

基于作物水分生产函数和胁迫指数的 棉花产量估算模式

张振华^{1,2}, 蔡焕杰¹, 杨润亚²

(1 西北农林科技大学 教育部旱区农业水土工程重点实验室, 陕西 杨凌 712100;

2 烟台师范学院 地理与资源管理学院, 山东 烟台 264025)

[摘要] 将作物水分胁迫指数(CWSI)与作物水分生产函数相结合,得到了用CWSI表示的作物水分生产函数,进而推导出基于作物水分生产函数和CWSI的作物产量估算模式。该估算模式利用了易于获取的红外遥感数据,克服了水分生产函数中作物蒸发蒸腾量准确资料难于获取的限制,并且通过CWSI和作物水分生产函数的耦合使该估产方法具有一定的物理意义。经大田膜下滴灌棉花实测资料检验表明,该模型计算值的相对误差基本保持在10%左右。

[关键词] 作物水分胁迫指数(CWSI);作物水分生产函数;棉花;产量估算模式

[中图分类号] S562.071

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2005)12-0135-04

农作物生长动态监测和较准确的产量预测,对于指导农业生产、改进管理措施和提高农田水肥的高效利用有着非常重要的意义。遥感估产方法是伴随高新技术发展起来的一种新方法,它以高时效性、动态性、经济性与实用性等优点在遥感作物估产方面得到广泛应用,并取得了良好的经济效益与社会效益^[1~4]。遥感估产通过监测农作物生育期内的光谱变化,研究农作物的反射光谱与叶面积指数、地上生物量、产量、色素含量等农学参数之间的关系,可以为作物遥感长势监测和遥感估产提供依据^[5]。利用作物冠层温度来获取有关作物-土壤-大气系统的特征参数,是农业遥感研究中的另外一个热点与前沿^[6],现已被广泛应用于作物水分状况的定量诊断、作物需水量及根区土壤墒情估算^[7~9]。CWSI (Crop Water Stress Index)是由Idso^[10]于1981年首次提出利用作物冠层温度来定量诊断作物水分状况的一个指标,CWSI理论上来自Penman-Monteith方程,能够定量表示作物实际蒸发蒸腾量(ET_a)和潜在蒸发蒸腾量(ET_p)的关系,即 $CWSI = 1 - ET_a/ET_p$ 。国内外的大量研究已建立了棉花^[11~13]、甜橙^[14]、苜蓿^[15,16]、春大麦^[17]、玉米^[6,18]等作物产量与CWSI的定量关系,但以上研究大部分是建立在以统计为基础的经验关系上,由于缺乏理论基础导

致其精度和应用范围受到了限制。针对上述问题,本研究利用CWSI代替作物水分生产函数中实际蒸发蒸腾量和相应潜在蒸发蒸腾量的比值,在已知作物最高产量和待估作物生育期内CWSI值的条件下,对作物产量进行估算。该方法利用易于获取的红外遥感数据,克服了水分生产函数中作物蒸发蒸腾量准确资料难于获取的限制,并且通过CWSI和作物水分生产函数的耦合使该估产方法具有一定的物理意义,不再仅仅依靠单纯的经验关系。

1 基本理论

Jensen模型是目前常用的水分生产函数模型,该模型以作物耗水量为变量,研究不同生育阶段不同程度水分亏缺与作物最终产量的关系,其表达式为:

$$Y_a/Y_m = \prod_{i=1}^n (ET_{ai}/ET_{mi})^{\lambda_i} \quad (1)$$

式中, Y_a 为实际蒸发蒸腾量对应的作物实际产量(kg/hm^2); Y_m 为潜在蒸发蒸腾量对应的作物潜在产量,即充分供水条件下的作物产量(kg/hm^2); n 为划分的作物生育期阶段数; i 为作物生育期阶段编号; ET_{ai} 、 ET_{mi} 分别为第*i*阶段的实际蒸发蒸腾量、

[收稿日期] 2005-03-16

[基金项目] 国家高技术研究发展计划项目(2002AA2Z4031);烟台师范学院基金资助项目(000444,043201)

[作者简介] 张振华(1971—),河北藁城人,教授,博士,主要从事区域水土资源高效利用研究。现在烟台师范学院地理与资源管理学院工作。E-mail: zhangzh71@163.com

