现在蒸散发最旺盛的 6 月份, 最高值出现在蒸散发相对较弱的 8 月份(图 1b)。

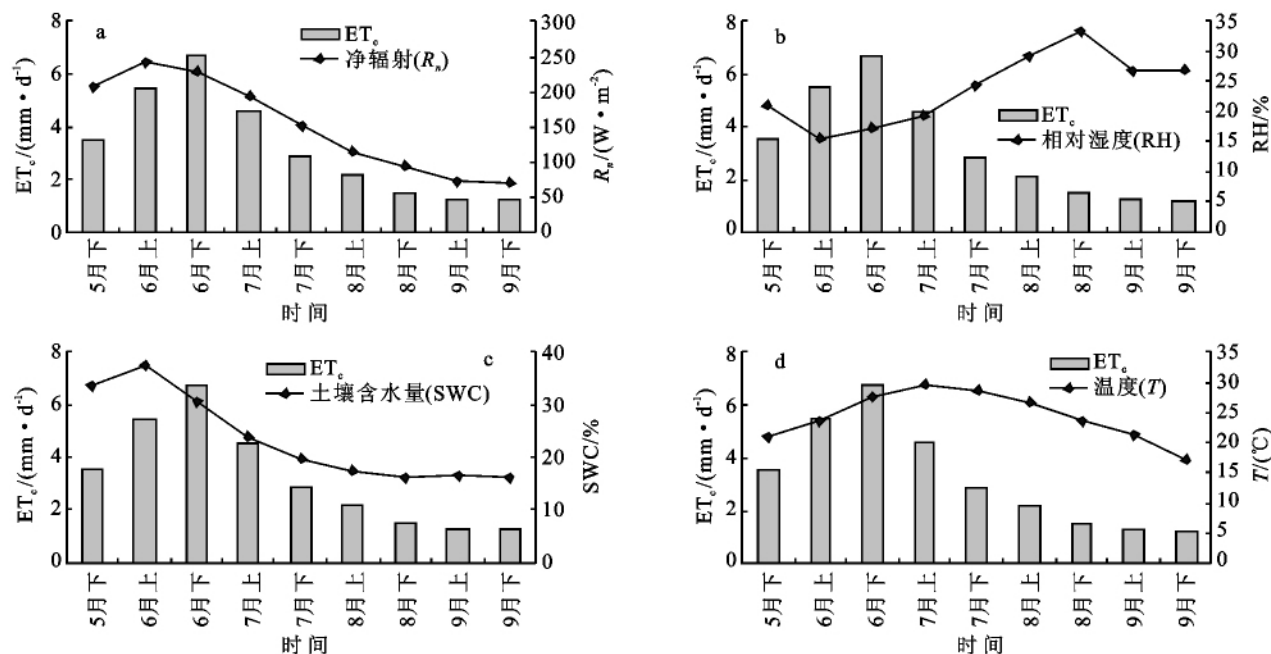


图 1 草地生长季内蒸散量随时间分布

## 2.2 参考蒸散 ( $ET_0$ )

在生长季内,参考蒸散量的分布情况与草地的实际蒸散量分布基本一致(图 2)。在 6 月份和 7 月前半月参考蒸散量最大,都在  $10 \text{ mm/d}$  以上;在这之后,参考蒸散量随时间逐渐降低。虽然太阳净辐射最高值出现在 6 月份,但气温最高值却出现在 7 月前半月,因此 6 月份和 7 月前半月的参考蒸散量相差较小,均在  $10 \text{ mm/d}$  以上,明显高于生长季其他各时间段的参考蒸散量。

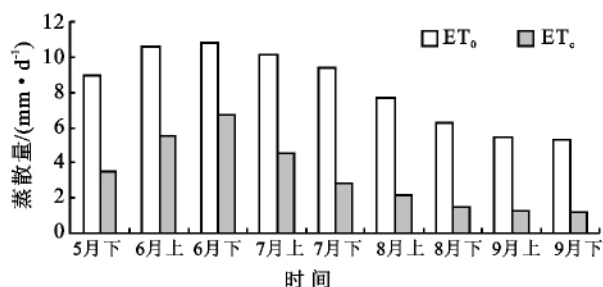


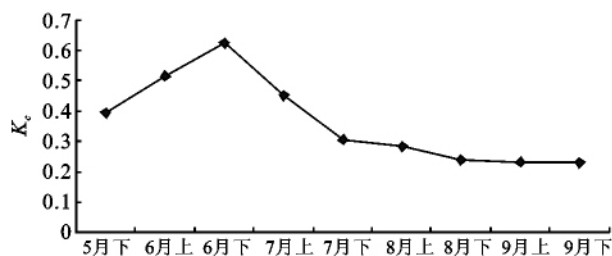
图 2 参考蒸散与实际蒸散的分布趋势比较

## 2.3 生长季草地蒸散系数 ( $K_e$ )

草地生长季蒸散系数的分布趋势与草地实际蒸散量的分布趋势一致。在生长季,草地的蒸散系数主要可以分为 3 个阶段:初始阶段,从 5 月到 6 月前半月,蒸散系数从初始值的 0.395 快速增加到 0.515;在植物生长中期,蒸散系数达到了生长季的最大值 0.623;在草地生长后期,蒸散系数快速下降,直至植物停止生长,蒸散系数降到 0.452(图 3)。

