

# 沙漠绿洲灌区膜下滴灌作物需水量及作物系数研究

张振华<sup>1</sup>, 蔡焕杰<sup>2</sup>, 杨润亚<sup>1</sup>, 赵永<sup>2</sup>

(1. 烟台师范学院地理与资源管理学院, 烟台 264025; 2. 西北农林科技大学教育部旱区农业水土工程重点实验室, 杨凌 712100)

**摘 要:** 根据 2001 年甘肃民勤小坝口灌溉试验站自动气象站观测的气象资料, 依据 FAO Penman—Monteith 公式计算出作物生育期内参考作物蒸发蒸腾量, 结合实测的充分供水条件下作物耗水量, 对膜下滴灌条件下大田作物的需水规律和作物系数进行了研究。确定了该地区膜下滴灌棉花和玉米各个生育阶段的作物系数, 并建立了作物系数和有效积温及播种后天数的函数关系。该结果为该沙漠绿洲灌区膜下滴灌条件下棉花、玉米的水分管理提供了科学依据。

**关键词:** 膜下滴灌; 棉花; 玉米; 需水规律; 作物系数

**中图分类号:** S275.6

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-6819(2004)05-0097-04

## 0 引言

试验于 2001 年 4 月至 10 月在甘肃省民勤县小坝口灌溉试验站内进行, 该区属于干旱地区, 降雨量少且气候干燥, 蒸发强烈。多年平均降雨量在 110 mm 左右, 多为 5 mm 以下的无效降雨量, 多年平均蒸发量 2644 mm, 是典型的沙漠绿洲灌区。地下水埋深为 13~18 m。试验区土质为砂壤土, 有机质含量中等, 1 m 土层内田间持水量为 22.2%~23.5% (质量百分比)。0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm 和 60~100 cm 深度土层的干容重分别为 1.32、1.40、1.55 和 1.58 g/cm<sup>3</sup>。由于地表水资源日益衰减, 当地农业生产的发展主要靠地下水资源的严重开采来维持, 导致地下水位不断下降, 矿化程度持续上升。采用新型高效灌溉技术, 扩大节水耐盐作物的种植面积, 是巩固沙漠绿洲, 发展农业生产的重要措施。膜下滴灌技术的出现, 为解决该问题提供了一条新思路<sup>[1-3]</sup>。作物的蒸发蒸腾量受土壤条件、灌溉方式、作物品种及气象因素的影响, 且在作物生育期内随作物发育状况有很大的变化<sup>[4,5]</sup>。由于其在水利和农业区划、水资源开发利用、流域规划和灌溉制度的设计、规划与管理中的重要作用<sup>[6-8]</sup>, 长期以来, 作物需水量及其变化规律的研究一直受到国内外学者的重视。膜下滴灌是一种局部灌溉, 在地膜覆盖和滴灌的综合效应下, 作物生长与常规条件不同, 因此影响作物需水量的一些基本条件都发生了变化。本文对膜下滴灌棉花和玉米需水量和作物系数在各生育阶段的分布规律进行了深入的研究, 以期为农田水分管理提供科学依据。

## 1 材料方法

### 1.1 作物种植及毛管布置方式

膜下滴灌棉花和玉米的毛管布置方式均设为 1 控 4 即 1 条毛管灌溉 4 行作物, 毛管铺设在 4 行作物的正中间。棉花的株距和行距均为 20 cm, 玉米的株距和行

距均为 30 cm。棉花和玉米的基肥用量相同, 每 hm<sup>2</sup> 地施基肥磷酸二铵和尿素均为 382.5 kg, 灌水过程中棉花追肥每 hm<sup>2</sup> 施磷酸二铵和尿素 607.5 kg, 灌水过程中玉米追肥每 hm<sup>2</sup> 施磷酸二铵和尿素 907.5 kg。本次研究供试棉花品种为新陆早 7 号, 于 2001 年 4 月 25 日播种, 5 月 5 日出苗, 10 月 10 日收获, 全生育期共 168 d。本次研究供试玉米品种为丹玉 13 号, 于 2001 年 4 月 25 日播种, 5 月 5 日出苗, 9 月 10 日收获, 全生育期共 137 d。棉花生育期内共降雨 15 次, 合计降雨量为 80.56 mm, 其中次降雨量超过 5 mm 的有效降雨 6 次, 有效降雨量合计 63.10 mm。

