

应用 Penman-Monteith 方程推算北京地区苜蓿的灌溉定额

许翠平, 刘洪禄, 赵立新

(北京市水利科学研究所, 北京 100044)

摘 要: 该文对应用 Penman-Monteith 方程和分段单值平均作物系数法推算苜蓿灌溉定额的方法进行了详细的分析, 并结合北京市永乐店农业节水中心气象资料和苜蓿试验的有关资料, 推算了该地区 2003 年苜蓿的净灌溉定额, 并得到了试验的初步验证, 在此基础上推算了在永乐店土壤条件下不同水平年及不同节水灌溉方式下的毛灌溉定额, 为苜蓿灌溉管理或灌溉计划提供参考依据。该文推算苜蓿灌溉定额的方法也可用于其它作物灌溉用水定额的估算。

关键词: Penman-Monteith 方程; 作物系数; 灌溉定额; 用水定额

中图分类号: 274.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2005)08-0030-05

许翠平, 刘洪禄, 赵立新 应用 Penman-Monteith 方程推算北京地区苜蓿的灌溉定额[J]. 农业工程学报, 2005, 21(8): 30-34

Xu Cuiping, Liu Honglu, Zhao Lixin. Calculating alfalfa irrigation quota by FAO Penman-Monteith equation [J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(8): 30-34 (in Chinese with English abstract)

0 引言

苜蓿为多年生豆科草本植物, 因其产量高、品质好、营养丰富、适口性好, 被称为“牧草之王”。它不仅是良好的牧草, 而且还是保土肥田、防风固沙的理想植物。随着种植结构的调整和退耕还林战略工程的实施, 北京市的苜蓿种植面积迅速扩大, 到 2002 年, 北京市的苜蓿种植面积发展到 1.53 万 hm^2 , 促进了京郊养殖业的发展, 增加了农民的收入。

苜蓿是一种需水量较大的作物, 合理确定苜蓿灌溉用水定额不仅是用水管理的基础, 更是确定苜蓿发展规模的重要依据, 尤其对于水资源严重不足的北京市来说尤其重要。而目前北京市有关苜蓿灌溉用水定额的研究较少。

作物需水量是确定作物灌溉用水定额的基础, 计算作物需水量最经典的方法是作物系数法, 即作物需水量 ET_c 等于参照作物腾发量 ET_0 (也叫潜在腾发量) 与作物系数 k_c 的乘积。作物需水量减去生育期的有效降雨量, 即得作物净灌溉定额。本文利用 Penman-Monteith 方程和 FAO 推荐的确定作物系数 k_c 的方法, 以北京市通州区永乐店农业节水中心 2003 年的气象资料和苜蓿试验资料为基础, 分析计算了 2003 年苜蓿的作物需水量, 从而进一步确定了苜蓿的灌溉定额, 为苜蓿灌溉管理提供参考依据。

1 参照作物腾发量 ET_0 的计算

1.1 参照作物腾发量 ET_0

FAO 最近提出的参照作物腾发量的新定义^[1]为:

收稿日期: 2004-10-26 修订日期: 2005-02-23

基金项目: 北京市科委“十五”重大项目(H010710240113)

作者简介: 许翠平(1966-), 女, 汉族, 福建人, 高级工程师, 硕士, 主要从事农业节水研究及规划工作。北京市海淀区车公庄西路 21 号北京市水利科学研究所, 100044

参照作物腾发量 ET_0 为一种假想的参照作物冠层的腾发速率, 假想作物高度为 0.12 m, 固定的叶面阻力为 70 s/m , 反射率为 0.23, 非常类似于表面开阔, 高度一致, 生长旺盛, 完全遮盖地面而不缺水的绿色草地的蒸腾和蒸发量。

1.2 Penman-Monteith 方程

Penman-Monteith 方程^[1]是计算 ET_0 的首选方法, 它以能量平衡和水汽扩散理论为基础, 既考虑了作物的生理特征, 又考虑了空气动力学参数的变化, 具有较充分的理论依据和计算精度。Penman-Monteith 方程如式(1)

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \frac{\gamma}{T + 273}U_2(e_a - e_d)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (1)$$

