

# 多年生人工牧草高效用水灌溉制度的研究

王志强<sup>1</sup>, 朝伦巴根<sup>1\*</sup>, 高瑞忠<sup>1</sup>, 柴建华<sup>2</sup>

(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. 内蒙古水利科学研究院, 呼和浩特 010020)

**摘要:** 以内蒙古浑善达克沙地东南缘——正蓝旗人工草地多年生人工牧草——老芒麦、披碱草、冰草和苜蓿的灌溉试验资料, 应用 FAO-56 双作物系数法模拟计算了不同试验处理的多年生人工牧草实际需水量(蒸散量)。研究了需水量与多年生人工牧草干草产量、水分利用效率和边际产量之间的关系, 并用水分利用效率最高为原则确定了干旱地区人工草地多年生人工牧草不同水文年的灌溉制度。

**关键词:** 牧草需水量; 高效用水; 灌溉制度; 人工牧草

**中图分类号:** S275.3

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-6819(2006)12-0049-07

王志强, 朝伦巴根, 高瑞忠, 等. 多年生人工牧草高效用水灌溉制度的研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(12): 49-55.

Wang Zhiqiang, Chaolunbagen, Gao Ruizhong, et al. High efficient irrigation scheduling of the perennial cultivated forage grasses[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(12): 49-55. (in Chinese with English abstract)

## 0 引言

研究区建设人工草地, 实施“休牧、轮牧、禁牧、舍饲”相结合的放牧养畜方略, 可达到复原受损草原生态、畜牧业稳定发展的双赢目标。提高灌溉水资源的利用效率是达到双赢目标关键。采用经济灌溉模式<sup>[1]</sup>、调亏灌溉技术<sup>[2]</sup>、高效用水的灌溉制度是提高灌溉水资源利用效率有效途径。然而, 掌握作物的需水机理及合理确定作物需水量是这两项技术的核心。本文利用两年(2004、2005)灌溉试验数据按 FAO-56<sup>[3]</sup>推荐的双作物系数法以日为计算时段模拟计算了各种试验处理的多年生人工牧草需水量, 利用经验证后的需水量系列数据绘制了需水量与干草产量、需水量与水分利用效率、需水量与边际产量关系曲线<sup>[4]</sup>, 借助这三条曲线显示出的规律以水分利用效率最高为目标确定了多年生人工牧草高效用水的需水量。把高效用水的需水量按水分生产函数分配到各旬, 用作物根系层旬水量平衡原理确定了不同保证率有效降雨量的多年生人工牧草高效用水的灌溉制度。这种灌溉制度既能提高水分利用效率又能保证适时适量供水。

## 1 试验区概况

### 1.1 试验区概况

试验区位于浑善达克沙地东南缘——内蒙古正蓝旗恒洲域国家自然科学基金项目灌溉试验场(北纬 42°16′、东经 118°22′, 高程 1319 m), 多年平均降雨量为 305.6

mm; 多年平均气温 3.5℃, 最高 35.7℃, 最低-35.1℃; 春季干旱, 降雨多集中在 6~9 月份; 多年平均蒸发量为 1954.2 mm; 绝对湿度为 0.57 kPa, 相对湿度为 60%; 气压为 0.87 hPa; 多年平均无霜期为 101 d。供试多年生人工牧草为老芒麦、披碱草、蒙古冰草和苜蓿, 除苜蓿是 2004 年 5 月 22 日播种外其他三种牧草均于 2004 年 4 月 9 日播种, 均于 2005 年 4 月 12 日返青。试验区土壤质地为中壤土, 1.2 m 土层的平均田间持水率为 26%, 凋萎含水率为 8%, 地下水埋深 7.0 m。

### 1.2 灌溉试验与观测

#### 1.2.1 灌溉试验

灌溉试验时间为 2004 和 2005 两年, 灌溉系统为半固定喷灌系统。灌溉试验共设不同灌溉条件的 6 个处理, 每个处理设 3 个重复, 并有一个对照试验。各处理依次为自然状态(不灌溉)、充分供水(土壤含水率维持在田间持水率的 85% 以上)、轻度缺水(土壤含水率维持在田间持水率的 70%~85%)、中度缺水(土壤含水率维持在田间持水率的 60%~70%)、重度缺水(土壤含水率维持在田间持水率的 50%~60%)、凋萎缺水(土壤含水率维持在田间持水率的 40%~50%)。

#### 1.2.2 灌溉观测

1) 用安设在试验场 2 m 高处 AZW-001 自动气象站, 观测有降水量, 蒸发量, 大气压强, 空气相对湿度, 太阳总辐射, 光合有效辐射, 2 m 处大气温度, 2 m 处风速、风向, 地表温度及土壤热通量参数。2) 用 CI-110 型叶面指数仪每 5 d 测一次叶面指数。3) 用光合作用仪(Li6400)每 5~6 d 测一次冠层蒸腾速率的日变化(从 6:00 到 19:00), 每个处理选一个重复, 每个重复随机选一株牧草, 按观测周期分别测量这株牧草所有分蘖叶子的蒸腾速率, 然后按叶面指数对各次观测的蒸腾量加权求和, 得该处理的冠层蒸腾速率。4) 手工每 3 d 观测人工牧草的冠层高度及根系层厚度。5) 用 TDR 每 3 d 测量一次根系层的土壤含水率, 降雨、灌溉后加测, 观测深度为 1.6 m。6) 人工牧草行间安设微型蒸发器测量棵

