

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.09.011

基于蒸发量的膜下滴灌棉花灌溉预警装置设计与试验*

张寄阳¹ 段爱旺¹ 申孝军¹ 杨贵森² 宋建峰² 刘小飞¹

(1. 中国农业科学院农田灌溉研究所农业部作物需水与调控重点开放实验室, 新乡 453003;

2. 新疆生产建设兵团灌溉中心试验站, 乌鲁木齐 830002)

【摘要】 设计了一种基于蒸发量的简易灌溉预警装置,并建立了基于水量平衡原理的灌溉预警模型。通过田间试验,确定了适宜供水条件下新疆膜下滴灌棉花各生育阶段的蒸发皿—作物系数,并建立了适宜的灌溉预警指标,提出了降雨条件下的指标修正方法。田间应用表明,在北疆棉花膜下滴灌条件下,苗期、蕾期、花铃期和吐絮期分别以累计蒸发量达到 140、75、50 和 120 mm 来控制灌水时间,以 0.15、0.4、0.7 和 0.25 倍的累计蒸发量作为灌水进行灌溉管理,可达到节水、高产的目的。

关键词: 棉花 灌溉预警 蒸发 膜下滴灌

中图分类号: S275.6; S562 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)09-0056-04

Design and Experiment of Scheduling Irrigation Device Based on Pan Evaporation for Drip-irrigated Cotton under Plastic Mulch

Zhang Jiyang¹ Duan Aiwang¹ Shen Xiaojun¹ Yang Guisen² Song Jianfeng² Liu Xiaofei¹

(1. Key Lab for Crop Water Requirement and Regulation, Ministry of Agriculture, Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang 453003, China

2. Central Irrigation Station of the Xinjiang Production and Construction Corps, Urumqi 830002, China)

Abstract

A simple visual device for scheduling irrigation based on pan evaporation for drip-irrigated cotton under plastic mulch was designed, and an irrigation scheduling model based on field water budget was established. The most suitable plant-pan coefficient for drip-irrigated cotton under plastic mulch and the indicators to schedule irrigation were determined in field conditions, while a revision method for the indicators was proposed under rainfall conditions. The field test proved that it was an effective way to program drip-irrigated cotton irrigation, once marked, there was no need for human intervention beyond checking the position of the water level in relation to the irrigation control marks. The suitable irrigation intervals based on pan evaporation at 140, 75, 50 and 120 mm and irrigation water amount of 0.15, 0.4, 0.7 and 0.25 times of accumulated pan evaporation for seedling stage, bud stage, flowering and bolling stage, and boll opening stage, respectively, could be recommended for drip-irrigation cotton under plastic mulch in the north of Xinjiang area, China.

Key words Cotton, Irrigation scheduling, Pan evaporation, Drip irrigation under plastic mulch

引言

根据蒸发皿蒸发量与作物蒸发蒸腾量之间的关系指导灌溉在国内外均进行了大量研究^[1-2],国外

使用 A 级蒸发皿指导灌溉较为普遍,但由于 A 级蒸发皿价格相对较高,而且有特定的安装要求,目前仅在少数发达国家有一定应用,在发展中国家难以大面积推广。国内这方面研究起步较晚,近年来,在利

收稿日期: 2010-02-02 修回日期: 2010-05-27

* 国家“863”高技术研究发展计划资助项目(2006AA100209-08、2006AA100203-01)、国家“973”重点基础研究发展计划资助项目(2006CB403406)和国家棉花产业技术体系建设专项

作者简介: 张寄阳, 副研究员, 主要从事作物高效用水技术研究, E-mail: firizjy@yahoo.com.cn

用 20 cm 标准蒸发皿估算农田蒸发量及指导温室作物灌溉方面作了一定的工作^[3-4]。如 Yuan B Z 等^[5]在研究马铃薯耗水规律时发现,马铃薯耗水量累计值与放置在冠层顶部 20 cm 标准蒸发皿测得的蒸发量累计值的变化趋势一致,有很好的比例关系,表明用 20 cm 标准蒸发皿的蒸发量指导作物灌溉是可行的。但实际应用中为了保持蒸发皿内稳定的水位,需要经常加水,操作过程比较繁琐,故推广难度较大。本文研究一种简单实用、可操作性强、面向基层用户的便携式灌溉预警装置及相应的预警方法,以指导新疆膜下滴灌棉花的灌溉管理。