### 1.2 灌水处理

本试验膜下滴灌棉花和玉米均设 1 个处理, 该处理 0~60 cm 土层的土壤含水率下限设为田间持水量 60%。每个处理设 4 个重复。

### 1.3 观测项目和方法

本试验对气象因子、土壤水分以及作物参数进行测定, 其中包括: 用取土烘干法测定棉花根系层 0~60 cm 土壤含水量, 每 10 d 测定一次且在灌水前后加测; 作物耗水量采用水量平衡方程计算, 据实测相邻两次根系层土壤水分含量以及其间的灌水量和降雨量资料, 计算出作物在各个生育阶段的耗水量。作物株高用钢卷尺测量, 选取长势均匀有代表性的 20 株供测试, 叶面积用长×宽×系数的方法求得, 每 10~15 d 测量一次; 棉花和玉米各处理的产量为 4 个重复产量的平均值; 风速、气温、湿度、太阳辐射等气象因子用智能化自动气象工作站现场采集。

### 1.4 参考作物蒸发蒸腾量和作物系数的确定方法

FAO 按照 Penman—Monteith 方程的要求, 给出了参考作物蒸发蒸腾量的新定义。计算 ET<sub>0</sub> 的 FAO Penman—Monteith 公式如下

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

式中 ET<sub>0</sub>——参考作物蒸发蒸腾量, mm; R<sub>n</sub>——作物表面的净辐射量, MJ·(m<sup>2</sup>·d)<sup>-1</sup>; G——土壤热通量, MJ·(m<sup>2</sup>·d)<sup>-1</sup>; u<sub>2</sub>——2 m 高处日平均风速, m/s; e<sub>s</sub>——饱和水汽压, kPa; e<sub>a</sub>——实际水汽压, kPa;

收稿日期: 2003-09-03 修订日期: 2004-07-10

基金项目: 国家高技术研究发展计划项目(2002AA 2Z4031)及烟台师范学院中青年自然科学基金项目(000444)的一部分

作者简介: 张振华(1971-), 河北藁城人, 博士, 教授, 主要从事区域水土资源高效利用研究。山东烟台师范学院地理与资源管理学院, 264025。Email: zhangzh71@163.com

$\Delta$ —— 饱和水汽压与温度曲线的斜率,  $\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$  ;  $\gamma$ ——  
干温表常数,  $\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$  。

根据实测充分供水处理作物需水量以及由上述  
FAO Penman—Monteith 公式计算得到的相应时段参  
考作物蒸发蒸腾量结果, 二者的比值即为该阶段膜下滴  
灌条件下的作物系数。

2 结果分析

2.1 作物生育期内土壤水分和  $ET_0$  的变化

依据自动气象站所测的气象资料, 利用 FAO-56  
Penman—Monteith 公式逐日计算出棉花生育期内参  
考作物蒸发蒸腾量  $ET_0$  如图 1 所示。由图 1 可知,  $ET_0$   
在棉花的生育期内表现为两头低中间高的特征来: 4 月  
份  $ET_0$  在 5 mm 以下, 后随着日照时数、辐射强度的增  
加,  $ET_0$  也逐渐变大, 在 5~ 6 月达到稳定的峰值 7  
mm, 8 月以后, 太阳辐射强度降低, 气温回落,  $ET_0$  逐渐  
变小仅为 3 mm 左右。在 6~ 8 月期间出现了一些较小  
值, 是受当时天气变阴或降雨的影响。FAO Penman—  
Monteith 方程包括两部分, 即辐射项和空气动力学项,  
分别代表太阳辐射和蒸发表面上方大气的对流、紊流和  
干燥程度对参考作物蒸发蒸腾量的影响。二者的比例受  
当地地理和气候的影响, 随着时间的变化呈现为一动态  
的过程, 分析表明在试验期绝大部分时间内太阳辐射项  
占蒸发蒸腾量的百分比在 60% 以上, 特别是在 6~ 8 月  
期间, 该值平均在 80% 左右。