收稿日期: 2005-12-19 修订日期: 2006-09-06

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50139040)

作者简介: 王志强(1977-), 男, 内蒙古包头市人, 博士生, 从事水资源承载能力研究。呼和浩特 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 010018

\*通讯作者: 朝伦巴根(1940-), 男, 蒙古族, 教授, 博士生导师, 从事水文水资源优化配置研究工作。呼和浩特 内蒙古农业大学 1301 信箱, 010018。Email: Chaolunbagen@cast.org.cn

间土壤蒸发量<sup>[11]</sup>。微型蒸发器用PVC管做成,内径10 cm,壁厚5 mm,高30 cm,3~5 d换土,当有湿润过程时,过程后立刻换土。每次取土时,将其垂直压入土壤内,取出后用刀抹平,用纱布封底,称重,每天早上用精度为0.1 g的电子天平称重,两天内重量的差值为其蒸发量。有两个重复,取这两个重复平均值为当天土壤蒸发量实测值。为保证操作时不破坏附近土体结构,用内径为12 cm的PVC管做成外套,固定于土壤中,使其表面与附近土壤持平。7)地下水水位用自动水位观测仪(SEBA)观测。

## 2 人工牧草需水量计算方法与计算结果

### 2.1 人工牧草生长阶段的划分

根据文献[3]将人工牧草生育期分为生长初期、生长发育期、生长中期和生长后期4个阶段。

### 2.2 人工牧草需水量计算的双作物系数法

灌溉试验的时间系列长,试验观测项目设计较全并获取观测数据时用双作物系数法计算作物蒸腾蒸发量的效果比单作物系数法好(Allen<sup>[12]</sup>、樊引琴<sup>[13]</sup>和刘钰<sup>[14]</sup>)。本文采用的FAO-56推荐的双作物系数法<sup>[3]</sup>并参考文献[5,6,7,12,13]采用以下式计算人工牧草需水量

$$ET_{ci} = (K_{si}K_{cbi} + K_{ci})ET_{0i} = E_{ci} + E_{si} \quad (1)$$

式中  $K_{cbi}, K_{ci}$ ——分别为第*i*天的基本作物系数和土壤蒸发系数;  $E_{ci}, E_{si}$ ——分别为第*i*天人工牧草冠层蒸腾、土壤蒸发速率, mm/d;  $ET_{ci}$ ——生长阶段第*i*天的需水量, mm/d;  $K_{si}$ ——反映第*i*天水分胁迫影响程度的水分胁迫系数,一般  $0 \leq K_{si} \leq 1$ , 无水分胁迫时  $K_{si} = 1$ , 有水分胁迫时  $K_{si}$  在(0, 1)之间变化。

$$K_{si} = (TAW - D_{ri}) / (1 - \rho) \times TAW \quad (2)$$

式中  $TAW$ ——根系层中可利用水总量, mm;  $D_{ri}$ ——第*i*天从根系层耗散的水量, mm;  $\rho$ ——无水分胁迫条件下从根系层耗散的水量占  $TAW$  的百分数。

$ET_{0i}$  为第*i*天参考作物蒸散发速率<sup>[3,9]</sup>, mm/d, 计算式为

$$ET_{0i} = \frac{0.408\Delta_i(R_n^i - G_i) + \gamma \frac{900}{T_i + 273} u_2^i (e_s^i - e_a^i)}{\Delta_i + \gamma(1 + 0.34u_2^i)} \quad (3)$$

式中  $R_n^i$ ——第*i*天太阳净辐射, MJ/(m<sup>2</sup>·d);  $T_i$ ——第*i*天平均气温, °C;  $u_2^i$ ——第*i*天2 m高处的日平均风速, m/s;  $e_s^i$ ——第*i*天饱和水汽压, kPa;  $e_a^i$ ——第*i*天实际水汽压, kPa;  $\gamma$ ——湿度计常数, kPa/°C;  $G_i$ ——第*i*天土壤热通量密度, MJ/(m<sup>2</sup>·d)。所需气象参数均由AZW-001自动气象站观测得到。(2)(3)式中各有关参数项的计算方法见参考文献[3]。