1 基于蒸发量进行灌溉预警的理论基础

作物实际耗水量的估算是进行灌溉预警的基础,作物耗水量为

$$E_T = E_{T0} K_c \quad (1)$$

式中 E_T ——作物耗水量 K_c ——作物系数

E_{T0} ——参考作物需水量

蒸发皿的蒸发量作为反映蒸发潜力的一个综合指标,与参考作物需水量关系密切,反映了气象因素的综合影响。二者之间的关系为

$$E_{T0} = E_p K_p \quad (2)$$

式中 E_p ——蒸发皿蒸发量

K_p ——蒸发皿系数

将式(2)代入式(1)可得

$$E_T = E_p K_c K_p = E_p K_{cp} \quad (3)$$

式中 K_{cp} ——蒸发皿-作物系数,可通过试验确定

因此,根据作物耗水量与蒸发皿蒸发量之间的相关关系,就可以利用蒸发皿的水面蒸发模拟农田土壤水分消耗来进行灌溉预警。如图 1 所示,把农田看作一个与蒸发皿类似的大的蒸发容器,在大气蒸发力的作用下,蒸发皿水位逐渐下降,农田土壤储水通过土壤表面蒸发和作物蒸腾也逐步消耗减少,当蒸发皿累计蒸发量达到设定的允许蒸发量时,说明土壤储水量达到灌溉控制下限,就需要启动灌溉系统实施灌溉。

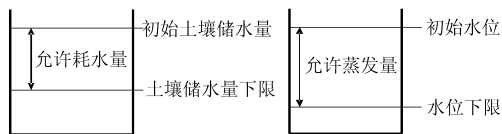


图 1 作物耗水与蒸发皿蒸发关系示意图

Fig. 1 Schematic diagram of relation between crop evapotranspiration and pan evaporation

2 基于蒸发量的灌溉预警装置设计

灌溉预警装置由蒸发皿、补水装置、读数装置和

灌溉指示标志组成(图 2)。蒸发皿采用 PVC 材料,内径 20 cm,顶部设有网罩,侧壁设有溢流孔。补水装置也采用 PVC 材料,高 40 cm,内径 20 cm。补水装置和蒸发皿之间用一根带阀门的 PVC 短管连通,当蒸发生时,蒸发皿中蒸发损失的水量由补水装置随时补充,补充的水量即等于蒸发量。补水装置应用马氏瓶原理,通过一支两端开口的玻璃管与大气相通,使蒸发皿水位始终保持与玻璃管下端开口处等高。补水装置侧壁的读数装置由一根透明连通管和一根刻度尺组成,用于读取补水装置的水位。透明连通管上有灌溉指示标志,当补水装置的水位从“初始标志”下降到“灌溉标志”就说明作物需要灌溉。

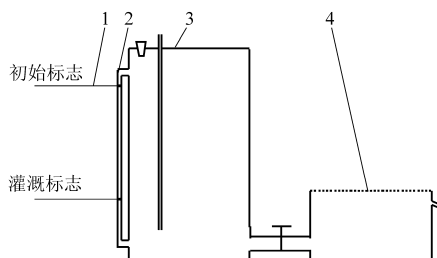


图 2 灌溉预警装置示意图

Fig. 2 Schematic structure of irrigation scheduling device

1. 灌溉指示标志 2. 读数装置 3. 补水装置 4. 蒸发皿

3 灌溉预警模型

根据水量平衡原理,在一个时段 t 内,作物根系活动层内土壤储水量的变化值应等于所有的来水量与去水量之差,即

$$\Delta S = \sum_{n=1}^t (P_e + I + G_w) - \sum_{n=1}^t (E_T + D_p + R_o) \quad (4)$$

