

黔中地区玉米水分生产函数模型适应性评价

张和喜^{1,2}, 迟道才¹, 王永涛², 刘 浏²

(1. 沈阳农业大学 水利学院, 沈阳 110161; 2. 贵州省水利科学研究院, 贵阳 550002)

摘 要:为探寻适合黔中地区的玉米水分生产函数,基于不同灌水处理下玉米的耗水量和产量数据,比较分析了 Jensen 模型、Minhas 模型、Blank 模型、Stewart 模型和 Singh 模型 5 种水分生产函数模型。结果显示,乘法模型 Minhas 模型的 λ_i 顺序与玉米水分生理特征不符,加法模型 Blank 模型的 A_i 值在第②阶段最高、Stewart 模型中 B_i 值②阶段 > ④阶段、Singh 模型中 C_i 值在第③和第⑤阶段出现负值,这都与玉米的水分生理特性及灌溉实践不符,而由 Jensen 模型推算出的作物缺水阶段敏感顺序与玉米的水分生理特性以及灌溉实践相一致,因此确定适合贵州黔中地区的玉米水分生产函数模型为 Jensen 模型。

关键词:黔中地区; 玉米; 水分生产函数; 评价

中图分类号: S274.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2013)03-0176-04

Evaluation on Suitability of Water Production Functions to Maize in Central Area of Guizhou Province

ZHANG He-xi^{1,2}, CHI Dao-cai¹, WANG Yong-tao², LIU liu²

(1. College of Water Resources, Shenyang Agricultural University,

Shenyang, 110161; 2. Guizhou Academy of Hydraulic Sciences, Guiyang, 550002)

Abstract: To explore the corn water production function suitability in central Guizhou, we combined with the test data of water consumption and maize yield under different irrigation treatments, and 5 kinds of water production function models including Jensen model, Minhas model, Blank model, Stewart model and Singh model are compared and analyzed. The results show that sequence λ_i of multiplication model Minhas model and maize water physiological characteristics do not match each other, the A_i of the addition of Blank model is the highest in the second stage, for the Stewart model, the B_i is the highest at 2 stage > 4 stages, at stage 3 and stage 5, the C_i in Singh model begins to turn to negative, which conflicts with the physiological characteristics of water and irrigation practice of corn, but calculating the water phase sensitive sequence and the corn moisture physiological characteristics and practical experience to irrigation by using Jensen model are accorded. Therefore, we determine that Jensen model is the most suitable model for corn water production function in central Guizhou.

Key words: central area of Guizhou Province; maize; water production function; evaluation

作物—水模型(Model of Crop Response to Water, MCRW)是作物生长过程的水分变化对产量产生影响的数学描述^[1]。表征水分变化的自变量是相对腾发量(ET_a/ET_m)或土壤含水量(θ_a/θ_m),表征因变量的产量变化是相对产量(Y_a/Y_m),所描述的作物生长过程可以是全生育期或由分阶段组成的全生育期,是在非充分灌溉条件下,预测缺水对作物产量影响的

数学模型。生育阶段水分生产模型有乘法模型和加法模型。其中,乘法模型主要有 Jensen 模型、Minhas 模型、Rao 模型、Hanks 模型等;加法模型主要有 Blank 模型、Stewart 模型、Singh 模型、D-K 模型等^[2]。

针对贵州省中部地区的喀斯特地貌和气候条件,研究不同的玉米水分生产函数模型在当地的适应性

收稿日期:2012-10-02

修回日期:2012-11-14

资助项目:贵州省水资源高效利用创新服务能力团队建设(KY-2010N-004);水利部公益性行业专项经费项目(201201025);贵州省科技计划课题(黔科合 NY 字[2010]3063 号)