#### 2.2.1 生育期各生长阶段蒸发系数、基本作物系数的确定

##### 1) 初始生长阶段蒸发系数的确定

初始生长阶段,土壤蒸发在蒸散中占绝对份额,只

在出苗后有蒸腾,因此初始生长阶段主要确定土壤蒸发系数。土壤蒸发有两个阶段。第一阶段为“能量受限”阶段。在这一阶段土壤水分维持在田间持水率或接近田间持水率,蒸发耗损水分累计深度( $D_e$ )小于土壤易蒸发水量( $REW$ ),土壤表面有效能量控制土壤以潜在蒸发速率( $E_{so}$ )蒸发。该阶段作物系数为

$$K_{cbi} = E_{so}/ET_0^* = 1.15^{[3]} \quad (4)$$

式中  $ET_0^*$ ——第一阶段参考作物日腾发量平均值, mm/d。

完成第一阶段蒸发所需要的时间长度为  $t_1$

$$t_1 = \frac{REW}{1.15ET_0^*} \quad (5)$$

第二阶段为蒸发递减阶段。第二阶段的  $K_{cini}$  用下式计算

$K_{cini} =$

$$\frac{TEW - (TEW - REW) \exp\left[-\frac{(t_w - t_1)E_{so}\left(1 + \frac{TEW}{TEW - REW}\right)}{TEW}\right]}{t_w ET_0} \quad (6)$$

式中  $t_w$ ——初始生长阶段中发生的湿润过程(灌溉与降水)的平均时间间隔, d;  $TEW$ ——可蒸发的总水量, mm。对初始生长阶段第*i*天的土壤蒸发系数的确定由两种情况:

① 出苗前,当  $t_1 < t_w, K_{ci}^i = K_{cini} = 1.15$ ; 当  $t_1 > t_w, K_{ci} = K_{cini}$

② 出苗后,当  $t_1 < t_w, K_{ci}^i = 1.15 - K_{cbini}$ ; 当  $t_1 > t_w, K_{ci} = K_{cini} - K_{cbini}$

$K_{cbini}$  是初始生长阶段出苗后的基本作物系数,其值在零和生长初期末基本作物系数间线性内插。

(6)式中各参数计算见参考文献[3]。

#### 2) 生长发育、中期、后期阶段基本作物系数、蒸发系数的确定

文献[3]指出生长中期阶段基本作物系数基本上是常数,因此生长发育、后期阶段内基本作物系数计算值( $K_{cbical}$ )分别在前一阶段末的基本作物系数值  $K_{cbprev}$  和下一阶段初基本作物系数值  $K_{cbnext}$  之间(在生长后期它就是后期阶段末的基本作物系数)线性插值计算,即

$$K_{cbical} = K_{cbprev} + \left[ \frac{i - \sum(L_{prev})}{L_{stage}} \right] (K_{cbnext} - K_{cbprev}) \quad (7)$$

式中  $K_{cbical}$ ——基本作物系数第*i*天的计算值;  $i$ ——生长阶段内的日序数(由1到该生长阶段长度);  $L_{stage}$ ——计算  $K_{cbical}$  的生长阶段的长度, d;  $\sum(L_{prev})$ ——所有先前生长阶段长度总和, d;  $K_{cbprev}$ ——对生长发育阶段就是初始阶段末的基本作物系数值、对后期阶段就是中期阶段的作物系数常数值;  $K_{cbnext}$ ——对生长发育阶段就是中期阶段的常数值,对后期阶段就是该阶段末的作物系数值。生长初期阶段末、中期阶段和后期阶段末的基本作物系数值在文献[3]建议值的基础上用参考文

献[8]中方法取得。由于(7)式中的计算值  $K_{cbical}$  是在 2 m 高度处风速  $u_2$  变化范围  $1 \text{ m/s} \leq u_2 \leq 6 \text{ m/s}$ 、最低相对湿度  $RH_{\min}$  变化范围  $20\% \leq RH_{\min} \leq 80\%$  和作物平均高度条件下的值,因此根据实地微气象要素和作物在各阶段实际高度对  $K_{cbical}$  进行修正后得基本作物系数 ( $K_{cbi}$ ),修正公式为

$$K_{cbi} = K_{cbical} + \{0.04(u_2^i - 2) - 0.004(RH_{\min}^i - 45)\} \{h_i/3\}^{0.3} \quad (8)$$