式中 ET_0 ——参照作物腾发量, mm/d ; Δ ——饱和水汽压 - 温度曲线斜率, $\text{kPa/}^\circ\text{C}$; R_n ——冠层表面净辐射, $\text{MJ/m}^2 \cdot \text{d}$; G ——土壤热通量, $\text{MJ/m}^2 \cdot \text{d}$; γ ——湿度计常数, $\text{kPa/}^\circ\text{C}$; T ——平均气温, $^\circ\text{C}$; U_2 ——2 m 处风速, m/s ; e_a ——饱和水汽压, kPa ; e_d ——实际水汽压, kPa 。

方程式(1)等式右边可分为两个部分, 前一部分为辐射项(ET_{rad}), 后一部分为空气动力学项(ET_{aero})。 ET_0 的计算主要依靠当地的气象资料和地理位置, 包括平均气温、最高气温、最低气温、平均相对湿度 RH 、2 m 处风速 U_2 、日照时数 n 及计算地点的纬度、海拔高程。本文以北京市通州区永乐店农业节水中心 2003 年 3 月至 2004 年 2 月(苜蓿 1 个生长年度)气象资料计算了每日参考作物腾发量 ET_0 。

2 作物系数 k_c 的确定

作物需水量包括土面蒸发和作物蒸腾两部分, 因此作物系数 k_c 由两部分组成,

$$k_c = k_s k_{cb} + k_e \quad (2)$$

式中 k_{cb} ——基本作物系数,是表面干燥而根区土壤平均含水率满足作物蒸腾时 ET_c/ET_0 的比值; k_s ——水分胁迫系数,反映根区土壤含水率不足时对作物蒸腾的影响; k_e ——土面蒸发系数,反映灌溉或降雨后因表土湿润致使土面蒸发强度短期内增加对 ET_c 产生的影响。在无水胁迫条件下, $k_c = k_{cb} + k_e$ 。

FAO 推荐标准状态下(无水分胁迫)作物系数的计算方法有两种:一是分段单值平均法,这是一种比较简单实用的计算方法,可用于灌溉系统的规划设计和灌溉管理;二是双值作物系数法,该方法需进行逐日水量平衡计算,计算复杂,需要的数据量大,一般只用于灌溉制度的研究和田间水量平衡分析。苜蓿灌溉用水定额的确定一般用于灌溉管理,因此用前一种方法,即分段单值平均法。

2.1 分段单值平均作物系数^[1]

该方法是把作物系数的变化过程概化为几个阶段,根据各阶段叶面蒸腾和土面蒸发的变化规律,用一个时段的平均值表示该阶段的作物系数。

$$k_c = k_{cb} + k_e \quad (3)$$

式中符号意义同上。

对大多数一年生作物,作物系数的变化过程可概化为 4 个阶段的 3 个值,见图 1。

4 个阶段划分为:1) 初始生长期,从播种到作物覆盖率接近 10%,此阶段内作物系数为 k_{cini} ; 2) 快速发育期,从覆盖率 10% 到充分覆盖(大田作物覆盖率达到 70%~80%),此阶段内作物系数从 k_{cini} 提高到 k_{omid} ; 3) 生育中期,从充分覆盖到成熟期开始,叶片开始变黄,此阶段作物系数为 k_{omid} ; 4) 成熟期,从叶片开始变黄到生理成熟或收获,此阶段内作物系数从 k_{omid} 下降到 k_{cend} 。

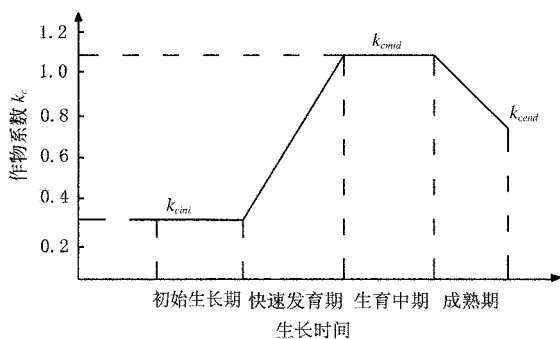


图 1 概化为时间平均值的作物系数变化过程

Fig 1 Changes of time-average crop coefficient

2.2 苜蓿作物系数概化曲线

苜蓿是多年生牧草,一般寿命为 5~7a,长者可达 25a,第 1 年生长缓慢,第 2~4 年生长最盛,第 5 年后产量逐年下降。在北京市通州永乐店地区,苜蓿种植后从第 2 年开始每年可刈割 4 茬,每茬刈割的最佳时期为初花期,过早影响产量,过迟影响口感降低食用价值。苜蓿返青期在每年的 3 月初,最后一茬在 9 月下旬刈割,并留 5 cm 的茬,使越冬前的鲜草长到 10~15 cm 以利过冬。由于苜蓿在初花期就刈割,因此,就苜蓿单茬而言,

