

毛乌素沙地青贮玉米和紫花苜蓿作物系数研究^①

张娜¹, 屈忠义^{1*}, 郭克贞², 邬佳宾², 徐冰², 姜梦琪¹

(1 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018; 2 水利部牧区水利科学研究所, 呼和浩特 010020)

摘要: 作物系数是估算作物需水量的一个重要参数, 科学地确定作物系数对准确计算农田作物耗水量、制定科学合理的灌溉制度及水利工程规划设计等具有重要的意义和实际应用价值。通过 Penman-Monteith 公式、ENVIdata-DT 草地蒸腾自动测量系统确定充分灌溉条件下毛乌素沙地青贮玉米及紫花苜蓿的逐日参考作物蒸散 ET_0 与实际蒸散 ET_c , 计算青贮玉米及紫花苜蓿的逐日作物系数, 得出青贮玉米在整个生育期的作物系数均值为 0.91, 且在各生长阶段相差较小。苜蓿第一茬及第二茬作物系数随着时间的推移呈现递增的规律, 且在 6 月 27 日第一茬收割之后, 作物系数大幅减小, 第一茬的作物系数均值为 0.87, 第二茬为 0.85。并通过播后天数、累积积温逐日模拟苜蓿及青贮玉米生育期内的作物系数, 结果显示, 在以播后天数、生育期累积积温为自变量的拟合模型中, 决定系数 R^2 介于 0.59 ~ 0.72, 拟合效果较好。

关键词: 作物系数; 紫花苜蓿; 青贮玉米; 播后天数; 累积积温

中图分类号: S 274.1

参考作物需水量法是确定作物需水量($K_c ET_0$)最常用的方法之一^[1], 作物系数可反映作物和参考作物之间需水量的差异, 是确定作物需水量的重要参数。目前, 作物系数普遍通过田间实验的方法确定, 需要投入大量人力物力且试验周期较长, 所以探讨作物系数的非实验性方法具有重要的生产意义^[2]。建立作物系数与各影响因子的推导模型成为研究作物系数的重要非实验手段, 如作物种类、种植品种、种植区域、生育期、叶面积指数、气象资料等^[1]。许多研究人员对作物系数进行时间上的推导研究, 如将作物的生育期进行分段研究, 或以播后天数为自变量进行建模, 如: Wright 和 Jensen^[3]采用 3 次多项式, 将作物系数曲线分成播种至完全覆盖和完全覆盖至收获两个大的时段进行了详细的研究。Steele 等^[4]以播后天数为变量, 采用 5 次多项式进行回归, 分析确定了玉米的作物系数曲线。累积积温作为重要的温度指标被广泛用于作物系数的推导; 孙景生等^[5]建立了春小麦作物系数与播后天数、生育期累积积温关系的函数曲线。

由于目前确定作物实际蒸散量的常用方法均较难获取蒸散值的逐日数据, 如土壤水量平衡法, 而本

文通过引进美国产的 ENVIdata-DT 草地蒸腾自动测量系统, 可直接获取作物半小时为步长的蒸散值。即目前较多研究以作物的生育阶段或旬周期来进行研究^[6-9], 而在作物的整个生育期以日作物系数为研究目标的成果较少。本文利用 Penman-Monteith 公式计算参考作物蒸散量 ET_0 , ENVIdata-DT 草地蒸腾自动测量系统测定作物的实际蒸散值 ET_c , 得出作物在整个生育期的日作物系数变化规律, 并通过多项式构建充分灌溉条件下青贮玉米及紫花苜蓿作物系数的拟合模型。青贮玉米及紫花苜蓿作为我国北方牧区重要的牧草, 其需水量的研究一直以来被广泛重视, 本研究结果可为当地苜蓿及青贮玉米需水量的计算提供依据, 进一步探讨非实验方式模拟计算作物系数的可行性。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验地位于 37°38' ~ 39°23'N, 108°17' ~ 109°40'E, 海拔高度 1 200 ~ 1 350 m 的伊克昭盟乌审旗图克苏木境内的毛乌素沙地开发整治研究中心。该区属于典

基金项目: 国家自然科学基金项目(51069006、51309165)、引进国际先进农业科学技术计划(948 计划)项目 (201202) 和中国水科院科研专项项目(MK2014J06)资助。

* 通讯作者(quzhongyi68@sohu.com)