式中  $u_2^i, RH_{\min}^i, h_i$ ——分别为第  $i$  天风速、湿度、作物高度实际观测值。

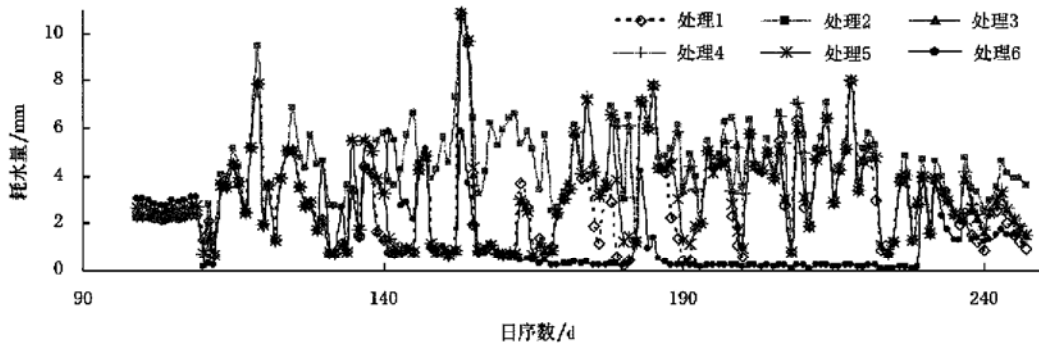
3) 生长发育、中期、后期蒸发系数的确定

$$K_{ei} = \min\{K_{ri}(K_{cimax} - K_{cbi}), f_{ewi}K_{cimax}\} \quad (9)$$

式中  $K_{cimax}$ ——降雨和灌溉后的第  $i$  天作物系数最大值。用下式计算

$$K_{cimax} = \max(\{1.2 + [0.04(u_2^i - 2) - 0.004(RH_{\min}^i - 45)](h_i/3)^{0.3}\}, \{K_{cbi} + 0.05\}) \quad (10)$$

式中  $K_{ri}$ ——取决于蒸发层累计蒸发深度的第  $i$  天蒸发衰减系数;  $f_{ewi}$ ——发生棵间蒸发的土壤占全部土壤面积的比例,无量纲。它们的计算参见参考文献[3]。



注: 图中处理 2 为充分供水, 其余处理为非充分供水, 下图与之相同。

图 1 2004 年老芒麦全生育期各灌溉试验处理的日需水量变化规律

Fig. 1 Variation of daily water requirement-*evapotranspiration* ( $ET_c$ ) of *Clinelymus Sibiricus*(*L.*) in growing seasons for experimental treatments in 2004

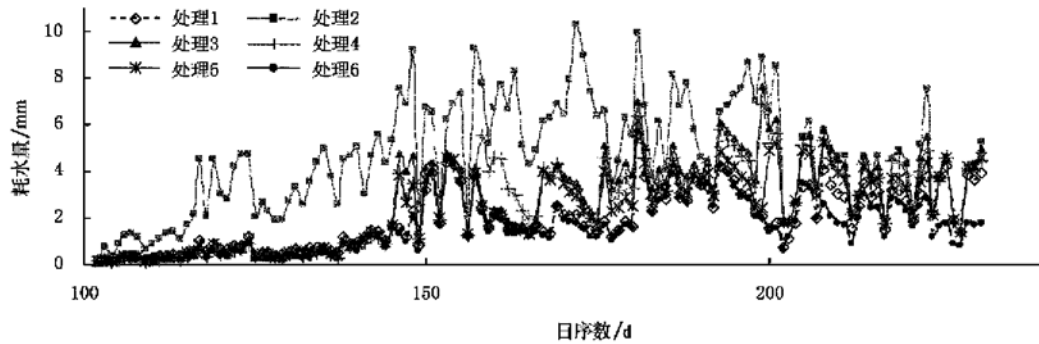


图 2 2005 年老芒麦全生育期各灌溉试验处理的日需水量变化规律

Fig. 2 Variation of daily water requirement-*evapotranspiration* ( $ET_c$ ) of *Clinelymus Sibiricus*(*L.*) in growing season for experimental treatments in 2005

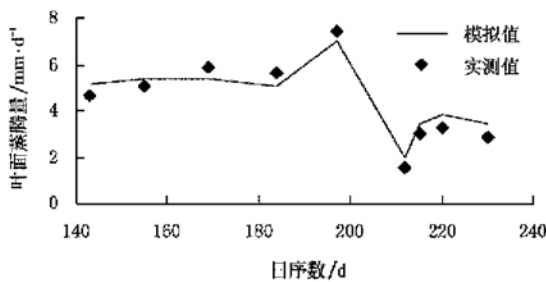


图 3 叶面蒸腾量模拟计算值与实测值之间的对比  
Fig. 3 Comparison between the simulated and measured transpirations

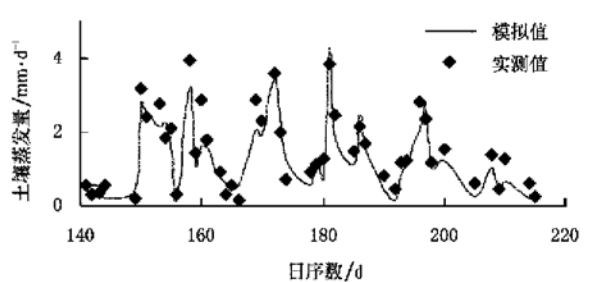


图 4 土壤蒸发模拟计算值与实测值之间的对比  
Fig. 4 Comparison between the simulated and measured evaporations