式中 ΔS ——土壤储水变化量,mm

P_e ——有效降水量,mm

I ——灌水量,mm

G_w ——地下水补给量,mm

D_p ——渗漏量,mm

R_o ——地面径流量,mm

假定在一次大的降雨或灌溉之后灌溉预警装置开始应用,此时的田间土壤含水率达到上限值,对应的土壤储水量为最大土壤储水量,当土壤储水量下降到土壤含水率下限值对应的储水量时就需要灌溉。土壤含水率从上限值下降到下限值所消耗的水量为允许土壤水分消耗量,用 R_{AW} (readily available water) 表示。若忽略地下水补给量、深层渗漏量和径流量的影响,式(4)可简化为

$$\sum_{n=1}^t (P_e - E_T) + R_{AW} = 0 \quad (5)$$

则在 t 时段内的作物累计蒸发蒸腾量为

$$E_T = P_e + R_{AW} \quad (6)$$

$$E_p = R_{AW}/K_{cp} + P_e/K_{cp} \quad (7)$$

式(7)中有效降水量 P_e 为动态参数,其他均为静态参数,因此,在实际应用中首先假定预报时段内没有降水发生,设定允许蒸发量值为允许土壤水分消耗量(R_{AW})与蒸发皿-作物系数(K_{cp})的比值

$$E_{p0} = R_{AW}/K_{cp} \quad (8)$$

根据式(8),当测定的蒸发皿累计蒸发量达到允许蒸发量 E_{p0} 时就需要灌溉,灌水量即为允许土壤水分消耗量 R_{AW} 。如果有降水发生,则根据降水量对允许蒸发量 E_{p0} 进行修正。

4 新疆棉花膜下滴灌条件下的田间试验

于2008~2009年在新疆生产建设兵团农十二师五一农场进行了2个棉花生长季的田间试验。2008年进行了灌溉控制指标试验,通过设计不同水分处理,在对不同水分处理的灌水量、耗水量、产量以及水分利用效率进行综合分析基础上确定适宜供水条件下棉各生长阶段的耗水量,进而确定棉花不同生长阶段的蒸发皿-作物系数;2009年主要对灌溉预警指标进行试验验证。试验区土壤质地为砂壤土,0~100 cm 土层平均干容密度 1.46 g/cm^3 ,田间持水率为21.0%(占土壤干重的百分数),棉花种植模式采用“一膜一管四行”。灌溉预警装置布置在棉花冠层上方^[6]。

4.1 蒸发皿-作物系数

在适宜供水条件下,棉花全生育期耗水量与蒸发皿累计蒸发量的关系如图3所示,回归分析结果表明,耗水量与累计蒸发量之间具有很好的相关关系,相关系数 R^2 达到0.9869。

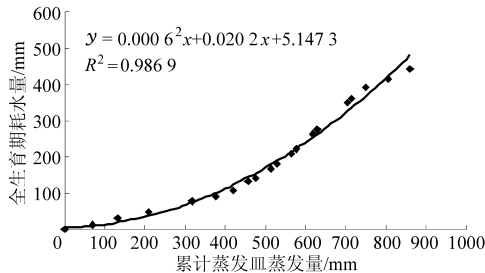


图3 棉花全生育期耗水量与蒸发皿累计蒸发量的关系
Fig.3 Relationship between accumulated evapotranspiration and pan evaporation for the whole growth season

蒸发皿-作物系数为时段内耗水量与蒸发皿累计蒸发量的比值。图4给出了适宜供水条件下 K_{cp} 在生育期内的变化趋势。苗期棉花植株尚未完全发育,叶面积较小,耗水强度较低;而此期由于地面覆盖度较小,水面蒸发强度相对较大,因而 K_{cp} 值比较

小,为0.15左右。进入蕾期后,棉花耗水强度逐步增大, K_{cp} 值有所上升,达到0.4左右。从花铃期开始,棉花植株生长进入旺期,耗水强度迅速增大,此时尽管气温较高,但由于棉田基本封垄,蒸发速率反而有所下降, K_{cp} 值达到0.7左右。到8月下旬以后,棉花开始进入吐絮期,随着耗水强度的逐步减小, K_{cp} 值迅速减小到0.25左右。