潜在蒸发蒸腾量(mm); λ_i 为第*i*生育阶段的水分敏感指数,反映阶段缺水对产量的影响程度。

CWSI 理论上来自 Penman-Montieth 方程,能够定量描述作物实际蒸发蒸腾量(ET_a)和潜在蒸发蒸腾量(ET_p)的关系,即:

$$CWSI = 1 - ET_a/ET_p \quad (2)$$

本研究利用参数少而计算较为简易的 $Idso^{[10]}$ 作物水分胁迫指标模式计算 CWSI。 $Idso^{[10]}$ 发现,充分湿润条件下作物冠层温度 T_c 和空气温度 T_a 之差($T_c - T_a$)与水汽饱和差 VPD 之间存在线性关系,并将这一关系定义为下基线(Lower Baseline):

$$(T_c - T_a)_{LB} = a - b \cdot VPD \quad (3)$$

式中, a, b 为回归系数。随着水分胁迫的加剧, ($T_c - T_a$) 值变大且位于下基线之上,当蒸腾完全停止时, ($T_c - T_a$) 将达到一个极限值, $Idso$ 将这一极限值定义为上基线 T_u (Up Baseline)。利用 $Idso$ 作物胁迫指标定量诊断作物水分状况的关键在于确定充分供水条件下的下基线。根据实际观测结果,本研究将棉花的 CWSI 上基线 T_u 取为 5.0 °C。根据实测的 VPD 值利用(3)式可计算出 $(T_c - T_a)_{LB}$, 把 $T_c - T_a$ 、 $(T_c - T_a)_{LB}$ 及 T_u 代入下式即可计算出 CWSI。为讨论方便令 $\Delta T = (T_c - T_a)$:

$$CWSI = [\Delta T - (T_c - T_a)_{LB}] / [T_u - (T_c - T_a)_{LB}] \quad (4)$$

由(2)式得:

$$ET_a/ET_p = 1 - CWSI \quad (5)$$

将(5)式代入(1)式得:

$$Y_a/Y_m = \prod_{i=1}^n (1 - CWSI_i)^{\lambda_i} \quad (7)$$

在已知最高产量 Y_m 和各生育阶段 CWSI 值的条件下,可利用下式估算水分亏缺条件下的作物产量,即:

$$Y_a = Y_m \prod_{i=1}^n (1 - CWSI_i)^{\lambda_i} \quad (7)$$

2 材料与方法

2.1 试验站点概况

试验于 2000-05~08 在新疆石河子炮台(农 8 师 121 团)土壤改良试验站试验田内进行,试验区属于典型的内陆性荒漠气候。试验田地下水埋深 3 m 左右,土壤质地为粉砂质壤土。0~100 cm 土层平均容重 1.48 g/cm³,田间持水量为 206 g/kg。播种前测得其全盐含量为 6.3 g/kg,土壤有机质含量为

8.6 g/kg,全氮、速效氮的含量分别为 6 和 0.075 g/kg,全磷、速效磷含量分别为 16 和 0.010 5 g/kg。

2.2 种植及施肥方式

小区宽和长分别为 1.78 和 8.3 m。小区覆膜净宽 140 cm,膜两侧各留 15 cm 的裸地。每小区内种植 4 行作物,行距按 30 cm—50 cm—30 cm 的宽窄行方式布置。毛管布置方式采用 1 条毛管控制 2 行作物,毛管布置在行距为 30 cm 的两行作物中间。棉花品种为 8557,播种方式采用干播湿出。在棉花生育期内共施尿素 450 kg/hm²,高效肥 150 kg/hm²,采用随水滴肥方式分 10 次施入,每次尿素和高效肥的用量分别为 45 和 15 kg/hm²。

2.3 试验处理及观测项目

本研究设 3 个水分处理,处理 1~3 的 0~60 cm 土层含水率下限分别设为田间持水量的 70%、60% 和 50%。用取土烘干法在灌前及灌后分层测定 0~60 cm 土壤含水量。用美国产便携式红外测温仪隔天在 12:00~14:00 测定各处理作物冠层温度 (T_c) 和空气温度 (T_a)。为了消除太阳方位角及作物种植方向对观测值的影响,每个处理在 4 个不同方向与地面成 45°位置进行观测,每次取 4 个测定结果的平均值代表该处理的实际情况。空气湿度采用阿兹曼通风干湿表在地面以上 1.5 m 处测定。

3 结果与分析

3.1 膜下滴灌棉花水分生产函数以及棉花下基线的确定

考虑到在棉花吐絮期不再进行灌溉,故将棉花生育期划分为苗期、蕾期、花铃前期和花铃后期 4 个阶段。根据同期作物水分生产函数的试验结果^[19],膜下滴灌棉花的水分生产函数为:

$$Y_a/Y_m = (ET_{a1}/ET_{m1})^{0.0536} \cdot (ET_{a2}/ET_{m2})^{0.294} \cdot (ET_{a3}/ET_{m3})^{-0.0816} \cdot (ET_{a4}/ET_{m4})^{0.684} \\ \text{即 } Y_a/Y_m = (1 - CWSI_1)^{0.0536} \cdot (1 - CWSI_2)^{0.294} \cdot (1 - CWSI_3)^{-0.0816} \cdot (1 - CWSI_4)^{0.684} \quad (8)$$

