

# 辽宁地区玉米耗水量与产量的关系

张淑杰<sup>1</sup>, 周广胜<sup>2</sup>, 张玉书<sup>1</sup>, 米娜<sup>1</sup>, 孟莹<sup>3</sup>,  
纪瑞鹏<sup>1</sup>, 蔡福<sup>1</sup>, 武晋雯<sup>1</sup>, 李广霞<sup>4</sup>

(1. 中国气象局沈阳大气环境研究所, 辽宁 沈阳 110166; 2. 中国气象科学研究院, 北京 100081;  
3. 中国气象局气象干部培训学院辽宁分院, 辽宁 沈阳 110166; 4. 辽宁省气象台, 辽宁 沈阳 110166)

**摘要:** 为探讨生长季自然降水条件下水分状况对玉米产量的影响, 利用锦州 2011、2012 年和 2014 年玉米分期播种试验数据和 1981—2010 年辽宁农业气象历史资料, 研究干旱年份水分与玉米产量的定量关系。结果表明: 玉米产量和总耗水量间呈二次抛物线的关系 ( $R^2 = 0.793$ ,  $F = 105$ ,  $P = 0.0001$ ,  $n = 57$ ), 当耗水量达到 400~600 mm 时, 玉米能够获得高产; 玉米不同生育阶段需水量呈现抽雄~乳熟期 > 拔节~抽雄期 > 出苗~拔节期 > 乳熟~成熟期 > 播种~出苗期的变化规律, 各阶段日耗水强度分别为 5.75、4.78、2.36、1.84  $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$  和 1.35  $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。在分析相对叶面积指数和相对作物系数关系的基础上, 提出了作物水分胁迫系数的相对叶面积订正方法, 建立了以 Jenson 模型为基础的玉米水分生产函数模型。

**关键词:** 玉米; 耗水量; 水分生产函数模型; 相对叶面积指数订正方法; 产量预测

**中图分类号:** S513; S162.5      **文献标志码:** A

## The relationship between yield and water consumption of maize in Liaoning Province

ZHANG Shu-jie<sup>1</sup>, ZHOU Guang-sheng<sup>2</sup>, ZHANG Yu-shu<sup>1</sup>, MI Na<sup>1</sup>, MENG Ying<sup>3</sup>,  
JI Rui-peng<sup>1</sup>, CAI Fu<sup>1</sup>, WU Jin-wen<sup>1</sup>, LI Guang-xia<sup>4</sup>

(1. Institute of Atmospheric Environment, CMA, Shenyang, Liaoning 110166, China;  
2. Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China;  
3. China meteorological Administration training center of Liaoning, Shenyang, Liaoning 110166, China;  
4. Liaoning Provincial Meteorological Observatory, Shenyang, Liaoning 110166, China)

**Abstract:** To understand the effects of water conditions on yield of maize, the quantitative relationship between maize yield and water consumption was studied using the observation data of maize field experiments (sowing at different sowing dates) during 2011—2012 and 2014 in Jinzhou Agricultural Ecosystem Research Station, and those from 21 agrometeorological experimental stations from 1981 to 2010 in Liaoning province. The results showed that the relationship between yield and total water consumption of maize can be described by a quadratic curve equation ( $R^2 = 0.793$ ,  $F = 105$ ,  $P = 0.0001$ ,  $n = 57$ ). When water consumption reached 400~600 mm, the maximum yield of maize could be obtained. The order of water demand (from high to low) for different developmental stages of maize is tasseling to milk stage > elongation to tasseling stage > emergence to elongation stage > milk to physiology mature > sowing to emergence, and the corresponding daily water consumption intensity is 5.75, 4.78, 2.36, 1.84  $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$  and 1.35  $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ , respectively. Based on the analysis of the relationship between relative leaf area index and relative crop coefficient, the correction method based on relative leaf area index for crop water stress coefficient was proposed. At the same time, maize water production function model was established on the basis of Jenson model. The accurate determination of water stress sensitivity index in this study provided reference for evaluation of the quantitative relationship between water consumption and yield of maize under drought stress.

收稿日期: 2016-10-19

修回日期: 2017-02-28

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(2015IAE-CMA05, 2011GY04); 中国气象局气候变化项目(CCSF201609); 国家自然科学基金重点项目(41330531)

作者简介: 张淑杰(1971—), 女, 黑龙江巴彦人, 副研究员, 主要从事农业气象灾害研究。E-mail: zhangshujie\_a@163.com。

通信作者: 周广胜(1965—), 男, 江苏南京人, 研究员, 博士, 从事全球变化与陆地生态系统相互作用观测与模拟研究。E-mail: gszhou@camsma.gov.cn。

**Keywords:** maize; water consumption; water production function model; relative leaf area index correction method; yield forecasting