作者简介:张和喜(1980—),男,湖北荆州人,在读博士,主要从事节水灌溉原理与技术研究。E-mail:hexi0926@126.com

通信作者:迟道才(1964—),男,博士生导师,主要从事灌溉排水原理与技术研究。E-mail:daocaichi@vip.sina.com

具有重要的现实意义,可为制定玉米的节水高效优化灌溉制度提供一定的理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验设在位于贵阳市修文县龙场镇的贵州省灌溉试验中心站试验基地内。试验区地处东经 106°37′,北纬 26°52′,南北长 512 m,东西宽 459 m,高程 1 270~1 300 m。试验区所在的修文县年平均气温 13.5℃,日均气温≥10℃的年积温为 4 090℃;多年平均降雨量 1 235 mm,多年平均径流深 550 mm,月降雨量 2.1~517.4 mm,降雨量最大的是 6 月,其依次为 5 月、7 月、8 月、4 月、10 月、9 月、11 月、3 月、12 月、2 月、1 月,其中冬季 3 个月的降雨量最小,处于旱季,一年内的降雨主要集中在夏季。土壤类型以黄壤旱作土为主,土壤质地为重壤至轻黏,pH 值大多为酸性。

1.2 试验方案

供试玉米品种为毕单 17 号,根据其生长发育规律,把玉米整个生育期细分为若干个生育阶段,明确各生育阶段的起、止日期和持续时间。控制性试验将全生育期划分为需水关键期和非关键期两个部分,每个部分设计 3 个水分控制下限处理,另设全生育期各阶段供水不足、供水中等和供水充足的处理各 1 个,总处理数为 3×3+3=12。黔中地区属于喀斯特地貌,土层深度较浅,本试验中的土壤深度为 40 cm。具体试验设计见表 1。

表 1 玉米灌溉试验设计方案

处理 编号	处理	苗期— 拔节	拔节— 抽雄	抽雄— 灌浆	灌浆— 成熟
L1	全生育期适宜	70%	70%	75%	70%
L2	苗期轻旱	60%	70%	75%	70%
L3	苗期重旱	50%	70%	75%	70%
L4	拔节期轻旱	70%	60%	75%	70%
L5	拔节期重旱	70%	50%	75%	70%
L6	抽雄期轻旱	70%	70%	65%	70%
L7	抽雄期重旱	70%	70%	55%	70%
L8	灌浆期轻旱	70%	70%	75%	60%
L9	灌浆期重旱	70%	70%	75%	50%
L10	全期高水分	75%	75%	75%	75%
L11	全期中水分	60%	60%	60%	60%
L12	全期低水分	50%	50%	50%	50%

注:表中数字为灌水控制下限。即当某一深度土层的平均含水量达到这一数值后,则灌溉至田间持水量,或按某一定值灌溉,视具体情况而定。

1.3 典型模型的选取

本研究选用 5 种典型模型对贵州省中部地区玉米水分生产函数进行分析,所采用的模型有乘法模型:Jensen 模型、Minhaa 模型;加法模型:Blank 模

型、Stewart 模型、Singh 模型。

$$\text{Jensen 模型: } \frac{Y_a}{Y_m} = \prod_{i=1}^n \left(\frac{ET_a}{ET_m} \right)^{\lambda_i} \quad (1)$$

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

$$\text{blankt 模型: } \frac{Y_a}{Y_m} = \sum_{i=1}^n A_i \cdot \left(\frac{ET_a}{ET_m} \right)_i \quad (3)$$

$$\text{Stewart 模型: } \frac{Y_a}{Y_m} = 1 - \sum_{i=1}^n B_i \cdot \left(1 - \frac{ET_a}{ET_m} \right)_i \quad (4)$$

$$\text{Singh 模型: } \frac{Y_a}{Y_m} = \sum_{i=1}^n C_i \left[1 - \left(1 - \frac{ET_a}{ET_m} \right)_i^2 \right] \quad (5)$$

式中:λ_{*i*},A_{*i*},B_{*i*},C_{*i*}——作物不同阶段缺水对产量的敏感指数及敏感系数;*i*——生育期划分号;Y_{*a*}——各处理条件下的实际产量(kg/hm²);Y_{*m*}——充分灌溉条件下的作物产量(kg/hm²);ET_{*a*}——各处理条件下的实际蒸发蒸腾量(mm);ET_{*m*}——充分灌溉处理下的蒸发蒸腾量(mm);*n*——模型的阶段总数,本试验中 *n*=5。