利用两年的灌溉试验资料按(1)~(10)式模拟计算了4种人工牧草的蒸散量,图1、图2给出了2004、2005年生育期人工牧草各试验处理的蒸散( $ET_c$ )速率日变化过程。图3给出2005年无水分胁迫(充分供水)试验处理的蒸腾量模拟计算值与实测值之间的对比;图4给出2005年无水分胁迫(充分供水)试验处理的土壤蒸发模拟计算值与实测值之间的对比。图3、4表明模拟计算结果合理。

### 3 生育期需水量( $ET$ )与人工牧草干草产量、水分利用效率和边际产量的关系

#### 3.1 人工牧草生育期需水量与干草产量的关系

根据2004~2005年的实测资料,得老芒麦干草产量与需水量的关系曲线(图5),从中可以看出 $Y$ 与 $ET$ 之间具有良好的二次抛物线关系曲线,其回归方程为

$$Y = -0.00046ET^2 + 4.5211ET - 5347.37 \quad R^2 = 0.882 \quad (11)$$

由图5中的 $Y \sim ET$ 关系曲线可以看出,随需水量增加,产量快速增加,当需水量增加到某一值后,产量增加缓慢。当产量达到最大值后,再增加需水量,产量反而下降。用类似的方法得到披碱草、冰草和苜蓿干草产量与需水量之间的关系曲线。

披碱草

$$Y = -0.00025ET^2 + 3.0303ET - 2300.32 \quad R^2 = 0.802 \quad (12)$$

冰草

$$Y = -0.0004ET^2 + 3.5423ET - 2776.05 \quad R^2 = 0.880 \quad (13)$$

苜蓿

$$Y = -0.00056ET^2 + 6.0053ET - 8737.25 \quad R^2 = 0.857 \quad (14)$$

牧草水分利用效率( $WUE$ )定义为:每消耗单位水量所能产出的干草量,即 $WUE = Y/ET$ 。本文建立了 $WUE$ 与需水量的关系曲线,见图5,图中表明 $WUE$ 与需水量之间有二次抛物线关系。

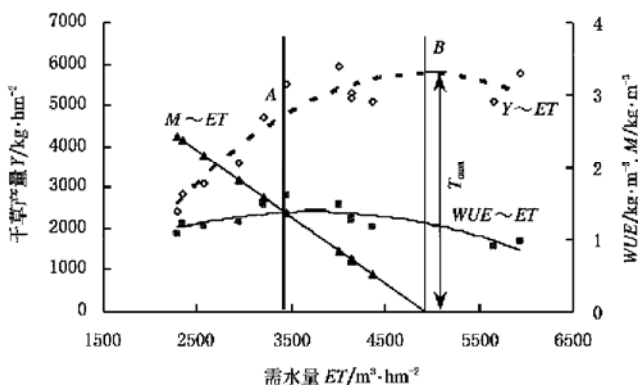


图5 老芒麦水分生产效率、边际产量与需水量之间的关系曲线  
Fig.5 Relationship curves between water requirement and water use efficiency and marginal product of *Clinelymus Sibiricus* (L.)

#### 3.2 人工牧草生育期需水量与边际产量的关系

边际产量( $M$ )是牧草每多消耗单方水所能增加的产量,即 $M = dY/dET$ 。图5中绘出 $M \sim ET$ 关系线。3类关系曲线把 $Y \sim ET$ 曲线分为三段,以 $A, B$ 两点相分割。第一段是从原点到 $A$ 点,需水量与边际产量的关系线高于水分利用效率曲线,这表明老芒麦在此阶段生长过程中,以小的需水量的增幅赢得大的产量增幅,因而是高效利用水分的阶段;第二段是 $A$ 到 $B$ 之间,该段需水量与边际产量的关系线低于水分利用效率曲线,以较大的需水量的增幅换回较小的产量增幅,因而是“报酬递减”阶段。 $B$ 点以后的第三段,需水量的增幅招致减产。显然,边际产量对确定高效用水灌溉定额具有重要意义。

### 4 人工牧草以旬为时段的高效用水灌溉制度

研究区借助风沙源生态建设基金实现了半自动化的喷灌系统,这为制定适时适量灌水的灌溉制度提供了保证条件,所以本文研究的高效用水灌溉制度以旬为时段。这是因为灌水时间对产量的影响与灌水量对产量的影响几乎有同等的重要性。特别某些关键阶段由于灌水时间不合理而造成的产量损失很难由后期水分补偿来弥补。以旬为时段的高效用水灌溉制度不仅水分利用效率高,而且容易捕捉合理的灌水时间。

#### 4.1 水分利用效率最大的全生育期需水量确定

人工牧草水分利用效率最大时的需水量是指水分利用效率( $WUE$ )最大时的作物需水量。 $WUE$ 最大出现在 $WUE \sim ET$ 关系曲线斜率为零之处,即: $d(WUE)/dET = a - \frac{c}{ET^2} = 0$ 之处,因此得,

$$ET = \sqrt{c/a} \quad (15)$$

把满足(15)式的 $ET$ 称作水分利用效率最大时的需水量,并记作 $ET_g$ 。将(11)~(14)式的系数代入(15)式得各种人工牧草水分利用效率最大的全生育期需水量,记作 $ET_g^j$ 并记入表1。