作者简介: 张娜(1988—), 女, 内蒙古呼和浩特人, 博士研究生, 主要从事非充分灌溉理论研究。E-mail: 710840895@qq.com

型的温带大陆性季风气候,四季分明,春季多风少雨,夏季降雨量相对较多且比较集中,主要以暴雨或阵雨的形式降落,秋冬季干燥且冬季相对寒冷。年蒸发量为 2 100~2 600 mm,年日照时数 2 700~3 100 h, $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温 2 500~3 200 $^{\circ}\text{C}$,年均气温 6~8 $^{\circ}\text{C}$,极端情况下最高气温 36.5 $^{\circ}\text{C}$,最低气温零下 29 $^{\circ}\text{C}$,无霜期 130~160 天。年均风速 3.3 m/s,大风扬沙日数 40~50 天,沙暴日数 16 天,以西北风为主,大风多集中于 4—5 月。试验区的土壤除滩地上的沙地草甸土外,绝大部分以风沙土为主,其中流动风沙土占 65%,固定、半固定风沙土占 10%,滩地土壤(丘间低地)占 25%。土壤性质见表 1。

1.2 试验设计

研究作物为苜蓿及青贮玉米两种,根据 FAO-56

推荐的作物生育阶段划分方法,结合作物的实际生长情况,分为生长初期、快速生长期、生长中期和生长后期 4 个阶段。其中,苜蓿的研究周期为 2013 年 4 月 27 日至 8 月 24 日,共分为两茬,在 6 月 27 日进行第一茬的收割;青贮玉米的生育期为 2013 年 5 月 20 日至 9 月 2 日,试验为大田试验,监测的玉米地及苜蓿地相邻,分别在苜蓿地及玉米地中央位置各安置 2 套草地蒸腾自动测定系统。

苜蓿及青贮玉米均为充分灌溉,土壤水分下限控制指标为田间持水量的 75%,土壤含水率通过 TRIME-3 型 TDR 每 7 天观测一次,灌溉和降雨前后加测一次,并结合土钻取土样,采用烘干法校核。灌溉水源为地下水,采用机井灌溉,通过水表计量水量。

表 1 试验区土壤性质
Table 1 The soil properties of the experimental site

土壤颗粒组成(g/kg)					土壤 类型	体积质量 (g/cm ³)	田间持水量(%)	
>1 mm	1~0.5 mm	0.5~0.25 mm	0.25~0.75 mm	<0.75 mm			质量	体积
0	2.5	76.6	575.7	345.2	沙土	1.41	15.43	22.10

1.3 作物系数与蒸散量计算

1.3.1 作物系数计算 分别对无水分胁迫下的青贮玉米及紫花苜蓿在整个生育期的作物系数进行逐日计算,公式如下:

$$K_c = \frac{E_{T_c}}{E_{T_0}} \quad (1)$$

其中,参考蒸散量通过 Penman-Monteith 公式计算得出,实际蒸散量通过 ENVIdata-DT 草地蒸腾自动测量系统直接测定。

1.3.2 作物蒸散量计算 采用联合国粮农组织(FAO)推荐的 Penman-Monteith 公式计算参考作物蒸散量,PM-ET₀法是固定高度(12 cm)的假想参考作物的蒸散速率,该参考作物的表面阻力为 70 sm⁻¹,反照率为 0.23,近似地模拟没有病害感染且长势一致、生长旺盛、完全覆盖土壤表面、有充足的水分和养分供给、广阔表面的作物蒸散过程^[2-4]。具体计算公式如下:

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

式中:ET₀:草类参考蒸散量(mm/d);R_n:作物表面净辐射量(MJ/(m²·d));G:土壤热通量(MJ/(m²·d));T:2 m 高度处的日平均气温($^{\circ}\text{C}$);u₂:2 m 高度处的风速(m/s);e_a:饱和水汽压(kPa);e_s:实际水汽压(kPa);e_s-e_a:水汽压缺失值(kPa); Δ :水汽压曲线斜率(kPa/ $^{\circ}\text{C}$);