1.4 典型模型参数的计算

以 Jensen 模型为例,对式(1)两边取对数,然后令 $Y = \ln\left(\frac{Y_a}{Y_m}\right)$, $X = \ln\left(\frac{ET_a}{ET_m}\right)$,可得 $Y = \lambda_1 \cdot X_1 + \lambda_2 \cdot X_2 + \dots + \lambda_n \cdot X_n$,采用 SPSS 数据处理软件对试验数据进行多元回归分析求得 λ_{*n*}。

1.5 典型模型的检验方法

为评价模型精度,选择以下统计参数进行评价:平均误差(AE);均方根误差(RMSE)、变异系数(C_{*v*})、残差聚集系数(CRM)和模型性能指数(EF)^[3-5]。计算公式如下:

$$AE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i) \quad (6)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2} \quad (7)$$

$$C_v = \frac{RMSE}{O} \times 100 \quad (8)$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n P_i - \sum_{i=1}^n O_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (9)$$

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - O)^2 - \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - O)^2} \quad (10)$$

式中:P_{*i*}——模型模拟值;O_{*i*}——试验观测值;O——试验观测均值。

2 结果与分析

2.1 水分生产函数建模

根据贵州省灌溉试验中心站 2009—2011 年 3 a

的实测资料(表 2)和中心站自动气象站自动采集的蒸发蒸腾量,应用 SPSS 数据处理软件,按照所选取的典型模型求解 λ_n ,并对参数进行验证,对转化后的

各模型采用最小二乘法进行回归分析,即可得到这 5 个模型的敏感指数及系数值。计算结果如表 3—4 所示。

表 2 2009—2011 年玉米产量与耗水量

处理	2009 年		2010 年		2011 年	
	产量/ (kg·hm ⁻²)	耗水量/ (m ³ ·hm ⁻²)	产量/ (kg·hm ⁻²)	耗水量/ (m ³ ·hm ⁻²)	产量/ (kg·hm ⁻²)	耗水量/ (m ³ ·hm ⁻²)
充分灌溉	8811.4	5473.8	8319.7	5142.6	9319.6	5825.1
L2	6775.5	4973.2	6163.1	4612.1	7243.4	5315.7
L3	5277.0	4322.2	4814.8	3929.6	5715.2	4647.2
L4	6874.5	4256.7	6452.3	3854.1	7432.7	4718.2
L5	5719.5	4529.8	5347.2	4137.2	6127.2	4821.5
L6	5983.5	4832.5	5591.3	4479.4	6434.7	5194.2
L7	5259.0	4621.7	4876.8	4229.9	5712.2	4883.1
L8	7060.5	4669.1	6618.2	4293.2	7418.5	5072.6
L9	5866.5	4487.3	5434.2	4119.7	6314.8	4868.2
L11	5418.0	4273.2	5015.8	3914.6	5876.2	4634.7

表 3 玉米各阶段相对蒸发蒸腾量与相对产量

处理	相对产量 Y_a/Y_m	各阶段相对蒸发蒸腾量 ET_i/ET_{mi}				
		播种—出苗	出苗—拔节	拔节—抽穗	抽穗—灌浆	灌浆—成熟
充分灌溉	1	1	1	1	1	1
L2	0.87	0.62	0.76	0.85	0.95	0.57
L3	0.84	0.68	0.71	0.64	0.73	0.70
L4	0.88	0.70	0.79	0.71	0.89	0.84
L5	0.73	0.64	0.78	0.58	0.88	0.92
L6	0.77	0.89	0.85	0.81	0.72	0.78
L7	0.79	0.67	0.78	0.84	0.81	0.68
L8	0.91	0.57	0.87	0.81	0.91	0.71
L9	0.75	0.78	0.80	0.77	0.87	0.61
L11	0.69	0.66	0.66	0.45	0.62	0.58

表 4 敏感指数及检验参数

模型	参数	生育阶段				
		播种—出苗①	出苗—拔节②	拔节—抽穗③	抽穗—灌浆④	灌浆—成熟⑤
Jensen	λ_i	-0.017	0.188	0.219	0.224	0.136
Minhas	λ_i	0.006	-0.247	0.247	0.164	0.180
Black	A_i	-0.055	0.734	0	0.357	-0.037
Stewart	B_i	-0.064	0.216	0.283	0.208	0.155
Singh	C_i	0.008	0.747	-0.049	0.344	-0.049

