

基于称重式蒸渗仪的喷灌条件下冬小麦和糯玉米作物系数估算方法

宿梅双¹, 李久生², 饶敏杰³

(1. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083; 2. 国家节水灌溉北京工程技术研究中心, 北京 100044;
3. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081)

摘要: 利用位于北京的称重式蒸渗仪, 对喷灌条件下的冬小麦和糯玉米需水规律进行了测定, 进而计算了两种作物的作物系数。结果表明, 冬小麦和糯玉米的作物系数与播种后天数之间的关系均可以用四次多项式来表征。根据 FAO-56 推荐的作物系数计算方法, 计算了两种作物的分段单值作物系数和双作物系数, 发现华北平原喷灌条件下冬小麦和糯玉米的作物系数在生育期内的变化可以用 FAO-56 推荐的模式来描述, 但实测值一般大于 FAO-56 的建议值。为了能利用 FAO-56 推荐的模式较好地描述喷灌作物系数变化规律, 依据实测资料对 FAO-56 建议的单值作物系数和基础作物系数进行调整后, 模拟了两种作物需水量的变化, 模拟的作物阶段需水量与实测值吻合良好。

关键词: 作物系数; 称重式蒸渗仪; 喷灌; 冬小麦; 糯玉米

中图分类号: S274.2

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2005)08-0025-05

宿梅双, 李久生, 饶敏杰. 基于称重式蒸渗仪的喷灌条件下冬小麦和糯玉米作物系数估算方法[J]. 农业工程学报, 2005, 21(8): 25-29.

Su Meishuang, Li Jiusheng, Rao Minjie. Estimation of crop coefficients for sprinkler-irrigated winter wheat and sweet corn using a weighing lysimeter[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(8): 25-29. (in Chinese with English abstract)

0 引言

作物需水量是制定合理灌溉制度的基础, 也是进行区域水资源规划不可缺少的参数, 因此有关研究一直备受关注。自 20 世纪 50 年代开始, 针对地面灌溉条件下主要农作物的需水量进行了长期研究, 取得了丰富成果, 绘制完成了全国主要作物需水量等值线图^[1]。近年来, 随着喷、微灌面积的增大, 对喷、微灌条件下的作物需水规律也相继开展了一些研究工作^[2-4]。

作物需水量的计算方法很多, 最常用的方法是作物系数-参照作物腾发量法。参照作物腾发量可利用气象资料, 采用 Penman-Monteith 公式计算, 因此, 特定作物需水量的确定就依赖于作物系数。作物系数反映了实际作物与参照作物需水量之间的差异。联合国粮农组织 (FAO) 出版了《作物腾发量-作物需水量计算指南》(FAO 灌溉与排水手册-56, 1998) 一书, 给出了确定作物系数的分段单值平均法和双值法^[5]。近年来, 国外一些学者用此方法计算了多种作物的作物系数, 并与实际情况进行了对照^[6-11]。在没有水分胁迫的情况下, Hunsaker^[6]和 Allen^[7]对棉花的试验, Tolk 和 Howell^[8]对高粱以及 Hunsaker 等^[9]对苜蓿的田间试验均得出利用 FAO 的计算方法得到的需水量与实际情况吻合程

度较好的结论。而 Howell 等在 2002 年对棉花的充分灌溉和非充分灌溉的情况进行了试验, 证明了在非充分灌溉的情况下此方法也很适用^[10]。在中国, 近年来也对此开展了一些研究, 2000 年, 刘钰和 Pereira 利用河北省雄县的冬小麦和夏玉米的小区试验资料对分段单值平均法和双值法进行了验证, 指出可以利用 FAO 推荐的方法来确定华北地区主要作物的作物系数^[11]。但是最近樊引琴和蔡焕杰利用位于陕西关中地区的称重式蒸渗仪资料对单作物系数法和双作物系数法进行了比较, 指出 FAO 推荐单值作物系数和基础作物系数与实测值差别较大, 通过对推荐值进行修正, 才能达到满意的精度^[12]。由此可见, FAO 推荐方法的适用性需要进行更广泛深入的验证。