玉米是东北地区的主要种植作物之一,播种面积基本维持在 500 万  $\text{hm}^2$  以上,种植面积约占粮食作物面积的 1/3,其产量占到粮食总产的 50% 以上<sup>[1]</sup>。近年来干旱灾害频繁发生,对雨养条件下的玉米生产造成了严重的影响,因此研究其生长发育对水分的需求及水分对其产量的影响非常重要,直接关系到农业用水管理和国家粮食安全。而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<sup>[2]</sup>。

玉米生长与水分关系密切,其生命活动都需要在一定的水分条件下才能进行,任何一个阶段缺水,都会使生命活动受阻,有关水分胁迫对玉米生长发育,耗水量和产量等的影响已有较多报道<sup>[3-4]</sup>,多数研究表明缺水对玉米植株生长发育和产量有较大影响,水分胁迫下玉米减产的程度及其原因因胁迫时期而异<sup>[5-8]</sup>。针对以上情况,国内外学者从不同的角度探讨了水分与产量之间的关系,建立了很多的水分生产函数模型。主要有二类:一是全生育期内水分生产函数,二是阶段性水分生产函数。全生育期水分生产函数模型有线性模型及二次函数模型;阶段性水分生产函数模型有加法模型和乘法模型。加法模型主要有 Blank 模型<sup>[9]</sup>、Stewart 模型<sup>[10]</sup>、Singh 模型<sup>[11]</sup>、Hiller 模型、Sudar 模型、D-G 模型等,乘法模型主要有 Jensen 模型<sup>[12]</sup>、Hanks 模型<sup>[13]</sup>、Minhas 模型<sup>[14]</sup>和 Rao 模型等。水分生产函数模型既考虑了作物生长进程,又考虑了作物需水,逐渐被应用于作物干旱评估<sup>[15]</sup>和产量预报<sup>[16-20]</sup>中,但由于气候、地理位置及作物品种等因素的影响,作物对水分的敏感性各地存在差异<sup>[21-23]</sup>,使得水分敏感系数在不同地区的应用受到限制。近年来,东北地区干旱发生频繁<sup>[24]</sup>,特别是 2000、2009、2014 年和 2015 年,东北地区均发生了较严重的干旱,当前的统计预报产量方法<sup>[25-27]</sup>已不能完全满足农业生产决策的信息需求,引进的作物生长模型预报方法<sup>[28-30]</sup>在产量预报中准确率较低,特别是针对干旱年的产量预报准确率急待提高,而水分生产函数模型克服了过程模型难以准确模拟干旱的影响,因此迫切需要开展本地的玉米水分生产函数模型研究,为准确地评估干旱及其影响提供技术支撑。

因此,本文拟利用适宜水分和干旱年份的分期播种试验数据及多年大田观测的试验资料,从反映

区域气候-作物特征入手,结合作物水分生产函数,综合考虑玉米生长过程中对水分的需求,探讨雨养条件下干旱对产量的影响,将水分与产量关系的研究由定性转向定量,提高玉米产量预报的准确率。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况及试验设计

试验设在锦州市生态与农业气象试验站(41°8'53"N,121°12'6"E,海拔 23 m)。该区域属于温带半干旱半湿润气候区,1981—2010 年年平均气温为 10.0℃,年降水量为 568 mm,年日照时数为 2 648 h。试验土壤为中壤土,0~1 m 土壤容重平均值为 1.62  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,田间持水量为 22.3%,凋萎湿度为 6.5%。

试验于 2011、2012 年和 2014 年在大田雨养条件下进行,无灌溉,供试玉米品种为丹玉 39,属晚熟种,生育期平均为 141 d。在当地适宜播种时间内进行分期播种试验,2011 年和 2012 年设 3 个播期,早播(4 月 20 日)、中播(4 月 30 日)、晚播(5 月 10 日),2014 年设 5 个播期(4 月 20 日、4 月 25 日、4 月 30 日、5 月 10 日和 5 月 20 日)。每个小区长 8 m,宽 6 m,种植密度分别为 4.51、4.19 株 $\cdot\text{m}^{-2}$ 和 4.56 株 $\cdot\text{m}^{-2}$ 。试验期间分别观测不同播期的出苗期、三叶期、七叶期、拔节期、抽雄期、乳熟期和成熟期出现日期,并于出现日期当日测定不同器官(茎、叶、穗)生物量(干、鲜质量)、叶面积,观测产量结构,土壤湿度按中国农业气象观测规范进行观测,同时观测逐日的气象要素(最高、最低、平均气温、降水、日照时数、风速和相对湿度等)。播种前精细整地,及时除草,防治病虫害,其它栽培管理措施同一般高产玉米田,播种时一次性施用底肥。2011、2012 年和 2014 年降水量分别为 415、759 mm 和 310 mm,其中 2014 年发生了干旱胁迫,生长期气象条件见表 1。