作物系数可概化为 3 个阶段,即生长初期、快速发育期和生长中期。

本次以通州永乐店农业节水中心 2003 年的苜蓿试验资料为例进行分析,苜蓿播种期为 2002 年的 4 月中旬,2003 年是苜蓿生长的第二年,返青期为 2003 年 3 月 2 日。2003 年苜蓿刈割 4 次,刈割时间分别为 4 月 23 日、6 月 6 日、7 月 16 日和 9 月 20 日。图 2 为砂壤土条件下 2003 年苜蓿作物系数概化曲线图。

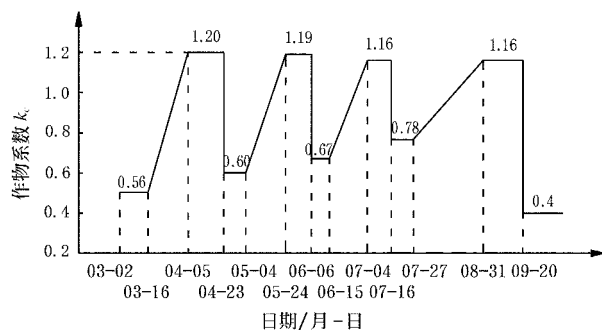


图 2 2003 年苜蓿各生育期作物系数变化

Fig 2 Crop coefficient change of alfalfa in 2003

2.3 用分段单值平均法计算作物系数

FAO 推荐用分段单值平均法计算作物系数步骤如下:

1) 从“作物需水量计算指南”(FAO-56)的表中查出某种作物在特定标准条件下的作物系数。所谓特定标准条件是指在半湿润气候区(空气湿度约为 45%,风速约为 2 m/s),供水充足,管理良好,生长正常,大面积高产的作物条件。从表中查出苜蓿在不同阶段的作物系数为:苜蓿生长初期的作物系数 $k_{cini}(Tab) = 0.4$,中期作物系数 $k_{omid}(Tab) = 1.2$ 。

2) 按当地气候条件调节 k_{omid} 。计算公式为

$$k_{omid} = k_{omid}(Tab) + [0.04(U_2 - 2) - 0.004(RH_{min} - 45)](h/3)^{0.3} \quad (4)$$

式中 U_2 ——该生育阶段内 2 m 高度处的日平均风速, m/s; RH_{min} ——该生育阶段内最低相对湿度的平均值; h ——该生育阶段内作物的平均高度, m。

3) 计算初始生长期的 k_{cini} 。在作物初始生长期,土面蒸发占总蒸发量的比例较大,因此计算时必须考虑土面的影响。影响因素主要是土壤结构及灌溉或降雨的平均间隔。计算公式如下

$$k_{cini} = E_{so}/ET_0 = 1.15 \quad \text{当 } t_w \leq t_1 \text{ 时} \quad (5)$$

$k_{cini} =$

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

当 $t_w > t_1$ 时 (6)

式中 E_{so} ——潜在蒸发率, mm/d; t_w ——灌溉或降雨的平均间隔天数; t_1 ——大气蒸发力控制阶段的天数, $t_1 = REW/E_{so}$; REW ——在大气蒸发力控制阶段蒸发的水量, mm, 主要跟土壤结构有关, 计算公式如下

$$REW = 20 - 0.15Sa \quad \text{对 } Sa > 80\% \text{ 的土壤 (7)}$$

$$REW = 11 - 0.06CL \quad \text{对 } CL > 50\% \text{ 的土壤 (8)}$$

$$REW = 8 + 0.08CL \quad \text{对 } Sa < 80\% \text{ 且 } CL < 50\% \text{ 的土壤 (9)}$$