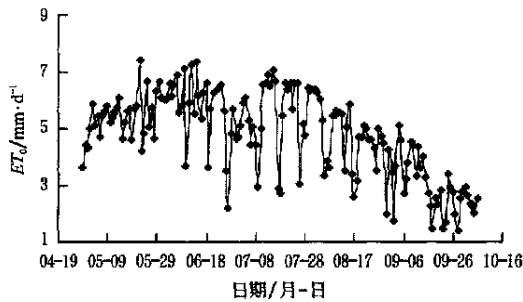


图 1 棉花生育期内  $ET_0$  计算结果  
Fig 1 The  $ET_0$  during cotton growth period

根区土壤含水率的变化反映了作物生长的水分环  
境和作物的蒸发蒸腾耗水状况, 膜下滴灌条件下土壤水  
分的蒸发损失降低到了最小的程度, 此时的土壤水分变  
化直接反映了作物的需水特征。从图 2, 3 可以看出, 当  
玉米和棉花进入拔节期和蕾期后受当时气候以及作物  
自身的生长影响, 作物蒸腾耗水持续增加, 为了维持根  
区土壤含水率的下限, 要周期性地灌溉来补充消耗掉的  
水分, 在整个灌水阶段内玉米和棉花的根区含水率下限  
基本上保持在 60% 田间持水量以上。

2.2 膜下滴灌条件下作物生长发育变化

在地膜覆盖和滴灌局部灌水的双重影响下, 使得膜  
下滴灌作物的生长发育进程有别于常规的灌水和栽培  
方式。株高和叶面积指数是表示作物生长发育状况的两

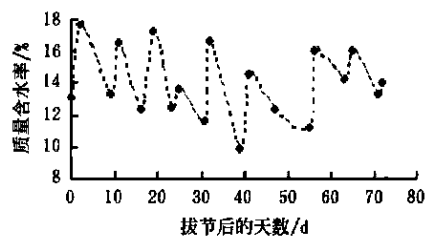


图 2 玉米 0~ 60 cm 根层土壤水分变化  
Fig 2 Soil water content of maize in 0~ 60 cm depth

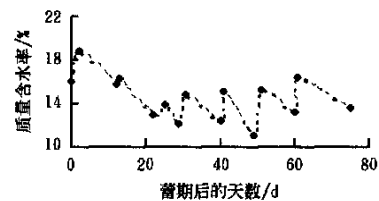


图 3 棉花 0~ 60 cm 根层土壤水分变化  
Fig 3 Soil water content of cotton in 0~ 60 cm depth

个常用指标, 掌握膜下滴灌条件下作物的株高和叶面积  
指数在生育期内的动态过程, 对于了解膜下滴灌效应有着  
重要的意义。从表 1 可以看出, 膜下滴灌条件下棉花  
的株高和叶面积指数的发展过程比较一致, 在苗期受当  
地低温的影响, 棉花的发育缓慢, 此时的株高和叶面积  
指数都较低。进入蕾期后随着气温的增高, 棉花的生长  
进入飞速发展阶段, 株高在该阶段增加了 30 cm, 叶面  
积指数由 0.85 增加到 2.15。蕾期后棉花的生长由营养  
转向生殖生长, 此时的株高和叶面积保持在一稳定的水  
平上。在生长末期由于老叶子的脱落, 叶面积指数有一  
定程度的下降。膜下滴灌玉米的生长发育过程与棉花相  
似, 表现为在苗期植株生长缓慢, 株高和叶面积指数较  
低, 进入拔节期后植株生长迅速, 株高和叶面积指数接  
近峰值, 拔节期后植株转向生殖生长阶段, 株高和叶面  
积指数维持在较高水平。在生长后期由于部分老叶脱  
落, 导致膜下滴灌棉花和玉米的叶面积指数下降。

表 1 棉花的株高和叶面积指数

Table 1 Plant height and $LA I$ of cotton							
生长指标	出苗后天数/d						
	20	40	50	55	65	80	100
株高/cm	8.7	18.9	30.5	38.97	59.6	60.4	57.4
$LA I$	0.12	0.32	0.85	1.74	2.15	1.93	1.84

滴灌频繁地施加少量的水湿润作物的根部, 能够较  
精确地在时间和空间上调控土壤水分, 使作物的水分条  
件始终处在最优的状态下, 而避免了其它灌水方式产生  
的周期性水分过多和水分亏缺情况的发生, 并能有效地  
减少深层渗漏。地膜覆盖一方面具有保墒增温效应, 另  
外又有提墒的作用促使土壤水分在表层分布。膜下滴灌  
作物根系层的上部处于较好的水热条件下, 从而进一步  
促进了该处作物根系的生长, 收获后对玉米的根密度观  
测结果(图 4)证明了这一点。从图 4 可以看出, 膜下滴