本研究同时利用 1981—2010 年辽宁 11 个玉米农业试验站农业气象观测资料,包括土壤水分、发育期和产量等观测资料。其中农业试验站的观测数据和锦州 2011 年和 2012 年分期播种试验数据用来计算分析耗水量与产量的关系,用于确定水分敏感系数,并用 2011 年和 2012 年的分期播种试验数据建立适宜条件下的叶面积指数模拟方程,2014 年的分期播种数据用来建立作物水分胁迫系数模拟方法及进行模拟结果验证。

表 1 2011、2012 年和 2014 年及 1981—2010 年作物生长季平均气温及降水量

Table 1 Average air temperature and precipitation in crop growing season in 2011—2012, 2014 and 1981—2010

月份 Month	温度 Temperature/°C				降水量 Precipitation/mm			
	2011	2012	2014	1981—2010	2011	2012	2014	1981—2010
4	10.8	10.7	14.2	11.1	18.2	60.4	4.8	28.4
5	18.6	19.8	18.2	17.7	50.7	15.0	85.0	49.9
6	21.7	21.0	23.4	22.0	97.4	155.1	92.9	88.7
7	24.4	24.8	25.5	24.6	114.7	224.7	36.6	153.9
8	25.4	23.3	25.2	24.2	125.4	249.5	60.9	139.8
9	19.7	19.0	19.4	19.3	8.3	54.6	30.2	51.9
平均 Average	20.1	19.8	21.0	19.8				
总计 Total					415	759	310	513

## 1.2 研究方法

1.2.1 实际耗水量计算 实际蒸散量可以代表作物耗水量,因此利用土壤水分平衡方程<sup>[31]</sup>计算:

$$E_{Ta} = 0.1 \sum_{i=1}^n h_i d_i (W_1 - W_2) + P + I + G - R_0 - D \quad (1)$$

式中,  $E_{Ta}$  为农田实际蒸散量 (mm);  $n$  为取土层次;  $h_i$  和  $d_i$  分别为第  $i$  层土层厚度 (cm) 和土壤容重 ( $g \cdot cm^{-3}$ );  $W_1$  和  $W_2$  分别为时段开始和结束时的第  $i$  层土壤湿度 (计算中分别乘 100);  $P$  和  $I$  分别为时段内降水量和灌水量 (mm);  $G$  和  $D$  分别为地下水补给量和渗漏量, 对于辽宁地区地下水位大于 4 m, 地下水补给及渗漏忽略不计<sup>[32]</sup>,  $R_0$  为径流量,  $P_e = P - R_0$  为有效降水量, 采用式(2) 计算<sup>[33]</sup>:

$$P_e = \sum_{u=1}^n \alpha_u P_u \quad (2)$$

式中,  $P_u$  为第  $u$  次降水的降水量 (mm);  $\alpha_u$  为有效利用系数。一般情况下,  $\alpha_u$  的取值如下: 当  $P_u \leq 5$  mm 时,  $\alpha_u = 0$ ; 当  $5$  mm  $< P_u \leq 50$  mm 时,  $\alpha_u = 0.9$ ; 当  $P_u > 50$  mm 时,  $\alpha_u = 0.75$ <sup>[33-34]</sup>。则式(1) 简化为式(3):

$$E_{Ta} = 0.1 \sum_{i=1}^n h_i d_i (W_1 - W_2) + P_e \quad (3)$$

1.2.2 作物需水量计算 作物需水量是指在光温水等适宜气象条件下, 作物能够正常生长发育并达到高产所需要消耗的水量。采用下面的方法计算:

$$E_{Tmi} = k_{ci} E_{T0i} \quad (4)$$

式中,  $E_{Tmi}$  为充分供水条件下的日作物实际蒸散量, 即作物需水量;  $E_{T0i}$  为日参考蒸散量, 采用 Penman - Monteith 提出的反映参考植被 (浅草和苜蓿) 的  $ET_0$  模型计算;  $K_{ci}$  为玉米逐日的基础作物系数。  $E_{T0i}$  和  $K_{ci}$  的计算方法具体见文献<sup>[35]</sup>。

1.2.3 叶面积指数动态模拟 采用修正的

Logistic 方程模拟叶面积指数的动态变化过程。

$LAI_i = a / (1 + \exp(b + c \times t_i + d \times t_i^2))$  (5)  
式中,  $LAI_i$  为叶面积指数;  $t_i$  为出苗后各阶段内  $\geq 10^\circ C$  的有效积温标准化生育期<sup>[35]</sup>;  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$  均为参数。