以上结果表明,膜下滴灌棉花各生育阶段对水分敏感性有很大差别。在苗期作物处于营养生长初期,植株矮小,叶面积较小,水分亏缺对作物产量形成影响不大,该阶段内作物缺水敏感指数小;进入蕾期后,植株生长迅速,开始由营养生长向生殖生长过渡,而且此时气温较高,作物蒸腾强度大,要求有充足的水分供应,水分亏缺对产量的形成有一定影响,因此该阶段作物水分敏感指数也大;进入花铃前期后出现了作物水分敏感指数小于零的现象,表明此

期适度缺水有利于棉花产量的提高。花铃后期是棉花产量形成的关键时期,该阶段内作物水分敏感指数最大,表明此期的水分亏缺将对棉花产量产生不利影响。

根据膜下滴灌棉花不同生育阶段内高水处理作物的 $(T_c - T_a)$ 及水汽饱和差 VPD 实测数据,采用回归分析建立了膜下滴灌大田棉花 $CWSI$ 下基线在各生育阶段的特定表达式,其回归结果为:

苗期、蕾期

$$(T_c - T_a)_{LB} = -2.0752 \cdot VPD + 1.0661 \quad (9)$$

花铃期

$$(T_c - T_a)_{LB} = -2.4152 \cdot VPD + 2.1443 \quad (10)$$

3.2 不同水分处理对棉花估产结果的影响

不同处理土壤水分环境的差别导致作物生长发育的不同,进而影响作物的最终经济产量。在3个处理中,处理1整个生育期内水分供应充足,未受到明显的水分胁迫,无论是叶面积指数还是株高、径粗等生理指标均最大,最终的皮棉产量也最高;处理3在整个生育期内水分供应不足,生育后期曾一度受到明显的水分胁迫,无论是叶面积指数还是株高、径粗等生理指标均最小,最终的皮棉产量也最低;处理2

的水分供应介于处理1和处理3之间,较之处理1有受旱现象,但水分胁迫的程度较处理3轻缓,其最终经济产量受到水分环境的影响,也介于处理1,3之间。

$CWSI$ 是一个综合反映作物—土壤—大气系统特征的参数,其从能量平衡入手,视作物—土壤—大气系统为一个整体,把蒸腾作用、光合作用、土壤水分、大气状况、太阳辐射有机地结合起来,揭示了作物生长发育过程中一系列生理生态功能。从表1可知,3个水分处理的 $CWSI$ 在棉花生育期内表现出相似的变化规律,即均随作物的生长发育逐渐增加,表明作物受到的水分胁迫有逐渐增强的趋势,对应于同一时期,3个处理的 $CWSI$ 表现为处理1最低,处理2居中,处理3最高,与各处理的水分环境相一致。

利用(7)式对3个处理棉花的皮棉产量进行估测,其中最高产量参考作物水分生产函数的结果^[19]采用 2660 kg/hm^2 。估测结果(表3)表明,(7)式的计算值和实测值之间有一定差异,同实测值相比计算值偏高,但相对误差基本保持在10%左右,计算精度可以接受。

表1 各处理棉花 $CWSI$ 动态、产量结果及估产分析

Table 1 Dynamic of $CWSI$ and actual and estimated yield for cotton fields under 3 treatments

处理 Treatment	$CWSI$				皮棉产量/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) Lint yield		
	苗期 Seedling	蕾期 Bud	花铃前期 Flower-bell prophase	花铃后期 Flower-bell anaphase	实测值 Measure- ment	估测值 Prediction	相对误差/% Relative error
1	0.08	0.11	0.20	0.25	2356.30	2140.48	9.16
2	0.20	0.42	0.48	0.50	1523.56	1365.01	10.41
3	0.35	0.50	0.62	0.66	1190.76	1061.11	10.89

4 讨论与结论

有关作物估产的研究一直是农学研究领域的热点问题,随着“3S”技术的应用,作物估产研究达到了一个新的高度,但目前的研究基本上是建立在经验性的统计关系上,其计算精度一般较低,缺乏具有一定理论基础的计算模型。本研究将近地面作物红外遥感和作物水分生产函数相结合,建立起了有一定理论基础的作物产量估测模式,该方法一方面利用了红外遥感数据易于获取的优势,克服了传统水分生产函数中作物蒸发蒸腾量资料难获取的限制;

另一方面,通过和作物水分生产函数的耦合使其具有一定的物理意义,不再是单纯的经验关系。初步大田试验检验结果表明,本模式计算精度可靠,相对误差基本保持在10%左右。由于本研究仅为1年的试验资料,所获得的结果及估测模式的可靠性及其本身结构还有待于进一步的检验和完善。另外,应用该方法进行估产需要事先知道作物水分生产函数,获得充分供水作物的产量资料,并且要在生育期内对待估产作物进行定期 $CWSI$ 观测,因而使得本方法在实际应用中受到了一定程度的限制,更加简化的估产模式也有待于进一步研究确定。

[参考文献]

- [1] 刘良云,王记华,黄文江,等.利用新型光谱指数改善冬小麦估产精度[J].农业工程学报,2004,20(1):172-175.