本文旨在利用称重式蒸渗仪的实测资料, 验证 FAO-56 建议的作物系数计算方法对华北地区喷灌作物的适用性, 为估算喷灌条件下的作物系数及制定合理的灌溉制度提供依据。

1 试验材料与方法

1.1 试验布置

本文试验在中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所试验站内进行。该站位于东经 116°28', 北纬 39°48', 海拔 31.3 m, 属于暖温带半湿润季风大陆性气候区。试验田块尺寸为 15 m × 45 m, 0~40 cm 深度为砂质黏壤土, 40~60 cm 为壤质黏土。将田块划分成 15 m × 15 m 的小区, 中间的小区安装有称重式蒸渗仪。喷头安装在小区的四个角, 间距 15 m × 15 m, 选用 LEGO 公司生产的喷头, 0.3 MPa 压力下的出水量为 0.8 m³/h。

供试冬小麦品种为中麦 9 号, 播种时间为 2002 年

收稿日期: 2004-09-28 修订日期: 2005-06-20

基金项目: 国家自然科学基金(50179037); “十五”国家重大科技专项(2002AA2Z40215)

作者简介: 宿梅双(1978-), 女, 河北石家庄人, 主要从事灌溉理论与技术方面的研究。北京 中国农业大学水利与土木工程学院, 100083, Email: meishuangsu@126.com

通讯作者: 李久生(1962-), 男, 河北邢台人, 博士, 研究员, 主要从事灌溉理论与技术方面的研究。北京 国家节水灌溉北京工程技术研究中心, 100044, Email: lij@swhr.com

10月10日,播种量为135 kg/hm²,行距30 cm,2003年6月13日收获;供试糯玉米品种为中糯1号,播种时间为2003年6月18日,行距60 cm,株距30 cm,2003年9月12日收获。

1.2 观测方法

1) 实际腾发量的测定:用建于田间的自制称重式蒸渗仪测定,其盛土容器的尺寸为2 m × 2 m × 2.3 m;测量精度为0.02 mm。蒸渗仪单位时段的腾发量由水量平衡方法计算,计算中忽略地表径流、潜水蒸发和气态水凝结。

2) 气象资料观测:利用自动气象站自动观测并记录气温、2 m 高度风速、风向、湿度、太阳辐射、降雨等气象要素数据,测定间隔为15 min。

3) 土壤水分的观测:利用中子仪观测土壤水分。

4) 灌水日期与灌水量的确定:当根区土壤含水率消耗至田间持水量的65%左右时进行灌水,使土壤含水率达到田间持水量或稍高,喷灌水量约为40 mm。

5) 灌水量测定:将15 m × 15 m 的试验小区分成2.5 m × 2.5 m 的网格,在每个网格中间放置开口为100 cm²的圆柱形承雨筒,根据承雨筒承接到的水量来计算平均灌水深度。

1.3 作物系数的确定

FAO 推荐充分供水条件下作物需水量计算公式如下

$$ET = K_c ET_0 \quad (1)$$

$$ET = (K_{cb} + K_e) ET_0 \quad (2)$$

式中 ET_0 ——参照作物需水量,mm,采用FAO-56推荐的Penman-Monteith公式计算; K_c ——作物系数; K_{cb} ——基础作物系数; K_s ——水分胁迫系数; K_e ——土面蒸发系数。