1.2.4 水分生产函数模型选取 选取乘法模型 (Jenson 模型<sup>[12]</sup>、Minhas 模型<sup>[14]</sup>) 和加法模型 (Blank 模型<sup>[9]</sup>、Singh 模型<sup>[11]</sup>) 对辽宁春玉米水分生产函数进行分析。

$$\text{Jenson 模型: } \frac{Y_a}{Y_m} = \prod_{i=1}^n \left( \frac{E_{Ta}}{E_{Tm}} \right)_i^{\lambda_i} \quad (6)$$

$$\text{Blank 模型: } \frac{Y_a}{Y_m} = \sum_{i=1}^n A_i \left( \frac{E_{Ta}}{E_{Tm}} \right)_i \quad (7)$$

$$\text{Singh 模型: } \frac{Y_a}{Y_m} = \sum_{i=1}^n B_i \left[ 1 - \left( 1 - \frac{E_{Ta}}{E_{Tm}} \right)_i^2 \right] \quad (8)$$

$$\text{Minhas 模型: } \frac{Y_a}{Y_m} = \prod_{i=1}^n \left[ 1 - \left( 1 - \frac{E_{Ta}}{E_{Tm}} \right)_i^2 \right]^{\lambda_i} \quad (9)$$

式中,  $\lambda_i$ ,  $A_i$ ,  $B_i$  为作物不同阶段缺水对产量的敏感指数,  $i$  为生育期;  $Y_a$  为处理条件下的实际产量 ( $g \cdot m^{-2}$ );  $Y_m$  为适宜水分条件下的产量 ( $g \cdot m^{-2}$ );  $E_{Ta}$  为各处理条件下实际蒸散量 (mm);  $E_{Tm}$  为阶段需水量 (mm), 通过水分适宜且获得较高产量的小区作物耗水量确定;  $n$  为模型的阶段总数, 在模型的计算中  $n = 4$ 。利用最小二乘法转换为求解线性方程组, 得到水分敏感指数。

## 2 结果与分析

### 2.1 水分生产函数的建立

2.1.1 总产量与总耗水量的关系 选择辽宁 11 个农业试验站 1981—2010 年农业气象历史观测资料和锦州 2011 年和 2012 年分期播种试验数据, 利用式(3) 计算整个生育期的实际蒸散量, 即作物耗水量, 进一步分析玉米耗水量与产量的关系, 二者呈二

次抛物线(图 1)。在耗水量较低的情况下,随着耗水量的增加,产量上升较快,但耗水量达到一定数值时,产量达到最大,之后随着耗水量的增加产量维持在一个稳定的范围内,其后产量再呈快速下降趋势,二者之间存在适宜水分的界限。根据拟合方程可以看出,当耗水量在 400~600 mm 之间玉米产量维持在一个比较稳定的范围内,因此将此值定为玉米的适宜耗水界限值,产量为 904~1 250  $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ 。利用拟合方程对计算的产量结果进行回代检验,可以看出计算的产量与实际产量基本吻合(图 2),拟合方程合理( $R^2 = 0.793$ ,  $F = 105$ ,  $P < 0.01$ ,  $n = 57$ ),平均相对误差为 8.7%。

2.1.2 不同生育时段需水量的确定 将玉米生育期分成 5 个阶段,根据式(3)计算生育阶段实际蒸散量即耗水量,选取其中玉米全生育期耗水量在 400~600 mm 之间的产量较高的试验小区及历史年份( $n = 28$ )数据,确定玉米各生育时段需水量(表 2),对应产量为 1 055  $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

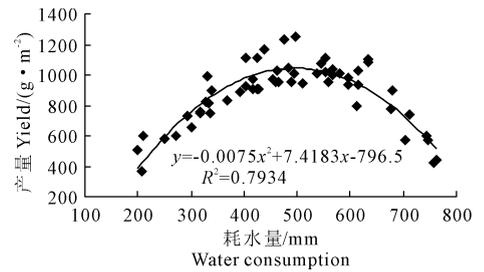


图 1 总耗水量和总产量的关系

Fig. 1 Relationship between total water consumption and total yield

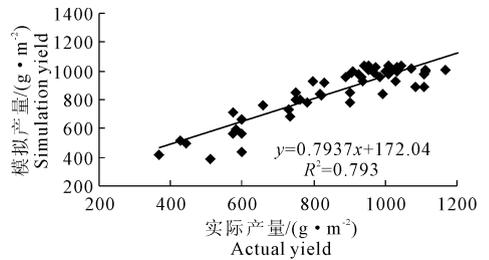


图 2 计算产量和实际产量比较

Fig. 2 Comparison between calculated and actual yields

表 2 玉米各生育阶段需水量

Table 2 Water requirement during growth stages for maize

生育时段 Growth stage	播种~出苗 Sowing~ emergence	出苗~拔节 Emergence~ elongation	拔节~抽雄 Elongation~ tasseling	抽雄~乳熟 Tasseling~kernel filling	乳熟~成熟 Kernel filling~ mature	全生育期 Whole growth period
间隔时间 Duration/d	14	39	25	37	28	143
需水量 Water demand/mm	19	93	117	215	51	491
阶段需水量占总需水量比/% Required water/total water	3.83	18.84	23.85	43.68	10.48	100.00
耗水强度/( $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ ) Water consumption rate	1.35	2.36	4.78	5.75	1.84	3.43