式中 Sa, CL —— 分别为蒸发层土壤中沙粒和黏粒的含量, %。

TEW 为一次降雨或灌溉后总计蒸发的水量, mm; 计算公式如下

$$TEW = Ze(\theta_{rc} - 0.5\theta_{vp}) \quad ET_0 \leq 5 \text{ mm/d} \quad (10)$$

$$TEW = Ze(\theta_{rc} - 0.5\theta_{vp}) (ET_0/5)^{1/2} \quad ET_0 > 5 \text{ mm/d} \quad (11)$$

式中 Ze —— 土壤蒸发层深度, 100 ~ 150 mm; θ_{rc} , θ_{vp} —— 蒸发层土壤的田间持水量, 凋萎点含水率,

m^3/m^3 。

2.4 苜蓿各生育阶段作物系数

根据 2003 年永乐店农业节水中心苜蓿的试验资料进行生育期划分, 在进行生育期划分时, 第 1 茬的初始生育期为返青至分枝, 以后各茬的初始生育期为刈割的后一天至分枝(10% 覆盖率), 快速发育期为分枝(10% 覆盖率)至现蕾, 生长中期为现蕾至始花期(刈割)。本次对苜蓿生长年度的划分为 2003 年的返青期至 2004 年的返青期为一个计算年。

本文以永乐店试验中心试验地砂壤土有关参数进行计算, 砂壤土沙粒含量 $Sa = 68\%$, 黏粒含量 $CL = 13\%$, 田间持水量 θ_{rc} 和凋萎点含水率 θ_{vp} 分别为 $0.28 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 和 $0.13 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 。蒸发层深度 Ze 取 100 mm。快速发育阶段的作物系数取初始阶段和中期作物系数的平均值。各阶段苜蓿作物系数计算结果见表 1。

表 1 砂壤土条件下苜蓿各生育阶段的 k_c 值

Table 1 Crop coefficient of every growth stage of alfalfa under sandy-loam

茬口	生长初期		快速发育期		生长中期	
	时间/月-日	k_{cni}	时间/月-日	k_{cdev}	时间/月-日	k_{mid}
第 1 茬	03-02~ 03-16	0.56	03-17~ 04-05	0.88	04-06~ 04-23	1.20
第 2 茬	04-24~ 05-04	0.60	05-05~ 05-24	0.90	05-25~ 06-06	1.19
第 3 茬	06-07~ 06-15	0.67	06-16~ 07-04	0.92	07-05~ 07-16	1.16
第 4 茬	07-17~ 07-27	0.78	07-28~ 08-31	0.97	09-01~ 09-20	1.16
越冬期	2003-09-21~ 2004-02-29	0.40				

3 苜蓿作物需水量计算

苜蓿作物需水量就是每一茬各生育期作物系数 k_c 与参照作物腾发量 ET_0 乘积的总和。在砂壤土条件下苜蓿的作物需水量计算结果见表 2。

从表 2 计算结果可知, 2003 年永乐店地区的潜在腾发量 ET_0 为 874.2 mm, 在砂壤土条件下苜蓿作物需水量为 716.8 mm, 整个计算年度平均作物系数为 0.82。从第 1 茬到第 4 茬, 苜蓿平均作物系数为 0.95。

表 2 砂壤土条件下苜蓿作物需水量计算表

Table 2 Water requirements of alfalfa under sandy loam soil

生育阶段	生长初期			快速发育期			生长中期			小计 ET_0/mm	小计 ET_c/mm	各茬作物系数 k_c
	k_{cni}	ET_0/mm	ET_c/mm	k_{cdev}	ET_0/mm	ET_c/mm	k_{mid}	ET_0/mm	ET_c/mm			
第 1 茬	0.56	20.63	11.76	0.88	51.86	45.64	1.20	61.03	73.24	133.52	130.63	0.98
第 2 茬	0.60	47.19	28.31	0.90	65.99	59.39	1.19	54.57	64.94	167.75	152.64	0.91
第 3 茬	0.67	33.65	22.55	0.92	75.92	69.85	1.16	46.35	53.77	155.92	146.16	0.94
第 4 茬	0.78	29.99	23.39	0.97	123.35	119.65	1.16	51.13	59.31	204.47	202.35	0.99
越冬期	0.40	212.54	85.02							212.54	85.02	0.4
合计										874.2	716.8	0.82