1.3.1 分段单值法

为简化计算,FAO-56推荐对标准状态(所谓标准状态是指在半湿润气候区,空气相对湿度45%,风速

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)下的作物采用分段单值平均法表示,即把作物系数的变化过程概化为4个阶段的3个值。FAO-56推荐的冬小麦及糯玉米各生育阶段的单值作物系数分别为^[5]:

$$\text{冬小麦: } K_{cini}(Tab) = 0.7; K_{cfro}(Tab) = 0.4; K_{omid}(Tab) = 1.15; K_{cend}(Tab) = 0.4$$

$$\text{糯玉米: } K_{cini}(Tab) = 0.3; K_{omid}(Tab) = 1.15; K_{cend}(Tab) = 1.05$$

不同地区的作物系数值需要按当地的湿润频率和气候条件对推荐值进行修正^[5]。

1) 初期阶段作物系数 K_{cini} 的确定

$$K_{cini} = \frac{E_{so}}{ET_0} = 1.15 \frac{t_w}{t_1} \quad (3)$$

$K_{cini} =$

$$\frac{TEW - (TEW - REW)^{1 - (\frac{t_w - t_1}{t_1}) E_{so} (1 + \frac{REW}{TEW - REW})}}{t_w ET_0} \quad t_w > t_1 \quad (4)$$

式中 REW ——在大气蒸发力控制阶段蒸发的水量,mm; TEW ——降雨或灌溉后总计蒸发的水量,mm;

E_{so} ——潜在蒸发率,mm/d; t_w ——灌溉或降雨的平均间隔天数,d; t_1 ——大气蒸发力控制阶段的天数,d。

2) 中期和后期作物系数(K_{omid} , K_{cend})的确定 根据FAO-56提供的 K_{omid} 和 K_{cend} ,当中期和后期的最小相对湿度的平均值 $RH_{min} = 45%$, $U_2 = 2$ m/s时,按下式修正^[5]

$$K_c = K_{c(推荐)} + [0.04(U_2 - 2) - 0.004(RH_{min} - 45)] (\frac{h}{3})^{0.3} \quad (5)$$

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} ——该生育阶段内日最低相对湿度的平均值(20% RH 80%); h ——该生育阶段内作物的平均高度,m。

1.3.2 双值法

1) 基础作物系数 K_{cb} 的确定

FAO-56推荐的基础作物系数分别为:

$$\text{冬小麦: } K_{cbini}(Tab) = 0.15; K_{cbmid}(Tab) = 1.10;$$

$$K_{cbend}(Tab) = 0.30$$

$$\text{糯玉米: } K_{cbini}(Tab) = 0.15; K_{cbmid}(Tab) = 1.10;$$

$$K_{cbend}(Tab) = 1.00$$

当中期和后期的最小相对湿度的平均值 $RH_{min} = 45%$, $U_2 = 2$ m/s, $K_{cb} > 0.45$ 时, K_{cbmid} 和 K_{cbend} 按下式修正

$$K_{cb} = K_{cb(推荐)} + [0.04(U_2 - 2) - 0.004(RH_{min} - 45)] (\frac{h}{3})^{0.3} \quad (6)$$

2) 土壤蒸发系数 K_e 的确定

$$K_e = K_r (K_{amax} - K_{cb}) f_{ev} K_{amax} \quad (7)$$

式中 K_e ——土壤蒸发系数; K_r ——蒸发衰减系数; K_{amax} ——灌溉或降雨后作物系数的最大值; K_{cb} ——基础作物系数; f_{ev} ——蒸发面积比。

2 结果与分析

2.1 作物系数在生育期内的变化

根据FAO-56推荐的生育阶段划分方法^[5],结合试验地区的气候条件和作物的实际生长情况划分冬小麦和糯玉米的生育阶段(表1)。

利用蒸渗仪实测数据计算的冬小麦和糯玉米逐日作物系数变化情况见图1,可以看出两种作物的作物系数都经历了由小到大,达到峰值后又减小的过程。冬小麦作物系数的峰值出现在播种后200 d左右,处于抽穗至灌浆时期;糯玉米作物系数的峰值出现在播种后50 d左右。冬小麦作物系数与播种后天数的拟合公式为:

$$K_c = 5.2031 \times 10^{-8} x^4 - 4.033 \times 10^{-5} x^3 + 1.1348 \times 10^{-2} x^2 - 1.3624x + 59.262, R^2 = 0.82 \quad (8)$$