由表 2 可知,在当地地理和气象条件下,整个生育期内玉米在充分供水时的需水量为 491 mm,平均耗水强度为 3.43  $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ 。玉米需水规律表现为播种~出苗期最小,抽雄~乳熟期最大,其余各阶段居中。具体表现为抽雄~乳熟期>拔节~抽雄期>出苗~拔节期>乳熟~成熟期>播种~出苗期的变化规律,总耗水量分别为 215、117、93、51 mm 和 19 mm;

日耗水强度分别为 5.75、4.78、2.36、1.84  $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$  和 1.35  $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ 。

2.1.3 水分生产函数模型建立 选择辽西和辽北半干旱半湿润地区 7 个站(彰武、阜新、朝阳、叶柏寿、建昌、绥中、昌图)发生干旱年份的历史数据( $n = 31$  个样本),根据式(6)~式(9)计算得到 4 种水分生产函数模型的敏感指数及检验参数值(表 3)。

表 3 辽宁地区玉米水分生产函数模型敏感指标及检验参数( $n = 31$ )

Table 3 Sensitive index and parametric test for maize water production function in Liaoning

模型 Model	苗期 Seedling	拔节~抽雄期 Elongation~ tasseling	抽雄~乳熟期 Tasseling~ kernel filling	乳熟~成熟期 Kernel filling~ mature	相关系数 Correlation coefficient	相对误差/% Relative error
Jenson	0.092	0.223	0.505	0.168	0.837	13
Blank	0.085	0.231	0.503	0.101	0.839	15
Singh	0.187	0.350	0.763	0.180	0.781	90
Minhas	0.174	0.382	0.876	0.190	0.743	15

由表 3 可以看出: Jensen 模型, Blank 模型和 Minhas 模型  $\lambda_i$  值从高到低的顺序为抽雄~乳熟期、拔节~抽雄期、乳熟~成熟期、苗期,与前期研究所得的玉米不同生长发育阶段的土壤水分对产量的影响一致<sup>[36]</sup>。即玉米在抽雄~乳熟的生殖生长阶段耗水量最大,对缺水最敏感,其次是拔节~抽雄阶段,对水分需求次之,再次乳熟~成熟阶段对水分需求呈减小趋势,苗期阶段植株矮小,对水分要求最低,可见敏感值顺序合理。而 Singh 模型  $\lambda_i$  值从高到低的顺序为抽雄~乳熟期、拔节~抽雄期、苗期、乳熟~成熟期,不符合玉米的水分生理特性。进一步分析 Jensen 模型, Blank 模型和 Minhas 模型模拟计算产量和实际产量的相关系数可以看出,均达到了 0.01 的显著性检验,但相关性最好的是 Blank 模

型,相关系数为 0.839,其次是 Jensen 模型,相关系数为 0.837。同时分析模拟产量和实际产量之间的平均相对误差, Jensen 模型的相对误差为 13%, Blank 模型的相对误差为 15%。综上所述, Jensen 模型和 Blank 模型都可以作为辽宁地区玉米水分生产函数模型。

以 Jensen 模型和 Blank 模型为基础建立辽宁玉米水分生产函数模型,对辽宁西部和北部地区 7 个站 31 a 干旱年样本的农业气象观测资料进行回代,与实际产量进行对比。由图 3 可以看出,模型的解释率达到了 70% 以上,回代结果较好,分析二者的误差情况,误差在  $\pm 10\%$  以内的分别占 39% 和 45%,因此选用 Jensen 模型进行辽宁地区玉米水分胁迫对其产量影响分析。

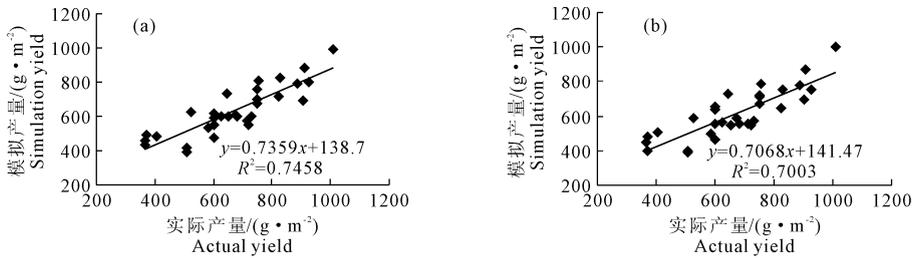


图 3 Jensen 模型(a)和 Blank 模型(b)模拟产量和实际产量比较

Fig. 3 Comparison between calculated yields and actual yields on Jensen model(a) and Blank model(b)