灌玉米的根系主要集中于 20~ 50 cm 的深度, 50 cm 深度以下根密度明显降低。膜下滴灌棉花的根密度变化情况和玉米相似, 表现为主要集中于 20~ 50 cm 的深度。

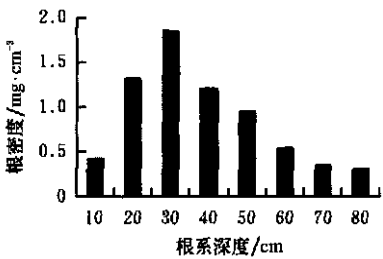


图 4 玉米根密度分布图  
Fig 4 Root density distribution of maize

2 3 膜下滴灌充分供水处理棉花和玉米蒸发蒸腾规律  
据实测的土壤水分含量、灌水量及降雨资料, 采用水量平衡方程计算出膜下滴灌充分供水处理棉花、玉米在不同生育阶段的作物需水量、耗水强度、作物系数和阶段耗水模数(表 2、3)。

表 2 充分供水处理棉花的蒸发蒸腾规律

Table 2 Water requirement rule of cotton with sufficient water supply						
生育阶段 (始末日期)	苗期 05-05~ 06-15	蕾期 06-16~ 07-13	花铃前期 07-14~ 08-07	花铃后期 08-08~ 09-04	吐絮期 09-05~ 10-10	全生育期 05-05~ 10-10
蒸发蒸腾量/mm	63.20	59.40	91.00	65.67	38.50	317.77
生长天数/d	42	27	25	28	36	158
耗水强度/mm·d <sup>-1</sup>	1.50	2.20	3.64	2.35	1.07	2.01(平均)
ET <sub>0</sub> /mm	247.78	137.51	136.7	122.20	86.40	730.59
K <sub>c</sub>	0.26	0.43	0.67	0.54	0.45	0.43(平均)
阶段耗水模数/%	19.89	18.70	28.64	20.67	12.10	100.00

表 3 充分供水处理玉米的蒸发蒸腾规律

Table 3 Water requirement rule of corn with sufficient water supply						
生育阶段 (始末日期)	苗期 05-05~ 06-15	拔节期 06-06~ 07-02	抽雄吐丝期 07-03~ 07-27	灌浆期 07-28~ 08-20	乳熟期 08-21~ 09-10	全生育期 05-05~ 09-10
蒸发蒸腾量/mm	68.69	138.25	152.68	107.40	40.00	507.02
生长天数/d	31	27	25	24	21	128
耗水强度/mm·d <sup>-1</sup>	2.22	5.12	6.11	4.48	1.90	3.96(平均)
ET <sub>0</sub> /mm	175.64	156.29	138.11	119.38	80.03	669.45
K <sub>c</sub>	0.39	0.88	1.11	0.90	0.50	0.75(平均)
阶段耗水模数/%	13.54	27.27	30.11	21.18	7.90	100.00

由表 2 可知, 在当地地理、气候和栽培条件下, 整个生育期内膜下滴灌棉花的蒸发蒸腾量为 317.77 mm, 平均耗水强度为 2.01 mm/d。棉花的需水规律亦表现为两头小中间大的特征, 苗期和吐絮期的需水强度最小, 蕾期和花铃后期的需水强度居中, 花铃前期的需水强度和阶段耗水模数最高, 其中花铃期为需水高峰期,

该阶段蒸发蒸腾量占总需水量的 49.31%。在苗期棉花植株幼小, 叶面积指数很小, 耗水强度较低, 平均耗水为 1.50 mm/d; 现蕾以后, 棉株逐渐长大, 根系大量生长, 叶面蒸腾不断增加, 蕾期的耗水量日益增大, 耗水强度达 2.20 mm/d, 阶段耗水模数为 18.70%; 进入花铃前期后, 棉株的营养生长和生殖生长都很旺盛, 叶面积指数在该时期达到峰值, 均耗水强度为 3.64 mm/d, 阶段耗水模数为 28.64%; 在花铃后期, 气温逐渐降低, 部分老化的叶片开始脱落, 蒸腾耗水强度相应降低, 耗水强度为 2.35 mm/d, 阶段耗水模数为 20.67%; 在吐絮期, 伴随棉花器官的衰老叶片大量脱落, 需水强度降为整个生育期内的最低点, 耗水强度为 1.07 mm/d, 阶段耗水模数为 12.10%。