糯玉米的作物系数和播种后天数的拟合公式为:

$$K_c = 2.5158 \times 10^{-6} x^4 - 4.69 \times 10^{-4} x^3 + 2.9433 \times 10^{-2} x^2 - 0.69486x + 5.9222, R^2 = 0.84 \quad (9)$$

式中 K_c ——作物系数; x ——播种后天数,d。

利用SA S统计软件对回归方程(8)、(9)进行了显著性检验,得到方程(8) $F = 94.37 > F_{0.05}(4, 87) =$

2.49, 方程(9) $F = 51.37 > F_{0.05}(4, 33) = 2.67$, 两个方程均达到极显著水平。

表 1 冬小麦和糯玉米生育阶段的划分

Table 1 Growing periods of winter wheat and sweet corn

作物种类	阶段划分	初始生长期	快速发育期	生育中期	成熟期
冬小麦	日期/年-月-日	2002-10-10~ 2003-02-12	2003-02-13~ 04-24	04-25~ 05-25	05-26~ 06-12
	播种后天数/d	0~ 125	126~ 196	197~ 227	228~ 245
糯玉米	日期/年-月-日	2003-06-18~ 07-04	07-05~ 07-28	07-29~ 08-28	08-29~ 09-11
	播种后天数/d	0~ 16	17~ 40	41~ 71	72~ 85

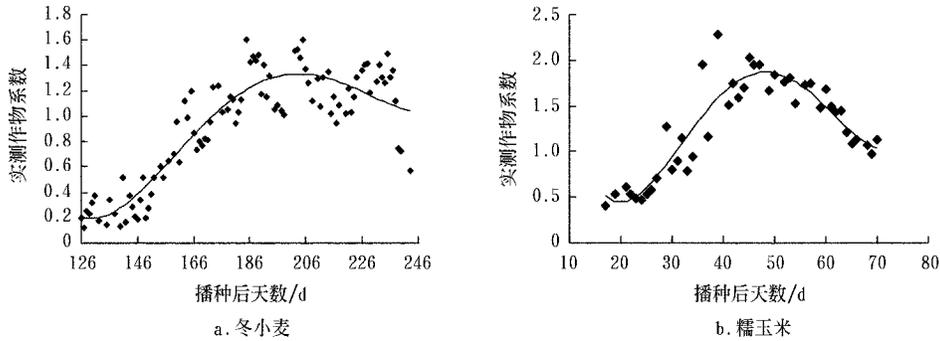


图 1 实测作物系数与播种后天数的关系图

Fig. 1 Relationships between measured crop coefficient (K_c) and days after sowing for winter wheat and sweet corn

2.2 分段单值平均作物系数

由于缺失冬小麦和糯玉米初始生长期的蒸渗仪资料, 所以本文只研究了这两种作物快速发育至成熟期的作物系数变化情况。利用 FAO-56 推荐值进行修正后的单作物系数变化过程线以及由实际计算的作物系数概化的过程线见图 2。从图中可以看出, 由蒸渗仪实测数据计算的作物系数的变化过程与 FAO-56 推荐的 K_c 典型曲线变化趋势基本一致。由实测数据概化的冬小麦和糯玉米各阶段的单作物系数分别为:

冬小麦: $K_{cfr(实)} = 0.22$; $K_{omid(Tab)} = 1.21$; $K_{cend(Tab)} = 0.79$
 糯玉米: $K_{cini(实)} = 0.42$; $K_{omid(Tab)} = 1.45$; $K_{cend(Tab)} = 1.30$

= 1.30

由图 2 看出冬小麦的概化作物系数与 FAO-56 的推荐值吻合程度较好, 但是糯玉米各生育阶段概化作物系数与推荐值相差较大, 两种作物在生育中期的概化作物系数都要高于 FAO-56 推荐值, 而糯玉米在生长末期的实际作物系数明显高于 FAO-56 的推荐值, 所以应根据当地的实际情况对 FAO-56 推荐值进行调整。调整后的单作物系数为:

冬小麦: $K_{cfr(Tab)} = 0.22$; $K_{omid(Tab)} = 1.21$; $K_{cend(Tab)} = 0.79$
 糯玉米: $K_{cini(Tab)} = 0.30$; $K_{omid(Tab)} = 1.45$; $K_{cend(Tab)} = 1.30$

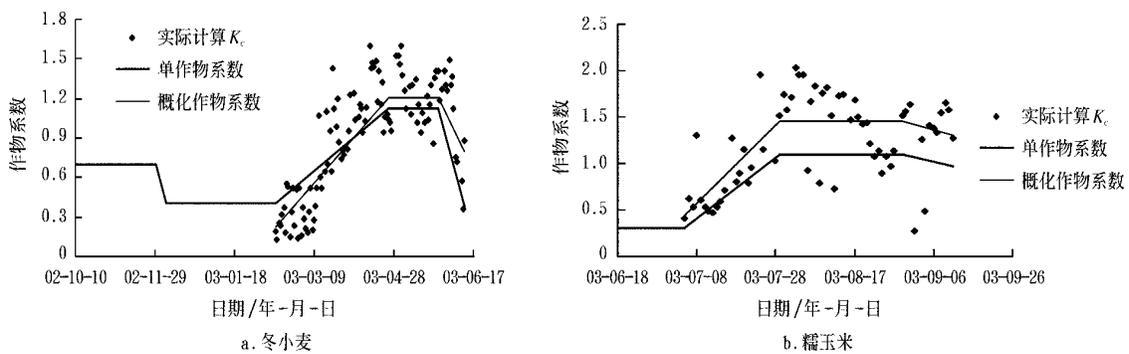


图 2 实际作物系数概化模型与分段单值作物系数对比

Fig. 2 Comparisons of the single crop coefficients determined by observed data and determined by FAO-56 for winter wheat and sweet corn

2.3 双作物系数

由于 FAO-56 推荐的基础作物系数按公式修正

后, 计算的双作物系数与实测值的偏差还较大, 因此根据实测数据概化的作物系数模型对 FAO-56 推荐的

基础作物系数进行了调整, 调整后的基础作物系数为:

冬小麦: $K_{cbf\ ro}(Tab) = 0.22$; $K_{cbn\ id}(Tab) = 1.21$;
 $K_{cbend}(Tab) = 0.79$

糯玉米: $K_{cbini}(Tab) = 0.30$; $K_{cbn\ id}(Tab) = 1.45$;
 $K_{cbend}(Tab) = 1.30$

图 3 为双作物系数的计算结果。由图中看出两种作物在初始生长期和快速发育期双作物系数值变化波动较大, 这是由于这两个阶段作物的叶面积较小, 地面覆盖程度较低, 土面蒸发在需水量中所占比例较大, 而灌溉和降雨后土面蒸发强度迅速增大, 而后随着表土变干, 土面蒸发强度迅速下降, 致使双作物系数在灌溉和降雨后出现较大波动; 而到了生育中期, 地面基本被作物覆盖, 植株蒸腾占主导地位, 双作物系数值受灌溉和

降雨的影响不大, 因而双作物系数和基础作物系数值接近; 到了成熟期, 随着植株部分叶片的枯萎, 地面覆盖程度有所下降, 土面蒸发有所增加, 双作物系数值也有所波动。

2.4 作物需水量计算值与实测值的对比

冬小麦和糯玉米各生育阶段的单值法、双值法和多项式法计算的作物需水量和实测值的对比见表 2。从表中可以看出, 用双作物系数法计算出的需水量比单作物系数法更接近实测值。在所研究的 3 个生育阶段, 3 种方法的计算结果与实测结果的相对偏差较小, 大部分小于 10%, 例如糯玉米生育中期计算结果与实测值十分接近, 单作物系数法和双作物系数法计算值与实测值的绝对偏差分别为 1 mm、4 mm, 相对偏差分别为 0.2%。