## 2.2 作物系数的相对叶面积指数订正

当作物受到水分胁迫时,叶面积指数成为表征作物生长发育状况的重要指标,其大小与实际蒸散量存在密切关系,因而可以用作物系数与叶面积指数的关系对水分胁迫进行订正<sup>[37-38]</sup>。利用 2011 年和 2012 年水分适宜条件下的叶面积指数观测数据采用标准化生育期方法<sup>[35]</sup>建立水分适宜条件下叶面积指数动态变化方程,见公式(10),复相关系数达 0.97 ( $F = 257, P < 0.01, n = 30$ ),进而计算非水分胁迫条件下的期望叶面积指数。采用张淑杰<sup>[35]</sup>提出的作物系数计算方法计算实际作物系数和标准作物系数,二者比值为相对作物系数,即作物水分胁迫系数( $k'_c$ ),通过分析 2014 年水分胁迫条件下相对叶面积指数与同期作物水分胁迫系数的关系发现,二者可以用指数曲线较好地描述(图 4),复相关系数达 0.90 ( $F = 438, P < 0.01, n = 49$ )。由于从 7 叶期才开始进行叶面积的观测,因此作物水分胁迫系数模型只适用于七叶期以后的茂盛生长阶段。

$$LAI_i = 10.04 / (1 + \exp(6.31 - 10.78t_i + 4.57t_i^2)) \quad (10)$$

$$RLAI_i = LAI_{\text{实际}} / LAI_{\text{标准}} \quad (11)$$

$$k'_{ci} = 0.368e^{(0.794 \times RLAI_i)} \quad (12)$$

由此,得出春玉米水分胁迫条件下实际作物系数动态计算式:

$$k_{cai} = k'_{ci} \times k_{ci} \quad (13)$$

式中,  $LAI_i$  为叶面积指数;  $t_i$  为出苗后各阶段内  $\geq 10^\circ\text{C}$  的有效积温标准化生育期<sup>[35]</sup>;  $RLAI_i$  为出苗后第  $i$  天的相对叶面积指数;  $LAI_{i\text{标准}}$  为出苗后第  $i$  天的标准叶面积指数;  $LAI_{i\text{实际}}$  为出苗后第  $i$  天的实际叶面积指数;  $k'_{ci}$  为作物水分胁迫系数;  $k_{ci}$  为标准作物系数;  $k_{cai}$  为实际作物系数。

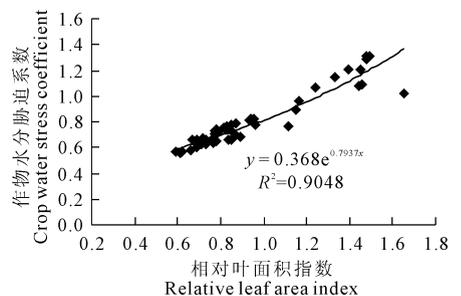


图 4 作物水分胁迫系数与相对叶面积指数的关系

Fig. 4 Relationship between crop water stress coefficient and relative leaf area index

### 2.3 基于水分生产函数的产量预测

利用 2014 年玉米 3 期(4 月 20 日、4 月 30 日和 5 月 10 日播期)观测数据,采用式(6)、式(12)计算水分生产函数和作物水分胁迫系数,对计算结果进行合理性检验。计算玉米不同阶段实际蒸散量,代入水分生产函数模型中对玉米产量进行预测。通过式(13)进一步计算玉米实际作物系数,计算结果在 3 个播期中变化一致,4 个发育阶段订正后的实际作物系数比标准作物系数低。利用实际作物系数和对应时期的参考作物蒸散量进一步计算 4 个发育时段的实际蒸散量,通过表 4 中实际蒸散量和表 2 中对

应时段的需水量对比可以看出 4 月 20 日和 4 月 30 日播期乳熟~成熟期实际蒸散量比需水量高,其余 3 个时段实际蒸散量比需水量低,5 月 10 日播期 4 个生育阶段实际蒸散量均低,将实际蒸散量的计算结果代入玉米水分生产函数模型中,模拟产量分别为 899.1、838.3  $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$  和 789.5  $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ ,模拟产量较 3 个播期的实际产量分别误差 2.3%、7.8% 和 2.8%,可见通过玉米作物水分胁迫系数订正的水分生产函数模型模拟的产量基本接近实际产量,因而该文提出的方法对产量预报有很好的适用性,可进一步应用于不同阶段缺水对产量影响的预评估中。

表 4 水分生产函数模型模拟产量与实际产量对比

Table 4 Water production function model to simulate yield compared with the actual production

播期(M-d) Sowing date	参数 Parameter	苗期 Seedling	拔节~抽雄期 Elongation~tasseling	抽雄~乳熟期 Tasseling~kernel filling	乳熟~成熟期 Kernel filling~mature	计算产量 Calculate yield /( $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ )	实际产量 Actual yield /( $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ )
04-20	$k_c$	0.29	0.74	1.12	0.66	899.1	920.04
	$k_{ca}$	0.37	0.63	0.87	0.45		
	$ET_a$	76.22	83.16	174.00	65.25		
04-30	$k_c$	0.35	0.74	1.13	0.65	838.3	909.60
	$k_{ca}$	0.17	0.66	0.87	0.44		
	$ET_a$	28.05	98.34	169.65	64.24		
05-10	$k_c$	0.33	0.67	1.13	0.56	789.5	812.04
	$k_{ca}$	0.25	0.64	0.84	0.37		
	$ET_a$	37.00	87.68	166.32	47.73		