由表 3 可以知道, 在整个生育期内膜下滴灌玉米的蒸发蒸腾量为 507.02 mm, 平均耗水强度为 3.96 mm/d。膜下滴灌玉米苗期和乳熟期的需水强度最小, 拔节期和灌浆期的需水强度居中, 抽雄吐丝期的需水强度和阶段耗水模数最高。在苗期玉米植株幼小, 耗水强度较低, 平均耗水为 2.22 mm/d, 阶段耗水模数为 13.54%; 进入拔节期以后, 玉米植株逐渐长大, 拔节期的耗水量日益增大, 耗水强度达 5.12 mm/d, 阶段耗水模数为 27.27%; 进入抽雄吐丝期后, 玉米的营养生长和生殖生长都很旺盛, 蒸腾耗水量极为强烈, 均耗水强度为 6.11 mm/d, 阶段耗水模数为 30.11%; 在灌浆期, 部分老化的叶片开始脱落, 蒸腾耗水强度相应降低, 耗水强度为 4.48 mm/d, 阶段耗水模数为 21.18%; 在乳熟期, 气温和太阳辐射强度显著下降, 伴随玉米器官的衰老叶片大量脱落, 蒸腾耗水日益减少, 需水强度降为整个生育期内的最低点, 耗水强度为 1.90 mm/d, 阶段耗水模数为 7.90%。

2 4 膜下滴灌条件下作物系数的分布规律

目前, 国际上较通用的作物需水量计算方法是: 首先计算参考作物蒸发蒸腾量 ET<sub>0</sub>, 然后再用作物系数 K<sub>c</sub> 修正得到作物某阶段的实际需水量。可见作物系数对于灌溉水管理决策有着极为重要的作用, 而得到特定地理、气候条件下各主要农作物的作物系数分布规律, 已成为有关灌溉研究人员的重要任务。在地膜覆盖和滴灌的综合效应下, 膜下滴灌作物生长与常规条件不同, 因此影响作物需水量的一些基本条件都发生了变化, 对于膜下滴灌作物的作物系数在各生育阶段的分布规律还需要作进一步研究。由表 2 可知, 膜下滴灌棉花的作物系数在生育期内, 苗期有一个最小值 0.26, 到蕾期后上升到 0.43, 花铃前期达到整个生育期的峰值 0.67, 在花铃后期作物系数又开始回落到 0.54, 吐絮期降为 0.45。膜下滴灌棉花的作物系数和出苗后的天数存在二次曲线关系, 二者的相关系数为 0.9175。由表 3 可知, 膜下滴灌玉米的作物系数在苗期有一个最小值 0.39, 到拔节期后上升到 0.88, 抽雄吐丝期达到整个生育期的峰值 1.11, 在灌浆期作物系数又开始回落到 0.90, 乳熟期进一步下降为 0.50。膜下滴灌棉花作物系数和出苗