γ :测量学常数(kPa/ $^{\circ}\text{C}$)。

1.4 数据测定与收集

作物的蒸散由“草地潜在蒸散力自动测试系统”直接测定,该系统由 3710E 型草地潜在蒸散自动测试仪、SI-111-L20 型红外叶温仪、Trime-PICO32/110mm 型 TDR 土壤水分仪、RHT2v-02 型温湿度自动测定仪及 3525 型自记雨量计组成。ENVIdata-DT 草地蒸腾自动测量系统是一款可直接自动测定蒸散的仪器,可以估算出草皮、农作物等绿色覆盖物的ET₀值。仪器隐蔽在顶部的陶瓷蒸发器可以模拟太阳能吸收和作物灌溉的蒸散阻力。红外叶表温度传感器可实时监测植物叶表温度,同时配备空气温度湿度传感器用来监测田间小气候即空气温湿度,土壤温湿度传感器用来监测土壤墒情。

数据通过远程传送模式直接将记录的数据从野外传送到服务器上。记录的数据包括蒸腾蒸散量、叶温、土壤温湿度、含水率及降雨量,数据每半小时存储一次。气象数据由当地气象站提供。

2 结果与分析

2.1 作物系数分析

2.1.1 青贮玉米作物系数研究 通过公式(1)计算得出青贮玉米在整个生育期的逐日作物系数(图 1),其中平均值为 0.91,最大值为 1.41,最小值为 0.4,标准差为 0.20,方差为 0.042。方差和标准差较小,

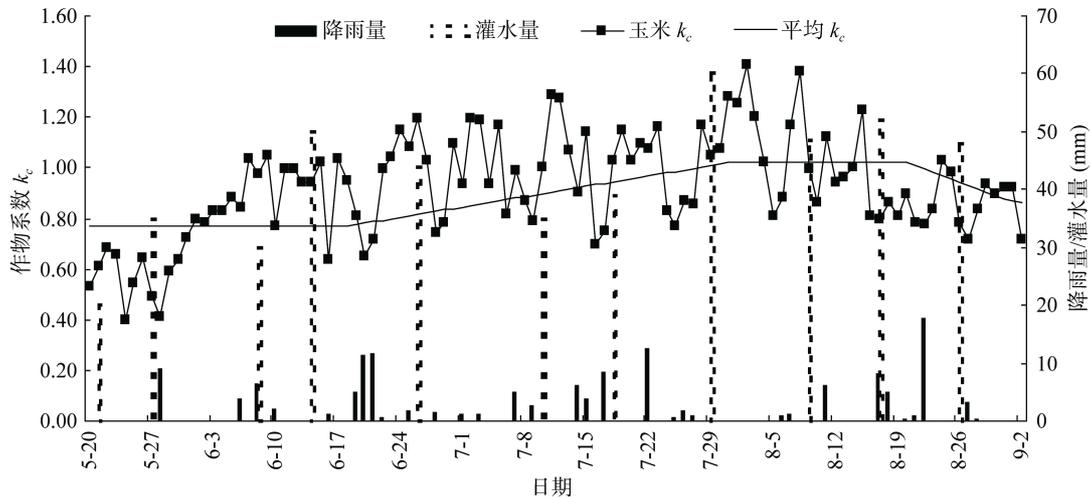


图 1 青贮玉米作物系数生育期内逐日变化过程
Fig. 1 The daily change of crop coefficient of silage maize during growth period

说明数据较稳定。青贮玉米在整个生育期内的日作物系数出现较多个峰值，波动较大，已有研究成果表明表层土壤的干湿变化是导致作物系数过程线波动的关键影响因子，灌水或雨后土壤表层变湿将引起作物系数的波动，在生育初期影响很大，随着叶面积覆盖增大影响减小^[1]。可知青贮玉米作物系数在整个生育期的多个局部最小值多伴随着降雨或灌水，即 K_c 与生育期内降雨或灌溉引

起的土壤湿润程度及气象因素的变化具有较密切的关系^[10]。

由青贮玉米在各生长阶段的作物系数均值(表 2)可知,青贮玉米在整个生育期的各个阶段作物系数相差较小,首先由于青贮玉米是保鲜收割,生长后期很短, K_c 值只从中期阶段的 1.02 减少到 0.86 的时候就收割了,其次,生长初期持续的时间较长,使其作物系数较大。

表 2 玉米各生育阶段的作物系数
Table 2 The maize crop coefficients of various growth stages

参数	生长初期	快速生长期	生长中期	生长后期	全生育期
起止时间	5.20—6.18	6.19—7.31	8.11—8.20	8.20—9.2	5.20—9.2
持续时间(d)	30	43	20	13	106
作物系数	0.77	0.99	1.02	0.86	0.91