4 试验验证

试验在北京市永乐店农业节水中心试验小区进行, 小区面积为 $5 \text{ m} \times 10 \text{ m}$, 土壤为砂壤土, 田间持水量 θ_{rc} 为 $28 \text{ m}^3/\text{m}^3$, 试验设充分灌溉处理, 使苜蓿在整个生育期 60 cm 土层的平均含水率大于 60% θ_{rc} , 每 5 d 用中子仪测定土壤含水率 1 次, 测定的土层深度为 0~10 cm, 10~20 cm, 20~40 cm, 40~60 cm, 60~80 cm,

80~100 cm, 灌溉前后加测 1 次。

苜蓿整个生育期水肥充足, 生长良好, 产量较高, 为 $50760 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 。生育期共追肥 2 次, 每次追肥 $202.5 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 。整个生育期苜蓿共灌溉 7 次, 除第 1 次灌水 60 mm 外, 其余各次均灌水 50 mm, 灌溉定额为 360 mm, 折合 $3600 \text{ m}^3/\text{hm}^2$, 整个生育期耗水量为 716.6 mm。因每次灌水上限不超过田间持水量, 因此深层渗漏约为零, 耗水量即为需水量。本文所述方法(作物系数

法)计算的作物需水量为 716.8 mm, 与试验数据相符, 说明了本文所述方法可以用于苜蓿作物需水量的计算。

5 苜蓿灌溉定额的计算

5.1 2003 年苜蓿净灌溉定额的计算

苜蓿整个生育期的需水量减去有效降雨量即为苜蓿的净灌溉定额。2003 年 3 月~2004 年 2 月总降雨量为 465.6 mm, 有效降雨量为 377.5 mm, 净灌溉定额计算见表 3。

表 3 2003 年苜蓿净灌溉定额计算表

Table 3 Net irrigation quota of alfalfa in 2003

作物需水量/mm	716.8
有效降雨量/mm	377.5
净灌溉定额/mm	339.3
折合净灌溉定额/ $m^3 \cdot hm^{-2}$	3393

经计算, 2003 年苜蓿的净灌溉定额为 3393 m^3/hm^2 。

5.2 不同水平年净灌溉定额的估算

作物需水量是指作物在适宜的土壤水分和肥力水平下, 经过正常生长发育, 获得高产时的植株蒸腾和棵间蒸发的水量之和。作物需水量的大小与气象条件(辐射、日照、气温、湿度、风速)及非气象条件(土壤水分状况、作物种类及生长发育阶段、阶段农业技术措施、灌溉排水措施等)有关。对于同一种作物, 在非气象条件相同的条件下, 不同水平年的作物需水量只与气象条件有关, 尽管不同降雨水平年的辐射、日照、气温、湿度、风速不尽相同, 但没有发现以上所指气象因素与降雨水平年之间存在着必然的关系。灌溉用水定额的估算主要用于灌溉的管理和规划之用, 因此, 在估算不同水平年灌溉用水定额时, 不同水平年的作物需水量可近似认为同一个数值, 而只是降雨量不同。

表 4 不同水平年苜蓿净灌溉定额计算表

Table 4 Net irrigation quota of alfalfa in different hydrologic years

项 目	水平年			
	95%	75%	50%	25%
作物需水量/mm	716.8	716.8	716.8	716.8
有效降雨量/mm	250.1	377.5	477.8	633.9
净灌溉定额/mm	466.7	339.3	239	82.9
折合净灌溉定额/ $m^3 \cdot hm^{-2}$	4667	3393	2390	829

2003 年 3 月至 2004 年 2 月期间(苜蓿的计算生育期), 永乐店地区的降雨量为 465.6 mm, 相当于 75% 的水平年。根据通州区 1955~2002 年 48 年的降雨资料进行频率分析, 该地区 50% 水平年的降雨量为 570 mm, 95% 水平年的降雨量为 320 mm, 25% 水平年的降雨量为 720 mm。选取典型年进行有效降雨的计算, 有效降雨量计算采用有效降雨系数法, 即有效降雨量等于降雨量乘以有效降雨系数, 有效降雨系数的确定如下^[4]: 当次降雨量小于 5 mm 时, 有效降雨系数为 0; 当次降雨量介于 5 mm 与 50 mm 之间时, 有效降雨系数为 1.0;