表1 人工牧草水分利用效率最大时的需水量

Table 1 Water requirements of cultivated forage grass with maximum water use efficiency

牧草品种	老芒麦	披碱草	冰草	苜蓿
$ET_g^j/m^3 \cdot hm^{-2}$	3409.57	3033.36	2634.42	3949.97

#### 4.2 各种人工牧草水分利用效率最大的旬灌水定额

水分利用效率最大的旬灌水定额( $M_i^j$ )计算式为

$$M_i^j = ET_{ig}^j - G_i + D_i - P_i - \Delta W_i \quad (16)$$

式中  $G_i$ ——第 $i$ 旬内地下水的补给量,  $m^3 \cdot hm^{-2}$ , 试验区地下水埋深7m,  $G_i = 0$ ;  $D_i$ ——第 $i$ 旬内深层渗漏量,  $m^3 \cdot hm^{-2}$ , 实施高效用水灌溉定额的情况下, 除大雨外无深层渗漏量, 取 $D_i = 0$ ;  $P_i$ ——第 $i$ 旬内有效降雨量,  $m^3 \cdot hm^{-2}$ ;  $\Delta W_i$ ——第 $i$ 旬内根区土壤储水量的变化量,  $m^3 \cdot hm^{-2}$ 。研究区根系层土壤含水率只有两年实测数据, 不能构成统计计算它的系列数据, 为确定

高效用水的旬灌水定额更安全, 取  $\Delta W_i = 0$ ;  $ET_{ig}^j$ —— $j$  种人工牧草第  $i$  旬的水分利用效率最大时的需水量,  $m^3 \cdot hm^{-2}$ 。

4.2.1 生育期内不同保证率的各旬有效降雨

用研究区 35 年生育期内各旬有效降雨量系列数据, 用适线法推算出人工牧草生育期内各旬不同保证率的有效降雨量列入表 2。

4.2.2 水分利用效率最大时的各旬需水量 ( $ET_{ig}^j$ ) 的确定

把  $ET_{ig}^j$  用各种牧草各旬缺水敏感指数按 Jensen 水分生产函数(式 (17)) 分配到各旬得到旬  $ET_{ig}^j$ , 见表 4。

$$\frac{Y_g^j}{Y_m^j} = \prod_{i=1}^n \left( \frac{ET_{ig}^j}{ET_m^j} \right)^{\lambda_i} \quad (17)$$

式中  $Y_g^j, Y_m^j$ —— $j$  种人工牧草水分利用效率最大时的供水和充足供水的干草量,  $kg \cdot hm^{-2}$ ;  $ET_{ig}^j, ET_m^j$ ——与  $Y_g^j, Y_m^j$  相对应的水分利用效率最大的  $i$  旬需水量和生育期充足供水的需水量,  $m^3 \cdot hm^{-2}$ ;  $i = 1, 2, \dots, n$ ;  $n$ ——人工牧草生育期内旬数;  $\lambda_i$ ——第  $i$  旬的缺水敏感指数。它用 2004~ 2005 年在试验区开展的 6 个处理 3 个重复得到的试验观测数据, 用 EXCEL 软件的规划求解算法求解 Jensen 模型而得到, 见表 3。

表 2 全生育期内各旬不同保证率的有效降雨量

Table 2 Effective rainfall of each ten-day with different probability during growing seasons mm

保证率 /%	4 月			5 月			6 月			7 月			8 月			9 月
	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬
25	5.1	4.7	4.5	5.5	10.7	15.4	8.5	26.6	39.2	45.9	39.5	67.2	41.3	42.8	21.1	26.7
50	0.6	1.0	0.4	0.2	3.9	9.4	0.9	16.8	22.4	29.2	27.3	46.5	21.7	23.2	15.1	15.9
75	0	0	0.1	0	1.5	4.4	0	9.7	8.9	16.2	17.0	31.7	9.5	10.9	12.3	7.6

表 3 人工牧草生育期各旬对水分亏缺的敏感指数系数

Table 3 Water deficiency sensitivity index of the cultivated forage grasses in each ten-day

时间	4 月		5 月			6 月			7 月			8 月		
	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬
年内旬序数	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
老芒麦	0.02	0.01	0.03	0.01	0.22	0.17	0.19	0.11	0.04	0.22	0.18	0.19	0.09	—
披碱草	0.04	0.05	0.02	0.03	0.15	0.11	0.12	0.13	0.01	0.14	0.36	0.12	0.03	—
冰 草	0.03	0.02	0.04	0.02	0.41	0.18	0.10	0.02	0.05	0.40	0.20	0.12	—	—
苜 蓿	0.07	0.03	0.02	0.08	0.40	0.26	0.17	0.01	0.11	0.13	0.33	0.21	0.06	0.02