2.1.2 紫花苜蓿作物系数 苜蓿分为两茬,具体刈割时间及生育期如表 3。由苜蓿在整个生育期作物系数的逐日变化可知(图 2),整体而言,规律较为明显,第一茬及第二茬作物系数随着时间的推进基本呈现递增的规律,且在 6 月 27 日第一茬收割之后,作物系数大幅减小,赵淑银^[11]指出苜蓿作物系数在相同气候和土壤条件下,随着刈割次数的增加,生长阶段内 K_c 值出现多次急剧变化,在收获前为最大,而在

刚刚收割后为最小。

苜蓿在第一茬的作物系数均值为 0.87,第二茬为 0.85,Doorenbos 等^[12-13]推荐苜蓿全生长季作物系数为 0.85~1.05,本试验结果处于该范围内;但略高于赵淑银^[11]在内蒙古呼和浩特的研究结果(0.81);与郭克贞等^[14]在毛乌素沙地的研究结果(0.85)较为接近,且本试验的结果除了生长初期明显较大,其他阶段均与之较为接近,对于本文生长初期的作物系

表 3 苜蓿各生育阶段作物系数
Table 3 The alfalfa crop coefficients of various growth stages

参数	生长初期	快速生长期	生长中期	生长后期	全生育期
第一茬	起止时间	4.27—5.10	5.11—5.26	5.27—6.7	6.7—6.26
	作物系数 k_c	0.68	0.82	1.02	0.97
第二茬	起止时间	6.27—7.14	7.15—8.2	8.3—8.16	8.17—8.24
	作物系数 k_c	0.73	0.81	0.95	0.89

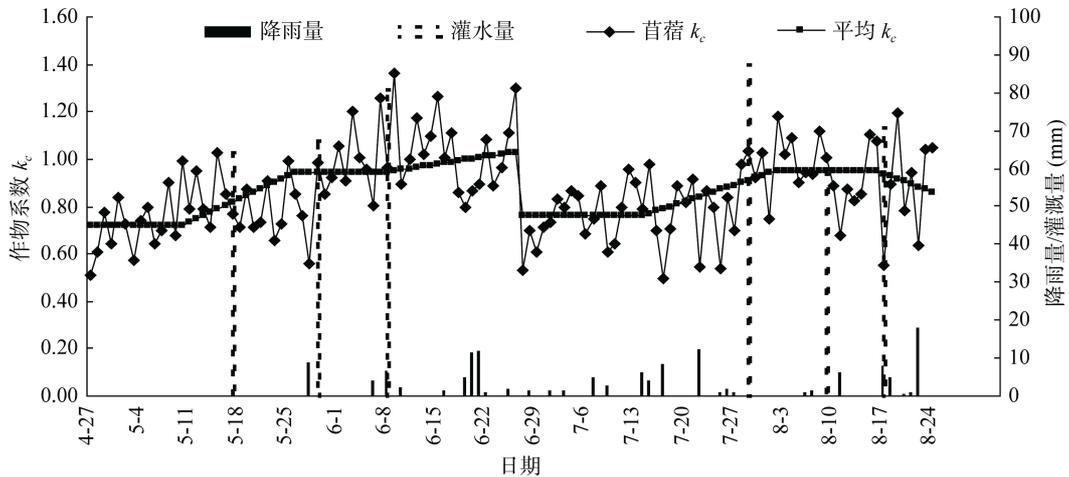


图 2 苜蓿作物系数变化

Fig. 2 The change of alfalfa crop coefficients with growth date

数较高，可能是由于郭克贞等研究中紫花苜蓿共刈割 3 次，而本试验苜蓿共分两茬收割，减少刈割次数，势必导致其作物系数升高^[15]。

由表 3 可知紫花苜蓿第一茬的快速生长期、生长中期及生长后期的作物系数均高于第二茬，而生长初期第二茬高于第一茬。而前人的研究结果则不尽相同，如马令法等^[16]的研究结果紫花苜蓿的第一茬作物系数明显高于第二茬且基本接近其 2 倍；李品红等^[17]的研究结论为坝上地区 2008 年紫花苜蓿第二、三茬作物系数明显高于第一茬，达其 2 倍以上；丁宁等^[15]指出 2010 年坝上地区紫花苜蓿全生长季作物系数为第一茬最高 0.83，第二和第三茬较为相近分别为 0.74、0.75。本试验结果与丁宁的结论较为接近，第一茬略高于第二茬，这可能是研究区域不同的影响。