当次降雨量大于 50 mm 时, 有效降雨系数 0.8。根据以上方法计算结果, 50% 水平年的有效降雨量为 477.8 mm, 95% 水平年的有效降雨量为 250.1 mm, 25% 水平年的有效降雨量为 633.9 mm。不同水平年的净灌溉定额的计算见表 4。

5.3 不同节水灌溉方式的灌溉水利用系数

在实际应用中, 人们关心的是不同灌溉方式下的作物毛灌溉定额, 毛灌溉定额是净灌溉定额与灌溉水利用系数的比值。不同灌水方式及不同土质条件下的灌溉水利用系数有所不同, 在灌溉系统中的不同地方计量其数值也是不一样的, 为便于统一标准, 以井灌区井口处计量为标准。苜蓿通常采用的节水灌溉方式有喷灌和管灌, 参考有关技术规范^[6,7], 喷灌方式在砂壤土条件下的灌溉水利用系数为 0.85, 管灌为 0.70。

5.4 不同灌溉方式苜蓿毛灌溉定额的估算

不同灌溉方式及不同水平年条件下苜蓿的灌溉定额计算结果见表 5。

表 5 永乐店地区苜蓿节水灌溉定额表

Table 6 Water-saving irrigation quota of alfalfa in Yongledian district $m^3 \cdot hm^{-2}$

水平年	灌溉方式	
	喷 灌	管 灌
95%	5490	6667
75%	3990	4847
50%	2812	3414
25%	975	1184

6 结 论

作物灌溉用水定额是灌溉管理和确定作物发展规模的重要依据, 也是以量计征的基础。本文对应用 FAO Penman-Monteith 方程和分段单值平均作物系数法推算苜蓿灌溉定额的方法进行了详细的分析, 并结合北京市永乐店农业节水中心气象资料和苜蓿试验的有关资料, 推算了该地区 2003 年苜蓿的净灌溉定额, 并得到了试验的初步验证, 在此基础上计算了在永乐店地区土壤条件下不同水平年及不同灌溉方式下的节水灌溉定额, 计算结果可为苜蓿灌溉管理和规划提供参考依据。本文推算苜蓿灌溉定额的方法也可用于其它作物灌溉用水定额的估算。

[参 考 文 献]

- [1] Richard G Allen, Luis Pereira Crop evapotranspiration, Guidelines for crop water requirements [M] FAO IRRIGATION AND DRAINAGE PAPER 56, 1998
- [2] 刘 钰, L. S. Pereira 参照腾发量的新定义及计算方法对比[J] 水利学报, 1997, (6): 27-33
- [3] 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
- [4] 郭元裕 高等学校教材《农田水利学》(第 2 版) [M] 北京: 水利水电出版社, 1986, 37.
- [5] 朱湘宁, 郭继勋 华北地区灌溉对苜蓿产量及土壤水分的影响[J] 中国草地, 2002, 24(6): 32-37.

- [6] SL 207- 98,《节水灌溉技术规范》[S] 北京: 中华人民共和国行业标准 水利电力出版社, 1995
- [7] SL/T 153- 95,《低压管道输水灌溉工程技术规范》[S] 北京: 中华人民共和国行业标准 [9] 何京丽, 王亚东 苜蓿节水灌溉研究[J] 内蒙古农牧学院学报, 1995, 16(1): 49- 53
- [8] 陈玉民, 郭国双 中国主要作物需水量与灌溉[M] 北京: [10] 赵志新 苜蓿栽培技术[J] 河北林业科技, 2003, (3): 38- 39

Calculating alfalfa irrigation quota by FAO Penman-Monteith equation

Xu Cuiping, Liu Honglu, Zhao Lixin

(Beijing Hydraulic Research Institute, Beijing 100044, China)

Abstract: The method for calculating irrigation quota of alfalfa by FAO Penman-Monteith equation and time-averaged crop coefficients was studied in detail. With the meteorological and the alfalfa experiment data provided by Beijing Yongledian Water-saving Center, the irrigation quota of alfalfa was calculated and verified. The irrigation quota in different hydrologic years of alfalfa under different irrigation techniques was estimated, which provided the reference basis for irrigation management and planning of alfalfa. The method could also be used to estimate other crop irrigation quota.

Key words: Penman-Monteith equation; crop coefficient; irrigation quota; water use quota