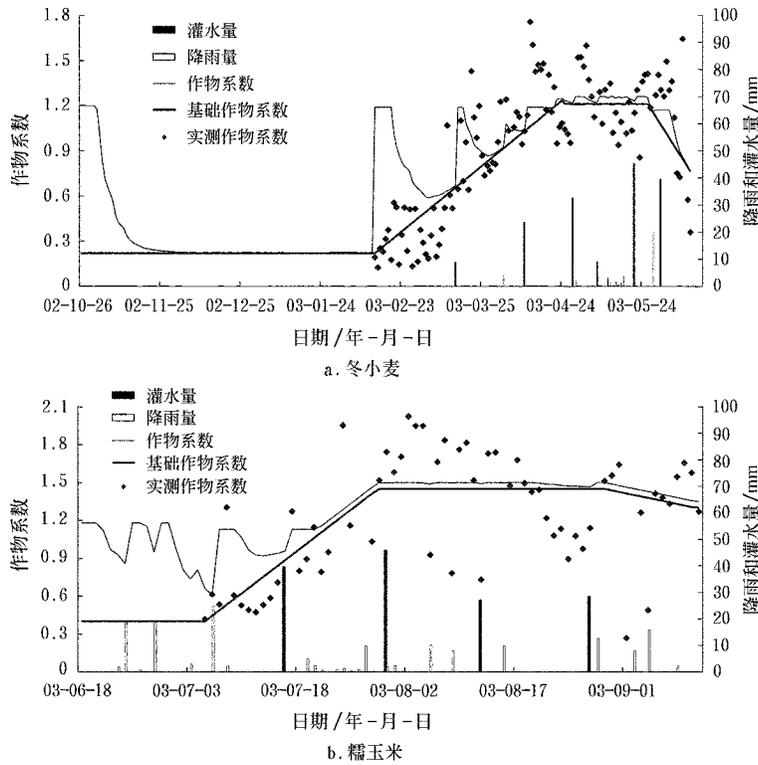


图 3 双值作物系数法计算的冬小麦和糯玉米的作物系数

Fig. 3 Crop coefficients calculated by dual crop coefficients for winter wheat and sweet corn

表 2 单值法、双值法和多项式法计算的作物需水量与实测值比较

Table 2 Comparisons of crop water demands calculated by single crop coefficient, dual crop coefficient and polynomial equation and the observed values

作物种类	生育阶段	ET_1 /mm	ET_2 /mm	ET_3 /mm	ET_c /mm	ΔET_1 /mm	ΔET_2 /mm	ΔET_3 /mm	R_1 /%	R_2 /%	R_3 /%
冬小麦	快速发育期	106	130	111	132	- 26	- 2	- 21	- 20	- 1	- 16
	生育中期	135	139	143	149	- 11	- 10	- 6	- 10	- 7	- 4
	成熟期	74	78	84	89	- 15	- 11	- 4	- 17	- 12	- 5
	总计	315	348	338	370	- 56	- 22	- 32	- 15	- 6	- 9
糯玉米	快速发育期	76	97	75	85	- 9	12	- 10	- 11	14	- 12
	生育中期	184	190	202	185	- 1	4	16	0	2	9
	成熟期	62	64	74	71	- 9	- 7	3	- 13	- 9.5	4
	总计	322	351	351	341	- 20	9	9	- 6	3	3

注: 下角标 1 表示采用单作物系数法计算; 2 表示采用双作物系数法计算; 3 表示采用拟合的多项式计算, 其中冬小麦和糯玉米的总计 R 为总的 $\Delta ET_1/ET_c, \Delta ET_2/ET_c, \Delta ET_3/ET_c$ 。