2.2 基于播后天数、累积积温的作物系数回归模型

鉴于前人已通过多项式建立了播后天数及生育期累积积温与作物系数的关系，且取得较好的效果^[3-5]。本文通过多项式建立播后天数、生育期累积积温与青贮玉米及苜蓿两种作物系数的相关关系(表 4)，其中 y 分别代表青贮玉米及紫花苜蓿作物系数 k_c ， x 代表播后天数、生育期累积积温，根据多项式曲线与数据点的拟合程度及相关系数的大小确定拟合模型，发现青贮玉米的作物系数 k_c 与播种后天数呈现较好的 6 次多项式拟合效果，而与积温则是 5 次多项式拟合效果最好。苜蓿作物系数 k_c 与播后天数的关系可用 3 次多项式进行良好地表达，与生育期累积积温的关系则呈现为 6 次多项式关系。较高的决定系数 R^2 表明曲线与数据点可较好地拟合，检验结果说明模型及相关系数均为显著。

表 4 青贮玉米、紫花苜蓿作物系数 k_c 与播后天数、生育期累积积温回归模型

Table 4 The regression models of maize and alfalfa crop coefficient k_c with the number of days after sowing, accumulated temperature during growth period

作物	自变量	拟合次数	模型表达式	R^2	P	$r_{0.01}$
青贮玉米	播种后天数	6 次	$y = 5 \times 10^{-12}x^6 - 2 \times 10^{-10}x^5 - 2 \times 10^{-7}x^4 + 4 \times 10^{-5}x^3 - 2.1 \times 10^{-3}x^2 + 5.67 \times 10^{-2}x + 0.4484$	0.72	0.001	0.52
	累积温度	5 次	$y = 4 \times 10^{-16}x^5 - 3 \times 10^{-12}x^4 + 6 \times 10^{-9}x^3 - 7 \times 10^{-6}x^2 + 3.2 \times 10^{-3}x + 0.4249$	0.67	0.05	0.48
紫花苜蓿	播种后天数	3 次	$y = 2 \times 10^{-6}x^3 - 3 \times 10^{-4}x^2 + 1.21 \times 10^{-2}x + 0.8104$	0.72	0.04	0.39
	累积温度	6 次	$y = 1 \times 10^{-18}x^6 - 9 \times 10^{-15}x^5 + 2 \times 10^{-11}x^4 - 2 \times 10^{-8}x^3 + 6 \times 10^{-6}x^2 + 4 \times 10^{-4}x + 0.709$	0.67	0.01	0.52

影响作物系数的因素比较多，但可归纳为 3 个方面：土壤水分条件；生物学因素；气象因素^[18]。在水肥适宜条件下建立作物系数与播后天数的相关关系是由作物品种的生物学特性决定的。由于不同地点、不同年份的作物发育速率有所不同，因此生育期累积积温作为热量指标，可将作物系数曲线与作物形态发育更为直接地联系起来。而气象因子作为作物生

长的环境因素， ET_0 及 ET_c 值已充分体现。

3 结论

1) 青贮玉米呈现出在整个生育期的各生育阶段不稳定性与阶段内的作物系数相对稳定性，在整个生育期内的日作物系数出现较多个峰值，日作物系数波动较大。各生育阶段为中期阶段作物系数最大，其次

是发育阶段,再次是后期阶段,而初期阶段作物系数最小。在整个生育期的作物系数均值为 0.91。

2) 苜蓿作物系数第一茬均值为 0.87,第二茬为 0.85。第一茬的快速生长期、生长中期及生长后期作物系数均高于第二茬,而初期第二茬高于第一茬。第一茬及第二茬作物系数随着时间的推进呈现递增的规律,且在 6 月 27 日第一茬收割之后,作物系数大幅减小。

3) 通过多项式分别建立播后天数、累积积温与 K_c 的关系,玉米的决定系数分别为 0.72、0.67;苜蓿的决定系数分别为 0.59、0.65,从拟合模型的决定系数可知青贮玉米的拟合效果要优于苜蓿。

参考文献:

- [1] 陈玉民. 关于作物系数的研究及新进展[J]. 灌溉排水, 1987, 6(2): 1-7
- [2] 雷志栋, 罗毅, 杨诗秀, 等. 利用常规气象资料模拟计算作物系数的探讨[J]. 农业工程学报, 1999, 15(3): 119-122
- [3] Wright J L, Jensen M E. Development and evaluation of evapotranspiration models for irrigation scheduling[J]. Trans of the ASAE, 1978, 21(1): 88-96
- [4] Steel D D, Sajid A H, Pruity L D. New corn evapotranspiration crop curves for southeastern North Dakota[J]. Trans of the ASAE, 1996, 39(3): 931-936
- [5] 孙景生, 刘祖贵, 张寄阳, 等. 风沙区春小麦作物系数试验研究[J]. 农业工程学报, 2002, 18(6): 55-58
- [6] 彭世彰, 李荣超. 覆膜旱作水稻作物系数试验研究[J]. 水科学进展, 2001, 12(3): 312-317
- [7] 沈建根. 毛乌素沙地作物耗水规律及蒸散发过程模拟研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2013
- [8] 赵娜娜, 刘钰, 蔡甲冰. 夏玉米作物系数计算与耗水量研究[J]. 水力学报, 2010, 41(8): 953-960
- [9] 刘海军, 康跃虎. 冬小麦拔节抽穗期作物系数的研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(10): 52-56
- [10] 彭世彰, 丁加丽, 茆智, 等. 用 FAO-56 作物系数法推求控制灌溉条件下晚稻作物系数及验证[J]. 农业工程学报, 2007, 7(23): 30-34
- [11] 赵淑银. 刈割对牧草作物系数的影响[J]. 内蒙古农牧学院学报, 1996, 17(4): 58-61
- [12] Doorenbos J, Pruitt W O. Crop water requirements[M]. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of United Nations, 1997: 45
- [13] Doorenbos J, Kassam A H. Yield response to water[M]. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of United Nations, 1979: 25
- [14] 郭克贞, 李和平, 史海滨, 等. 毛乌素沙地饲草料作物耗水量与节水灌溉制度优化研究[J]. 灌溉排水学报, 2005, 24(1): 24-27
- [15] 丁宁, 孙洪仁, 刘志波, 等. 坝上地区紫花苜蓿的需水量、需水强度和作物系数[J]. 草地学报, 2011, 6(19): 933-938
- [16] 马令法, 孙洪仁, 魏臻武, 等. 坝上地区紫花苜蓿的需水量、需水强度和作物系数[J]. 中国草地学报, 2009, 31(2): 116-120
- [17] 李品红, 孙洪仁, 刘爱红, 等. 坝上地区紫花苜蓿的需水量、需水强度和作物系数[J]. 草业科学, 2009, 26(9): 124-128
- [18] 陈玉民, 郭国双, 王广兴. 中国主要作物需水量与灌溉[M]. 北京: 水利电力出版社, 1995: 73-80

Study on Crop Coefficients for Silage Maize and Alfalfa on Maowusu Sandy Land

ZHANG Na¹, QU Zhongyi^{1*}, GUO Kezhen², WU Jiabin², XU Bing², JIANG Mengqi¹

(1 College of Water Resources and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China;

2 Institute of Water Resource for Pastoral Area, Hohhot 010020, China)

Abstract: Crop coefficient is an important parameter to estimate water requirement of crops. It has an important practical significance for agricultural production. The daily evapotranspirations of the reference crops of the silage maize and the alfalfa were determined in Maowusu sandy land using automatic measuring system of ENVIdata-DT for grassland transpiration. Then the daily crop coefficients of the silage maize and the alfalfa were calculated with Penmmman-Monteith formula. Results showed that the mean of crop coefficient of silage maize in the whole growth period was 0.91. The difference of crop coefficient among different growth stages was small. Crop coefficient of alfalfa was increased with the increasing time in the first and second crops, and the crop coefficient sharply decreased after the first crop harvest on June 27, and average crop coefficient of the first crop was 0.87, and 0.85 for the second crop. A model was used to fit the crop coefficients of the silage maize and the alfalfa during growth period day by day with the number of days after sowing and accumulative temperature as independent variables. The results showed the model fitted the data of the crop coefficients well with the determination coefficient of R^2 in the range from 0.59 to 0.72.

Key words: Crop coefficient; Alfalfa; Silage maize; Days of after sowing; Accumulative temperature