- [2] Labus M P, Nielsen G A, Lawrence R L, et al. Wheat yield estimates using multi temporal *NDVI* satellite imagery[J]. *Int J Remote Sens*, 2002, 23(20): 4169—4180.
- [3] Manjunath K R, Poidar M B, Puroh N L. Large area operational wheat yield model development and validation based on spectral and meteorological data[J]. *Int J Remote Sens*, 2002, 23(15): 3023—3038.
- [4] 王人潮, 黄敬峰. 水稻遥感估产[M]. 北京: 中国农业出版社, 2001. 38—76.
- [5] 唐延林, 王纪华, 黄敬峰, 等. 利用水稻成熟期冠层高光谱数据进行估产研究[J]. *作物学报*, 2004, 30(8): 739—744.
- [6] 刘湘南, 周占鳌, 倪淑洁. *CWSI* 理论及其在玉米遥感监测与估产中的应用[J]. *东北师范大学学报(自然科学版)*, 1995, 27(3): 98—102.
- [7] 张振华, 蔡焕杰, 杨润亚. 基于 *CWSI* 和土壤水分修正系数的冬小麦田土壤含水量估算[J]. *土壤学报*, 2005, 42(3): 21—26.
- [8] 蔡焕杰, 张振华, 柴红敏. 冠层温度定量诊断覆膜作物水分状况的试验研究[J]. *灌溉排水*, 2001, 20(1): 1—4.
- [9] 张振华, 蔡焕杰, 杨润亚. 基于 *CWSI* 和实际作物耗水量的作物需水量研究[J]. *中国农村水利水电*, 2005, (3): 4—7.
- [10] Idso S B. Non-water-stressed baselines; a key to measuring and interpreting plant water stress[J]. *Agric Meteorol*, 1982, 27: 59—70.
- [11] Pinter P J. Infrared thermometry; a remote sensing technique for predicting yield in water-stressed cotton[J]. *Agric Water Manage*, 1983, 6: 385—395.
- [12] Reginato R J. Field quantification of crop water stress[J]. *Trans ASAE*, 1983, 26: 772—775.
- [13] Howell T A, Hatfield J L, Yamada H. Evaluation of cotton canopy temperature to detect crop water stress[J]. *Trans ASAE*, 1984, 27: 84—88.
- [11] Sepaskhah A R, Kashfipour S M. Relationship between leaf water potential, *CWSI*, yield and fruit quality of sweet lime under drip irrigation[J]. *Agric Water Manage*, 1994, 25: 13—22.
- [15] Idso S B, Reginato R J, Reicosky D C. Determining soil-induced plant water potential depressions in alfalfa by means of infrared thermometry[J]. *Agron J*, 1981, 73: 826—830.
- [16] Abdul-Jabbar A S, Lugg D G, Sammis T W. Relationship between crop water stress index and alfalfa and evapotranspiration[J]. *Trans ASAE*, 1985, 28: 454—461.
- [17] Tubaileh A S, Sammis J W, Lugg D G. Utilization of thermal infrared thermometry for detection of water stress in spring barley[J]. *Agric Water Manage*, 1986, 12: 75—85.
- [18] Irmak S, Doroia Z, Ruhi B. Determination of crop water stress index for irrigation timing and yield estimation of corn[J]. *Agron J*, 2000, 92: 1221—1227.
- [19] 蔡焕杰. 大田作物膜下滴灌的理论与应用[M]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学出版社, 2003. 92—93.

Cotton yield estimation model based on crop water production function and *CWSI*

ZHANG Zhen-hua^{1,2}, CAI Huan-jie¹, YANG Run-ya²

(1 The Key Laboratory of Agriculture Soil and Water Engineering, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2 The Geography and Resource Management College of Yantai Normal university, Yantai, Shandong 264025, China)

Abstract: The crop yield estimation model based on crop water production function and *CWSI* was educed by linking *CWSI* and crop water production function. The above crop yield estimation model got rid of the shortage of precision crop water requirement in crop water production function by using remote sensing data, and the model is of theoretic significance by coupling *CWSI* with crop water production function. The experiment results of field drip irrigation cotton under mulch showed the relative error of the model was about 10%.

Key words: *CWSI*; crop water production function; cotton; yield estimation model