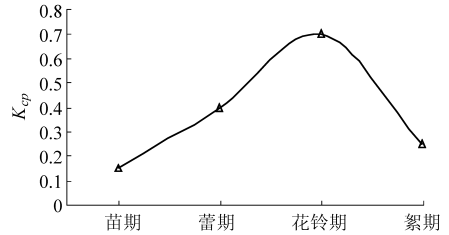


图4 棉花不同生长阶段的 K_{cp} 值

Fig.4 K_{cp} in different growth stages of cotton

4.2 允许土壤水分消耗量

为了满足农作物正常生长需要,任一时段内作物根系吸水层内的储水量必须保持在一定的适宜范围内,即通常要求土壤湿润层平均土壤含水率不小于作物的最低含水率 θ_{min} 和不大于作物允许的最高含水率 θ_{max} 。土壤含水率从 θ_{max} 下降到 θ_{min} 时消耗的水量即为允许土壤水分消耗量 R_{AW} 为

$$R_{AW} = 10\lambda H(\theta_{max} - \theta_{min}) \quad (9)$$

式中 λ ——土壤干容密度, g/cm^3

H ——计划湿润层深度, m

由于膜下滴灌属于浅层灌溉,通过对大量土壤水分监测结果分析发现,棉花膜下滴灌合理灌溉制度下,土壤湿润深度基本在60 cm以内,因此,膜下滴灌棉花最大计划湿润层深度不宜超过60 cm。适宜的土壤含水率范围有利于保证棉花较高的产量和水分利用效率,李明思等研究表明^[7],膜下滴灌棉花各生育阶段的适宜土壤含水率范围以田间持水率的60%~80%为宜;通过多年的试验发现,计划湿润层内土壤水分上限控制在85%~90%,下限控制在55%~70%较为适宜。据此,确定膜下滴灌棉花各生育阶段的适宜土壤含水率范围和湿润层深度见表1。利用式(9)就可以计算出棉花各生育阶段的允许土壤水分消耗量 R_{AW} :苗期21 mm,蕾期30 mm,花铃期36 mm,吐絮期30 mm。

4.3 膜下滴灌棉花灌溉预警指标的确定

通过上述分析,利用式(8)就可以确定膜下滴灌棉花不同生长阶段的适宜灌溉预警指标,见表2。在不考虑降雨的条件下,当累计蒸发量在苗期、蕾期、花铃期和吐絮期分别达到140 mm、75 mm、50 mm和120 mm时就需要灌溉,将累计蒸发量与蒸发皿-作物系数 K_{cp} 相乘即可计算出灌水量。

表1 计算允许土壤水分消耗量的基本参数

Tab.1 Parameters for calculating readily available

soil water

参数	苗期	蕾期	花铃期	絮期
土壤相对含水率下限/%	55	65	70	60
土壤相对含水率上限/%	90	90	90	85
计划湿润层深度/m	0.2	0.4	0.6	0.4

表2 膜下滴灌棉花灌溉预警指标

Tab.2 Indicators of scheduling irrigation for

drip-irrigated cotton under plastic mulch

参数	苗期	蕾期	花铃期	絮期
K_{cp}	0.15	0.4	0.7	0.25
灌水时间(以允许蒸发量计)/mm	140	75	50	120
灌水量/mm	21	30	35	30

4.4 对降水的考虑

降水贮存在作物根区后可以有效地用于作物蒸散过程,从而减少作物的灌溉需水量。因此,在制定实时灌溉计划时,总耗水量中由降水供给的部分必须加以考虑。在膜下滴灌条件下,由于下垫面状况发生变化,降水过程中除了植株冠层截留和未覆膜裸地表面承接部分降水,大部分最终落在地膜上。对于落在地膜上的降水,一部分保留在地膜表面并最终被蒸发掉;一部分沿地膜边缘流入地膜之间的裸地,该部分降水与直接落在裸地上的降水一起经入渗和土壤水再分配后,只有能保持在作物根区的水分可视为有效,在新疆干旱区由于一次降雨强度较小,该部分降水一般难以侧渗到作物根区,因而利用率不高;另一部分通过膜孔渗入土壤后贮存在作物根区,可以被视为全部有效。通过对降水前后的土壤水分进行实时监测,利用土壤水平衡法对有效降水进行实时估算,确定棉花膜下滴灌条件下降水有效利用率为0.35~0.40左右。

另外,降雨时,蒸发皿承接了部分降水,因而实际的蒸发量应为从补水装置测得的蒸发量与蒸发皿承接的降水量之和。由于蒸发皿顶部设有网罩,阻隔了部分降水,蒸发皿承接的降水一般要小于实际降水量,通过实测发现由于网罩阻隔作用损失的降