3 结论与讨论

利用称重式蒸渗仪的实测数据以及 FAO-56 推荐的单作物系数、双作物系数计算公式, 计算喷灌条件下冬小麦和糯玉米快速发育至成熟期的实际作物系数、单作物系数和双作物系数, 结果表明: (1) 作物系数与播种后天数的关系可用四次多项式表征。需要说明的是, 本文给出的多项式是依据一年的资料分析得到的, 进一步的试验将使其精度得到改善。(2) 华北平原喷灌条件下的作物系数在生育期内的变化可以用 FAO-56 推荐的模式来描述, 但实测值一般大于 FAO-56 的建议值, 需要对 FAO-56 的推荐值进行调整。利用调整后的作物系数计算了需水量, 单值法和双值法计算精度都较好, 而双值法更接近实测值。

[参 考 文 献]

- [1] 陈玉民, 郭国双, 王广兴, 等. 中国主要作物需水量与灌溉[M]. 北京: 水利电力出版社, 1995.
- [2] Sepaskhah A R, Kashefipour S M. Evapotranspiration and crop coefficient of sweet lime under drip irrigation[J]. Agricultural Water Management, 1995, (27): 331- 340.
- [3] 李久生, 饶敏杰, 张建君. 干旱区玉米滴灌需水规律的田间试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2003, 22(1): 16- 21.
- [4] 肖娟, 雷廷武, 李光永, 等. 西瓜和蜜瓜咸水滴灌的作物系数和耗水规律[J]. 水利学报, 2004, (6): 119- 124.
- [5] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop

evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements[J]. FAO Irrigation and Drainage, 1998, 56

- [6] Hunsaker D J. Basal crop coefficient and water use for early maturity cotton [J]. Transactions of the ASAE, 1999, 42(4): 927- 936.
- [7] Allen R G. Using the FAO-56 dual crop coefficient method over an irrigated region as part of an evapotranspiration intercomparison study[J]. Journal of Hydrology, 2000, (229): 27- 41.
- [8] Tolk J A, Howell T A. Measured and simulated evapotranspiration of grain sorghum grown with full and limited irrigation in three high plains soils [J]. Transactions of the ASAE, 2000, 44(6): 1553- 1558.
- [9] Hunsaker D J, Pinter P J, Jr, et al. Alfalfa basal crop coefficients for FAO-56 procedures in the desert regions of the southwestern U. S [J]. Transactions of the ASAE, 2002, 45(6): 1799- 1815.
- [10] Howell T A, Evett J A, Tolk J A, et al. Evapotranspiration of full-, deficit-irrigated, and dryland cotton on the Northern Texas high plains[C]. In: Burt C M, Anderson S S, eds. USCID/EWRI Conf [A]. Denver, Colo.: U S Committee on Irrigation and Drainage, 2002, (7): 321- 339.
- [11] 刘钰, Pereira L S. 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.
- [12] 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, (3): 50- 54.

Estimation of crop coefficients for sprinkler-irrigated winter wheat and sweet corn using a weighing lysimeter

Su Meishuang¹, Li Jiusheng², Rao Minjie³

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. National Center of Efficient Irrigation Engineering and Technology Research, Beijing 100044, China;

3. Agro-Environmental and Sustainable Development Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: Crop water demands for sprinkler-irrigated winter wheat and sweet corn were measured using a weighing lysimeter located in Beijing. Then the coefficients of two crops were calculated. The results showed that the relationships between crop coefficient and days after seeding can be represented by a fourth-order polynomial equation for both crops. Single and dual crop coefficients for winter wheat and sweet corn were computed based on the method recommended by FAO-56 and compared with the observed data. The comparison indicated that the variation of crop coefficients during the growing season for sprinkler-irrigated crops of Northern China Plains could be described by the patterns recommended by FAO-56, but the computed crop coefficients were usually smaller than the observed values. The single and basal crop coefficients suggested by FAO-56 were therefore modified based on the observed results and crop water demands for winter wheat and sweet corn were simulated. A good agreement between the simulated and the observed crop water requirements was obtained for different growing periods of the two crops.

Key words: crop coefficient; weighing lysimeter; sprinkler irrigation; winter wheat; sweet corn