表 4 按 Jensen 模型将全生育期高效用水需水量分配到各旬后的  $ET_{ig}^j$

Table 4  $ET_{ig}^j$  for each period of ten-day in growing seasons determined by Jensen model  $m^3 \cdot hm^{-2}$

牧草 品种	4 月		5 月			6 月			7 月			8 月			合计
	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	
老芒麦	82.1	64.2	138.0	125.9	495.6	401.6	413.4	407.6	272.7	477.6	216.4	249.9	64.5	—	3409.6
披碱草	109.9	150.4	179.4	96.6	358.5	247.3	272.9	308.2	188.1	317.3	455.4	262.9	86.6	—	3033.4
冰 草	158.5	103.0	139.7	103.9	501.7	315.7	165.5	107.5	154.2	420.5	272.3	191.9	—	—	2634.4
苜 蓿	187.0	145.4	109.6	206.3	545.8	448.8	301.9	151.3	261.0	405.7	491.8	378.9	209.2	107.1	3950.0

按表 2、表 4 数据用(16)式计算的各旬高效用水灌水定额计算结果列入表 5。

研究区为提高喷灌系统灌水效率和节能, 最小的喷洒量控制在  $10 mm (100 m^3/hm^2)$ , 因此当表 5 中的旬灌水定额小于  $100 m^3/hm^2$  时, 将旬灌水定额小于  $100$

$m^3/hm^2$  的灌水量与其上旬或下旬灌水定额合并, 根据根系层土壤含水率的实际情况调控灌水时间。旬灌水定额大于  $100 m^3/hm^2$  的旬灌水时间一般定在月中。按此原则由表 5 得到的灌溉制度称作应用高效用水灌溉制度, 列入表 6。

表5 不同水文年多年生人工牧草计算的高效用水旬灌水定额  
Table 6 High efficient irrigation quotas calculated for a period of ten days with different probabilities of rainfall for the cultivated forage grasses

降雨保证率/%	牧草品种	灌溉定额/ $m^3 \cdot hm^{-2}$	人工牧草旬灌水定额/ $m^3 \cdot hm^{-2}$														
			4月		5月			6月			7月			8月			
			中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	
25	老芒麦	1061	35	19	83	19	342	317	147	16	—	83	—	—	—	—	
	披碱草	666	63	105	124	—	205	162	7	—	—	—	—	—	—	—	
	冰草	858	112	58	85	—	348	231	—	—	—	26	—	—	—	—	
	苜蓿	1197	140	100	55	99	392	364	36	—	—	11	—	—	—	—	
50	老芒麦	1816	72	60	136	87	402	393	245	184	—	205	—	33	—	—	
	披碱草	1273	100	146	177	58	265	238	105	84	—	54	—	46	—	—	
	冰草	1312	149	99	138	65	408	307	—	—	148	—	—	—	—	—	
	苜蓿	1941	177	141	108	167	452	440	134	—	—	133	27	162	—	—	
75	老芒麦	2456	82	63	138	111	452	402	316	319	111	308	—	155	—	—	
	披碱草	1957	110	149	179	82	315	247	176	219	26	147	138	168	—	—	
	冰草	1697	159	102	140	89	458	316	69	19	—	251	—	97	—	—	
	苜蓿	2744	187	144	110	191	502	449	205	62	99	236	175	284	100	—	

表6 不同水文年多年生人工牧草应用高效用水灌溉制度  
Table 6 High efficient irrigation schedule applied with different probabilities of effective rainfall for the cultivated forage grasses

降雨保证率/%	牧草品种	灌水次数	灌溉定额/ $m^3 \cdot hm^{-2}$	人工牧草灌水时间及灌水定额/ $m^3 \cdot hm^{-2}$														
				4月		5月			6月			7月			8月			
				04-20	04-30	05-10	05-15	05-25	06-05	06-15	06-25	07-05	07-15	07-25	08-05	08-15	08-25	
25	老芒麦	5	1061	—	137	—	—	361	317	—	163	—	83	—	—	—	—	
	披碱草	3	666	—	292	—	—	205	—	169	—	—	—	—	—	—	—	
	冰草	3	858	—	254	—	—	348	—	256	—	—	—	—	—	—	—	
	苜蓿	5	1197	140	—	254	—	392	364	—	47	—	—	—	—	—	—	
50	老芒麦	7	1816	132	—	223	—	402	393	245	184	—	237	—	—	—	—	
	披碱草	6	1273	246	—	235	—	265	238	—	189	—	100	—	—	—	—	
	冰草	5	1312	248	—	203	—	408	307	—	—	—	148	—	—	—	—	
	苜蓿	8	1941	177	141	—	275	452	440	134	—	—	160	—	162	—	—	
75	老芒麦	8	2456	145	—	249	—	452	402	316	429	—	308	—	155	—	—	
	披碱草	8	1957	259	—	261	—	315	247	176	245	—	286	—	168	—	—	
	冰草	5	1697	261	—	229	—	458	403	—	—	—	347	—	—	—	—	
	苜蓿	10	2744	187	—	254	191	502	449	205	161	—	236	175	384	—	—	