蒸散系数综合反映了植物特性和土壤蒸发的影响。在生长季初期,草地刚刚萌发新芽,此时温度刚刚回升,土壤蒸发较弱,因此初始蒸散系数较低;进入

6 月份后,草地叶面积达到最大,太阳净辐射和气温也都达到高值,此时土壤含水量也达到最大,蒸发达到最强,因此这个时间段内的蒸散系数达到生长季最大值;而进入生长季后期,植物生长减缓,逐渐凋萎,土壤含水量快速降低,蒸发减弱,因此蒸散系数也快速下降,直至降到生长季最低。

图 3 生长季草地蒸散系数 ( $K_e$ ) 随时间分布情况

## 3 结论

本研究的目的是为了估算中国西北极端干旱区荒漠绿洲草地生长季的蒸散量以及蒸散系数。通过计算发现,在生长季内,草地的实际蒸散量与蒸散系数的变化趋势一致,最大值均出现在 6 月份,这主要是由于这个时间段内光热条件以及土壤水分含量较高,有效地促进了草地的蒸发量。本研究得到的结果,可在生长季缺乏蒸散发观测数据的情况下,运用普通的气象数据估算出草地生长季的实际蒸散量。可以为确定草地的生态需水量提供依据,从而为制定极端干旱区绿洲的生态维持与恢复方案提供帮助。

参考文献:

[1] 韦东山,张秋良,王立明,等. 额济纳地区草地可持续经

- 营策略[J]. 内蒙古科技与经济, 2003(5): 26-28.
- [2] 肖洪浪, 程国栋. 黑河流域水问题与水管理的初步研究[J]. 中国沙漠, 2006, 26(1): 1-5.
- [3] 周茂先, 肖洪浪, 罗芳, 等. 额济纳三角洲地下水盐特征与植被生长的相关研究[J]. 中国沙漠, 2004, 24(4): 431-436.
- [4] 李佳陶, 余伟莅, 李钢铁, 等. 不同地下水位胡杨蒸腾速率与叶水势的变化分析[J]. 内蒙古林业科技, 2006(1): 1-4.
- [5] Fritschen L J. Evapotranspiration rates of field crops determined by the Bowen ratio method[J]. Agron. J., 1966, 58(3): 339-342.
- [6] Malek E, Bingham G E, McCurdy G D. Evapotranspiration from the margin and moist playa of a closed desert valley[J]. J. Hydrol., 1990, 120(1/4): 15-34.
- [7] Wight J R, Hanson C L, Wright J L. Comparing Bowen ratio-energy balance systems for measuring ET[C]//Allen R G, Van Bavel C M U. Management of Irrigation and Drainage Systems, Integrated Perspectives. New York: Am. Soc. Civ. Eng., 1993.
- [8] Cargnel M D, Orchansky A L, Brevedan R E, et al. Evapotranspiration measurements over a soybean crop [C]//Camp C R, Sadler E J, Yoder R E. Evapotranspiration and Irrigation Scheduling. Proceedings of the International Conference, San Antonio: Am. Soc. Agric. Eng., St. Joseph, MI, 1996.
- [9] Malek E, Bingham G E. Growing season evapotranspiration and crop coefficient [C]//Allen R G, Van Bavel C M U. Management of Irrigation and Drainage Systems, Integrated Perspectives. New York: Am. Soc. Civ. Eng., 1993.
- [10] Grant D A, Meinzer F C. Regulation of transpiration in field-grown sugarcane: evaluation of the stomatal response to humidity with the Bowen ratio technique[J]. Agric. For. Meteorol., 1991, 53(3): 169-183.
- [11] Malek E, Bingham G E, McCurdy G D. Continuous measurement of aerodynamic and alfalfa canopy resistances using the Bowen ratio-energy balance and Penman-Monteith methods[J]. Boundary-Layer Meteorol., 1992, 59(1/2): 187-194.
- [12] Alves I, Perrier A, Pereira L S. Penman-Monteith equation: how good is the 'big leaf' [C]//Camp C R, Sadler E J, Yoder R E. Evapotranspiration and Irrigation Scheduling. Proceedings of the International Conference, San Antonio: Am. Soc. Agric. Eng., St. Joseph MI, 1996.
- [13] Ortega-Farias S O, Cuenca R H, English M. Hourly reference evapotranspiration by Bowen ratio and Penman methods [C]//Allen R G, Van Bavel C M U. Management of Irrigation and Drainage Systems, Integrated Perspectives. New York: Am. Soc. Civil Eng., 1993.
- [14] Farahani H J, Bausch W C. Performance of evapotranspiration models for maize-bare soil to closed canopy[J]. Trans. ASAE, 1995, 38(4): 1049-1059.
- [15] Todd R W, Klocke N L, Arkebauer T J. Latent heat fluxes from a developing canopy partitioned by energy balance-combination models [C]//Camp C R, Sadler E J, Yoder R E. Evapotranspiration and Irrigation Scheduling. Proceedings of the International Conference. San Antonio: Am. Soc. Agric. Eng., St. Joseph MI, 1996.
- [16] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. FAO 56 Penman-Monteith model. FAO Irrigation and Drainage Paper 56, Rome, 1998.
- [17] Walter I A, Allen R G, Elliott R, et al. ASCE's Standardized Reference Evapotranspiration Equation [C]//Proceedings of the 4th National Irrigation Symposium, 2000.
- [18] Temesgen B, Eching S, Davidoff B, et al. Comparison of some reference evapotranspiration equations for California[J]. J. Irrig. Drain. Eng. ASCE, 2005, 131(1): 73-84.