## 3 结论与讨论

随着农业气象业务需求的进一步提高,当前的产量预报方法已不能完全满足农业生产决策的信息需求,精细化产量预报已成为农业气象业务中一项亟待拓展的重要服务内容,特别是针对干旱年的产量预报,其准确率亟待提高。本文以分期播种试验资料及多年大田观测试验资料,综合考虑作物生长过程中对水分的需求,研究雨养条件下作物水分胁迫发生时,作物不同生育阶段对水分胁迫的敏感程度及其对产量的影响,将水分与产量关系的研究由定性转向定量。

研究发现,玉米总产量与总耗水量呈二次曲线的关系,与米娜<sup>[32]</sup>的研究结果一致,耗水量在 400~600 mm 之间玉米产量维持在一个比较稳定的范围内,存在玉米需水的界限值,当玉米生育过程中能够获得 400~600 mm 水量时,玉米将达到高产水平。从生育过程中需水来看,呈现出抽雄~乳熟期>拔节~抽雄期>出苗~拔节期>乳熟~成熟期>播种~出苗期的变化规律,总耗水量分别为 215、117、93、

51 mm 和 19 mm;日耗水强度分别为 5.75、4.78、2.36、1.84  $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$  和 1.35  $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ ,与陈玉民<sup>[39]</sup>的研究结果基本一致。当玉米不同生育阶段获得的水分达不到要求时,即会发生水分胁迫,随之将导致减产。当作物发生水分胁迫时,其叶面积指数可以表征水分胁迫的影响,而作物系数可通过相对叶面积指数的大小反映<sup>[38]</sup>,因此利用相对叶面积指数与相对作物系数的关系,来表征作物受到水分胁迫的影响,以此来确定作物受到水分胁迫影响时的耗水量。

在 4 种水分生产函数模型的研究中发现 Jensen 模型中的水分敏感指数最符合辽宁玉米的生理需水规律,因此,确定 Jensen 模型为当地最适合的水分生产函数模型。在玉米出苗后的 4 个生育阶段中对水分的敏感顺序为抽雄~乳熟期、拔节~抽雄期、苗期、乳熟~成熟期。应用玉米作物水分胁迫系数和水分生产函数模型计算分期播种产量,与实际产量分别差 2.3%、7.8% 和 2.8%,初步证明本文提出的方法对玉米产量的预测结果较为理想,在该地区具有很好的适用性。

作物水分生产函数不但可以预测水分胁迫条件

下作物的产量,而且为研究作物在缺水条件下的灌溉制度提供依据。同时也为不同阶段缺水对作物产量影响的预评估进行了很好的尝试。在模型的应用中,注意作物品种、参数及地区间的差异。