雨量在20%左右,也就是说有80%的雨量最终落在蒸发皿内,用于补充蒸发损失。

由于新疆试验区干旱少雨,而且一次降水强度也较小,一般不大于15 mm。因而,遇到有降雨发生时,可以用式(7)对允许蒸发量值进行修正,修正后的变化量应该为

$$\Delta E_p = 0.4P/K_{cp} - 0.8P \quad (10)$$

式中 P ——降雨量

在应用中,首先设定不考虑降雨时的允许蒸发量值,如果有降雨发生,则按式(10)对设定的允许蒸发量值进行修正。例如某次降雨量为15 mm,那么在不同生育阶段 ΔE_p 值分别为:苗期28.0 mm,蕾期3.0 mm,花铃期-3.4 mm,吐絮期12 mm。这一结果表明在蕾期和花铃期降雨对灌溉预警过程影响较小,在苗期和吐絮期的影响相对要大,如苗期增加28 mm的蒸发量大概需要推迟3~4 d灌溉。由于灌溉预警装置主要面向农户,为了操作上的方便,在实际的灌溉预警过程中在蕾期和花铃期可以不考虑降雨的影响,在苗期和吐絮期根据降雨情况适当延后灌水日期。

4.5 试验验证

2009年对提出的方法进行了大田试验验证,试验共设3种灌水模式,分别为:①根据当地种植户的经验进行灌溉。②根据土壤水分指标结合水量平衡计算来确定灌水时间和灌水量^[8]。③根据本文提出的灌溉预警指标进行灌溉(表2)。通过对不同灌水模式的灌水次数、灌水量、耗水量、产量以及水分利用效率进行比较分析发现,用本文提出的方法指导灌溉,全生育期共灌水7次,与当地的经验模式和根据土壤水分进行灌溉控制的模式相比灌水次数分别减少2次和1次,灌溉定额分别减少116 mm和35 mm;产量提高了421.5 kg/hm²和242.3 kg/hm²,水分利用效率提高了0.27 kg/m³和0.11 kg/m³(表3)。由此说明,按此法指导膜下滴灌棉花灌水,可起到节水、增产作用。

5 结束语

由于蒸发量主要受气象因素综合影响,基于蒸

表3 3种灌水模式的灌水量、耗水量、产量及水分利用效率

Tab.3 Irrigation water, water consumption, yield and WUE for three irrigation scheduling methods

灌水模式	有效降水量/ mm	灌水次数	灌水量/mm	耗水量/mm	产量/kg·hm ⁻²	水分利用效率 /kg·m ⁻³
根据当地经验	150.1	9	337	537.8	4 494.0	0.84
根据土壤水分	150.1	8	256	468.8	4 673.2	1.00
根据蒸发皿蒸发量	150.1	7	221	441.6	4 915.5	1.11