## 5 结论

本研究用两年的人工牧草灌溉试验资料,本着水分利用效率最大为原则,确定了既按旬适时适量灌水又能节能的高效用水灌溉制度。这种以水分利用效率(WUE)最大为原则确定的灌溉制度生产的干草量比用图5“报酬递减”阶段需水量确定的灌溉制度生产的干草量低一些,但十分有利于水资源短缺地区节约水资源。该方法的适用条件为:1)有较长时间的人工牧草灌溉试验数据。2)有计算人工牧草蒸散量的微气象要素的日观测资料。3)田间灌溉系统达到半自动或全自动。

### [参考文献]

[1] 钱蕴璧,李英能,杨刚,等.节水农业新技术研究[M].郑州:黄河水利出版社,2002.  
[2] 康绍忠,史文娟,胡笑涛,等.调亏灌溉对玉米生理指标及水分生产效率的影响[J].农业工程学报,1998,14(2):82

- 87.

[3] Richard G Allen, Luis S Pereira, Dirk Raes Martin Smith. Crop evapotranspiration—guidelines for computing crop water requirements [M]. FAO Irrigation and Drainage Paper 56, Rome, 1998.  
[4] 孙景生,康绍忠,张寄阳,等.霍泉灌区冬小麦夏玉米高产节水灌溉制度[J].农业工程学报,2000,16(4):50-53.  
[5] 于婵,朝伦巴根,高瑞忠,等.无水胁迫下行作物蒸散发与双涌源能量分配和交换关系[J].应用生态学报,2006,(17):839-84.  
[6] 于婵,朝伦巴根,高瑞忠,等.考虑土壤蒸发两阶段理论的作物系数法估算作物初始生长阶段土壤蒸发效果研究[J].灌溉排水学报,2005,24(6B):106-108.  
[7] 商艳,朝伦巴根,达布希,等.利用估算的太阳辐射计算参考作物蒸散速率( $ET_0$ ) 在浑善达克沙地的精度分析[J].中国农业气象,2006,27(1):6-10.  
[8] 王志强,朝伦巴根,朱仲元.京蒙沙源区人工牧草基本作物系数的修定[J].西南农业大学学报,2006,28(1):145-

- 148.
- [ 9] 高瑞忠, 朝伦巴根, 于 婵, 等. 基于随机样本的神经网络模型估算参考作物腾发量[J]. 农业工程学报, 2006, 22(2): 42– 45.
- [ 10] 朝伦巴根, 高瑞忠, 贾德彬, 等. 人工草地牧草优化种植结构和地下水资源可持续利用[J]. 农业工程学报, 2006, 22(2): 68– 72.
- [ 11] 孙宏勇, 刘昌明, 张喜英, 等. 微型蒸发器测定土面蒸发的试验研究[J]. 水利学报, 2004, (8): 114– 118.
- [ 12] Allen R G. Using the FAO-56 dual crop coefficient method over an irrigated region as part of an evapotranspiration intercomparison study[J]. *Hydrology*, 2000, 229: 27– 41.
- [ 13] 樊引琴, 蔡焕杰. 单作物系数法和双作物系数法计算作物需水量的比较研究[J]. 水利学报, 2002, (5): 50– 54.
- [ 14] 刘 钰, L. S. Pereira. 对 FAO 推荐的作物系数计算方法的验证[J]. 农业工程学报, 2000, 16(5): 26– 30.
- [ 15] 李玉霖, 崔建垣, 张铜会. 参考作物蒸散量计算方法的比较研究[J]. 中国沙漠, 2002, 22(4): 372– 376.
- [ 16] 于 婵, 朝伦巴根, 高瑞忠, 等. 人工草地青贮玉米高效用水灌溉制度研究[J]. 玉米科学, 2006, 14(5): 118– 112, 133.

## High efficient irrigation scheduling of the perennial cultivated forage grasses

Wang Zhiqiang<sup>1</sup>, Chaolunbagen<sup>1\*</sup>, Gao Ruizhong<sup>1</sup>, Chai Jianhua<sup>2</sup>

(1. College of Hydraulic and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010018, China;

2. Institute of Inner Mongolia Water Resources, Huhhot 010020, China)

**Abstract:** This study is based on the two years irrigation experimental data of grasses, *Clinelymus Sibiricus*(L.), *Clinelymus Dahuricus*, *Agropyron Mongolium* Keng and *Medicago Sativa* L., perennial cultivated forage grass to simulate each grass evapotranspiration(ET) by using dual crop coefficient approach presented in FAO-56. The relationships between grass water requirement and grass hay yield, between grass water requirement and water use efficiency and between grass water requirement and marginal product were analyzed The high efficient irrigation schedule with different probabilities of effective rainfall was determined under the objective of maximizing water use efficiency.

**Key words:** grass water requirement; high efficient water use; irrigation schedule; cultivated forage grass