#### 参考文献:

- [1] 张淑杰,张玉书,纪瑞鹏,等.东北地区玉米干旱时空特征分析[J].干旱地区农业研究,2011,29(1):231-235.
- [2] 张振华,蔡焕杰,杨润亚.基于作物水分生产函数和胁迫指数的棉花产量估算模式[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2005,33(12):135-138.
- [3] 肖俊夫,刘战东,南纪琴,等.不同水分处理对春玉米生态指标、耗水量及产量的影响[J].玉米科学,2010,18(6):94-97,101.
- [4] 刘战东,肖俊夫,南纪琴,等.晋中地区不同灌水处理对春玉米形态指标、耗水量及产量的影响[J].西北农业学报,2011,20(10):43-48.
- [5] 徐世昌,戴俊英,沈秀瑛,等.水分胁迫对玉米光合性能及产量的影响[J].作物学报,1995,21(3):356-363.
- [6] 宋凤斌,戴俊英.干旱胁迫对玉米雌穗生长发育和产量的影响[J].吉林农业大学学报,2000,22(1):18-22.
- [7] 刘树堂,东先旺,孙朝辉,等.水分胁迫对夏玉米生长发育和产量形成的影响[J].莱阳农学院学报,2003,20(2):98-100.
- [8] 白向历,孙世贤,杨国航,等.不同生育时期水分胁迫对玉米产量及生长发育的影响[J].玉米科学,2009,17(2):60-63.
- [9] Bras R L, Corodova J R. Intra-seasonal water allocation in deficit irrigation[J]. Water Resources Research, 1981, 17(4):886-874.
- [10] Stewart J L, Danielson R E, Hanks R J, et al. Optimizing crop production through control of water and salinity levels in the soil[R]. UT Logan: Utah Water Research Lab., PR. 1977.
- [11] Singh P, Wolkewitz H, Kumar R. Comparative Functions for Wheat[J]. Irrigation Science, 1987, 8(4):273-290.
- [12] Jensen M E. Water consumption by agricultural plants[C]//Kozlowski T T. Water Deficits in Plant Growth. New York: Academic Press, 1968:1-22.
- [13] Hanks R J. Yield and water use relationships: an overview[C]//Taylor, H M, Jordan W R, Sinclair T R. Limitation of Water Use in Crop Production. Madison, WI: ASA/CSSA/SSSA, 1983:393-411.
- [14] Minhas B S, Parkhand K S, Srinivasan T N. Towards the structure of a production function for wheat yields with dated input of irrigation water[J]. Water Resources. Research, 1974, 10(3):383-393.
- [15] 康西言,李春强,马辉杰,等.基于作物水分生产函数的冬小麦干旱评估模型[J].中国农学通报,2011,27(8):274-279.
- [16] 冯绍元,罗遵兰,左海萍.河北省冬小麦水分生产函数模型初步分析[J].灌溉排水学报,2005,24(4):58-61.
- [17] 葛岩,周林蕙,张更元,等.沈阳地区冬小麦水分生产函数与水分敏感指标的初步研究[J].沈阳农业大学学报,2003,34(2):131-134.
- [18] 罗遵兰,冯绍元,左海萍.山西省冬小麦水分生产函数模型初步分析[J].灌溉排水学报,2005,24(1):16-19.
- [19] 云文丽,侯琼,李建军,等.基于作物系数与水分生产函数的向日葵产量预测[J].应用气象学报,2015,26(6):705-713.
- [20] 迟道才,王鑫,夏桂敏,等.北方水稻动态水分生产函数研究[J].农业工程学报,2004,20(3):30-34.
- [21] 张和喜,迟道才,王永涛,等.黔中地区玉米水分生产函数模型适应性评价[J].水土保持研究,2013,20(3):176-179.
- [22] 罗遵兰,冯绍元,左海萍.河北省夏玉米水分生产函数模型初步分析[J].节水灌溉,2006,(1):17-19.
- [23] 张玉顺,路振广,张湛.作物水分生产函数 Jensen 模型中有关参数在年际间确定方法[J].节水灌溉,2003,(6):4-6.
- [24] 秦大河.气候变化与干旱[J].科学导报,2009,27(11):3.
- [25] 邱美娟,宋迎波,王建林,等.新型统计检验聚类方法在精细化农业气象产量预报中的应用[J].中国农业气象,2014,35(2):187-194.
- [26] 徐兴梅,曹丽英,赵月玲.基于灰色系统理论和 AR 时序算法的吉林省粮食产量预测[J].湖北农业科学,2014,53(24):6191-6193.
- [27] 王桂芝,胡慧,陈纪波,等.基于 BP 滤波的 Fourier 模型在粮食产量预测中的应用[J].中国农业气象,2015,36(4):472-478.
- [28] 黄晚华,薛颖超,李忠辉,等.基于作物生长模拟模型的产量预报方法研究进展[J].中国农业气象,2009,30(增1):140-143.
- [29] 王伟,黄义德,黄文江,等.作物生长模型的适用性评价及冬小麦产量预测[J].农业工程学报,2010,26(3):233-237.
- [30] 张淑杰,张玉书,王石立,等.基于作物生长模拟模式的玉米产量预报方法研究[J].安徽农业科学,2009,37(36):17914-17917.
- [31] 张淑杰,班显秀,纪瑞鹏,等.基于 GIS 的农田土壤含水量预报方法研究[J].土壤通报,2010,41(5):1043-1047.
- [32] 米娜,纪瑞鹏,张玉书.半湿润区雨养玉米农田水分利用效率对环境因子的响应[J].生态学杂志,2013,32(11):2911-2919.
- [33] 王春乙,蔡菁菁,张继权.基于自然灾害风险理论的东北地区玉米干旱、冷害风险评价[J].农业工程学报,2015,31(6):238-245.
- [34] 康绍忠,蔡焕杰.农业水管理学[M].北京:中国农业出版社,1996.
- [35] 张淑杰,周广胜,李荣平.基于涡度相关的春玉米逐日作物系数及蒸散模拟[J].应用气象学报,2015,26(6):695-704.
- [36] 张淑杰,张玉书,纪瑞鹏.水分胁迫对玉米生长发育及产量形成的影响研究[J].中国农学通报,2011,27(12):68-72.
- [37] 侯琼,王英舜,师桂花,等.内蒙古典型草原作物系数的试验研究[J].草业学报,2011,20(4):34-41.
- [38] 刘浩,段爱旺,孙景生,等.温室滴灌条件下土壤水分亏缺对番茄产量及其形成过程的影响[J].应用生态学报,2009,20(11):2699-2704.
- [39] 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.