后的天数存在显著的二次曲线关系(图 5)。

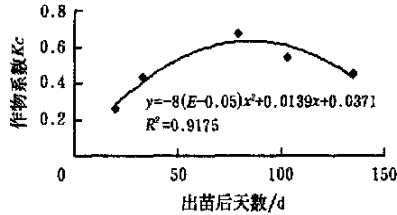


图 5 棉花作物系数和出苗后天数的关系

Fig 5 Relationship of cotton  $K_c$  and day after seedling

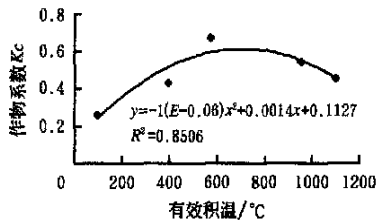


图 6 棉花作物系数和有效积温的关系

Fig 6 Relationship of cotton  $K_c$  and effective accumulate temperature

作物系数  $K_c$  反映了作物类型、生长阶段对蒸发蒸腾量的影响,在生育期内存在一个动态的变化过程。为了方便地获得,一般建立了  $K_c$  与时间(比如播种后的天数)或叶面积指数的经验关系。有关的试验研究表明,在常规播种时间和外部气候条件下,基于时间的  $K_c$  能够很好地反映作物的需水过程。然而,在非常规条件下(如播种期提前或推后,出现异常天气情况等),需要对  $K_c$  进行周期性的调整。为了解决上述问题,又提出了基于有效积温的作物系数新方法,该方法建立起  $K_c$  与有效积温的回归关系式,通过对有效积温的观测计算,间接地估算出对应时期的  $K_c$ 。大量研究表明,基于有效积温的  $K_c$ ,能够自动地对因异常天气引起的作物需水规律的改变进行调整,并且能够在具有不同气候条件的地区通用。对本次试验数据分析表明(图 6),膜下滴灌棉花的  $K_c$  与有效积温之间存在较显著的二次曲线关系,可利用该关系式,根据资料估算作物系数,对灌溉水的管理决策提供帮助。

### 3 结 论

1) 膜下滴灌作物根系层处于较好的水热条件下,从而进一步促进了作物根系的生长,膜下滴灌棉花和玉米的根系主要集中于 20~50 cm 的深度,50 cm 深度以下根密度明显降低。

2) 在整个生育期内膜下滴灌棉花的蒸发蒸腾量为 317.77 mm,平均日耗水强度为 2.01 mm。苗期和吐絮期的需水强度最小,蕾期和花铃后期的需水强度居中,花铃前期的需水强度和阶段耗水模数最高,其中花铃期为需水高峰期。

3) 在整个生育期内膜下滴灌玉米的蒸发蒸腾量为 507.02 mm,平均日耗水强度为 3.96 mm。苗期和乳熟期的需水强度最小,拔节期和灌浆期的需水强度居中,抽雄吐丝期的需水强度和阶段耗水模数最高。

4) 膜下滴灌条件下作物系数和出苗后的天数、有效积温之间存在显著的二次曲线关系。

#### [参 考 文 献]

- [1] 蔡焕杰,邵光成,张振华. 棉花膜下滴灌毛管布置方式的研究[J]. 农业工程学报, 2001, 18(1): 45-48
- [2] Ayars J E, Phene C J, Hutmacher R B, et al. Subsurface drip irrigation of row crops: a review of 15 years of research at the water management research laboratory[J]. Agricultural Water Management, 1999, 42(1): 1-27.
- [3] Tiwari K N, Mal P K, Singh R M, et al. Response of okra to drip irrigation under mulch and non-mulch conditions[J]. Agricultural Water Management, 1998, 38(2): 91-102
- [4] 张振华,蔡焕杰. 覆膜棉花调亏灌溉效应试验研究[J]. 西北农林科技大学学报, 2001, 29(6): 9-12
- [5] 张振华,蔡焕杰,柴红敏. 水分亏缺对覆膜玉米生长发育及产量的影响[J]. 灌溉排水, 2001, 20(2): 13-16
- [6] 刘 钰. 参照蒸腾量的新定义及计算方法对比[J]. 水利学报, 1997, (6): 27-33
- [7] 蔡焕杰,邵光成,张振华. 不同水分处理对膜下滴灌棉花生理指标及产量的影响[J]. 西北农林科技大学学报, 2002, 30(4): 29-32
- [8] 西北农业大学农业水土工程研究所主编. 西北地区农业节水与水资源持续利用[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999

## Water requirements and crop coefficients of drip-irrigated crop under mulch in Minqin County Oasis

Zhang Zhenhua<sup>1</sup>, Cai Huanjie<sup>2</sup>, Yang Runya<sup>1</sup>, Zhao Yong<sup>2</sup>

(1. The Geography and Resource Management College of Yan-Tai Normal University, Yantai 264025, China;

2. The Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering, Northwest Science and Technical University of Agriculture and Forestry, Yangling 712100, China)

**Abstract** Experiments were conducted to measure water consumption of drip-irrigated cotton and corn under mulch at Xiao Ba Kou Irrigation Experimental Station of Minqin County in 2001. Based on the measured crop water consumption under the condition of sufficient water supply, the water requirements of crop and crop coefficients in the field with drip-irrigation under mulch were investigated. Monthly crop coefficients of drip-irrigated cotton and corn under mulch by FAO Penman-Monteith ET estimation method were determined. The results of this study provide crop coefficients for irrigation scheduling of drip-irrigated cotton and corn under mulch in arid regions.

**Key words:** drip-irrigated under mulch; cotton; corn; water requirements; crop coefficients