- 5 Schuster G, Loffler G, Weig K, et al. Biomass steam gasification—an extensive parametric modeling study[J]. *Bioresource Technology*, 2001, 77(1): 71 ~ 79.
- 6 Melgar A, Pérez J F, Laget H, et al. Thermochemical equilibrium modelling of a gasifying process[J]. *Energy Conversion and Management*, 2007, 48(1): 59 ~ 67.
- 7 蒋绍坚,赵颖,林竹,等. 高温空气气化数学模型的建立与分析[J]. *太阳能学报*, 2006, 27(10): 1 058 ~ 1 062.
- 8 Li X T, Grace J R, Watkinson A P, et al. Equilibrium modeling of gasification: a free energy minimization approach and its application to a circulating fluidized coal gasifier[J]. *Fuel*, 2001, 80(2): 195 ~ 207.
- 9 Jarunthammachote S, Dutta A. Thermodynamic equilibrium model and second law analysis of a downdraft waste gasifier[J]. *Energy*, 2007, 32(9): 1 660 ~ 1 669.
- 10 廖强,朱跃钊,廖传华,等. 高温空气气化生物质的平衡模型研究[J]. *农机化研究*, 2009, 31(1): 174 ~ 177.
- 11 宋世谟,庄公惠,王正烈. 物理化学:上册[M]. 3版. 北京:高等教育出版社, 2000: 395 ~ 400.
- 12 王中贤,张红,陈兴元,等. 热管式生物质气化炉的模拟[J]. *化工学报*, 2008, 59(2): 316 ~ 321.
- 13 Zainal Z A, Ali R, Lean C H, et al. Prediction of performance of a downdraft gasifier using equilibrium modeling for different biomass materials[J]. *Energy Conversion and Management*, 2001, 42(12): 1 499 ~ 1 515.
- 14 Sheth P N, Babu B V. Experimental studies on producer gas generation from wood waste in a downdraft biomass gasifier[J]. *Bioresource Technology*, 2009, 100(12): 3 127 ~ 3 133.
- 15 Dogru M, Howarth C R, Akay G, et al. Gasification of hazelnut shells in a downdraft gasifier[J]. *Energy*, 2002, 27(5): 415 ~ 427.
- 16 Sharma A K. Equilibrium modeling of global reduction reactions for a downdraft (biomass) gasifier[J]. *Energy Conversion and Management*, 2008, 49(4): 832 ~ 842.
- 17 Senelwa K. The air gasification of woody biomass from short rotation forests[D]. Palmerston North: Massey University, 1997.

(上接第 59 页)

发量的灌溉预警装置无论是在小尺度田块还是较大区域农田均可使用,既适合农户,也适合基层水管机构指导区域农田灌溉管理。灌溉预警装置采用自动补水设计,使用过程中不需要人工加水,省时省力,

操作简便,而且能根据降雨情况随时调整灌溉预警指标,是一种动态的灌溉预警,因而比较符合实际,实用价值较高。田间试验证明,本文提出的装置及方法对提高当地膜下滴灌棉花的灌溉管理水平,促进节水、增产具有显著效果。

参 考 文 献

- 1 Cripps J E L, George P R, Oakley A E. Scheduling irrigation of cabbages using pan evaporation [J]. *Irrigation Science*, 1982, 3(3): 185 ~ 195.
- 2 Phene C J, Detar W R, Clark D A. Real-time irrigation scheduling of cotton with an automated pan evaporation system[J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 1992, 8(6): 787 ~ 793.
- 3 Liu H J, Kang Y H. Sprinkler irrigation scheduling of winter wheat in the North China Plain using a 20 cm standard pan [J]. *Irrigation Science*, 2007, 25(2): 149 ~ 159.
- 4 康跃虎. 实用型滴灌灌溉计划制定方法[J]. *节水灌溉*, 2004(3): 11 ~ 13.
Kang Yuehu. Applied method for drip irrigation scheduling[J]. *Water Saving Irrigation*, 2004(3): 11 ~ 13. (in Chinese)
- 5 Yuan B Z, Nishiyama S, Kang Y H. Effects of different irrigation regimes on the growth and yield of drip-irrigated potato[J]. *Agricultural Water Management*, 2003, 63(3): 153 ~ 167.
- 6 刘海军,黄冠华,王明强,等. 基于蒸发皿水面蒸发量制定冬小麦喷灌计划[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(1): 11 ~ 17.
Liu Haijun, Huang Guanhu, Wang Mingqiang, et al. Sprinkler irrigation scheme of winter wheat based on water surface evaporation of a 20 cm standard pan[J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(1): 11 ~ 17. (in Chinese)
- 7 李明思,郑旭荣,贾宏伟,等. 棉花膜下滴灌灌溉制度试验研究[J]. *中国农村水利水电*, 2001(11): 13 ~ 15.
Li Mingsi, Zheng Xurong, Jia Hongwei, et al. Experimental research on under-mulch drip irrigation regime for cotton[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2001(11): 13 ~ 15. (in Chinese)
- 8 胡晓棠,李明思,马富裕. 膜下滴灌棉花的土壤干旱诊断指标与灌水决策[J]. *农业工程学报*, 2002, 18(1): 49 ~ 53.
Hu Xiaotang, Li Mingsi, Ma Fuyu. Drought diagnosis indexes and drip irrigation decision making for cotton under mulch[J]. *Transactions of the CSAE*, 2002, 18(1): 49 ~ 53. (in Chinese)