由表 4 可知, λ_i 值在 Jensen 模型中的顺序从高低到是:④—③—②—⑤—①。Jensen 模型公式表明, λ_i 值越高,缺水后 Y_a/Y_m 值越低,即由缺水导致的减产越严重,由 Jensen 模型推算出的 λ_i 值在第④阶段最高,即在第④阶段对缺水最敏感。另外,由 Jensen 模型推算出的作物缺水阶段敏感顺序与玉米的水分生理特性以及灌溉实践相一致。

Minhas 模型公式表明, λ_i 值敏感顺序为:③—⑤—④—①—②,而 λ_i 值越高对缺水越敏感,显然这个顺序不符合玉米的水分生理特性,因此,该模型不适宜用作黔中地区玉米水分生产函数。

Blank 模型中的 A_i 值越高,缺水后 Y_a/Y_m 值越高,即作物越缺水导致产量减产越轻, A_i 值在第②阶段最高,说明玉米第②阶段对水分最敏感,其高低的阶段顺序与玉米的水分生理特性及灌溉实践不符,故此模型不适宜作黔中地区玉米水分生产函数。

Stewart 模型中的 B_i 值,其变化规律与 Jensen 模型中的 λ_i 值不同,该模型也是 B_i 值越大则作物缺水导致减产越严重,本试验中 B_i 的高低顺序是③—②—④—⑤—①,在该模型中缺水后各阶段敏感顺序与玉米的水分生理特性以及灌溉的实际经验不一致。因此,Stewart 模型不适合作为黔中地区玉米水分生

产函数。

Singh 模型中的 C_i 值在第③和第⑤阶段出现负值,这与玉米的水分生理特性及灌溉实践有矛盾,故此模型不适宜于黔中地区玉米水分评价。

2.2 模型精度评价

为了进一步验证 Jensen 模型的模拟精度,应用 Jensen 模型分别计算玉米模拟相对产量,结果见表 5。

表 5 实测相对产量与 Jensen 模型模拟相对产量

处理	实测相对产量	模拟相对产量
充分灌溉	1	1
L2	0.87	0.85
L3	0.84	0.76
L4	0.88	0.85
L5	0.73	0.82
L6	0.77	0.83
L7	0.79	0.84
L8	0.91	0.88
L9	0.75	0.82
L11	0.69	0.65

根据表 5,选择平均误差(AE)、均方根误差(RMSE)、变异系数(C_v)、残差聚集系数(CRM)和模型性能指数(EF)等统计指标对 Jensen 模型进行评价,结果见表 6。

表 6 模型模拟结果精度分析

指标	模型评价
AE	0.007
RMSE	0.054
C_v	6.577
EF	0.635
CRM	0.009

由表 6 可见,Jensen 模型对玉米相对产量的模拟效果较好,平均误差(AE)、均方根误差(RMSE)、变异系数[$C_v(\%)$]、残差聚集系数(CRM)和模型性能指数(EF)分别为 0.007,0.054,6.577,0.009,0.635,残差聚集系数(CRM)表明,Jensen 模型的相对产量和实测相对产量相差无几,为 0.009,而对于反映模

型整体模拟能力的模拟性能指数(EF),其值为 0.635。总体来看,Jensen 模型的各个统计指标表明 Jensen 模型对玉米相对产量的模拟效果较好。综上所述,贵州黔中地区玉米的水分生产函数可以选用 Jensen 模型。

3 结 论

通过采用 5 种最常用的作物水分生产函数,对 3 a 玉米节水灌溉试验结果进行多元回归分析,得出 Jensen 模型符合玉米的生长需水规律和灌溉实际情况,适用于黔中地区,其他几种模型由于某些参数与玉米生长的需水规律不符,因此不适用;选择平均误差(AE)、均方根误差(RESE)、变异系数[$C_v(\%)$]、残差聚集系数(CRM)和模型性能指数(EF)等统计指标对 Jensen 模型的模拟精度进行评价,结果表明,模型模拟精度较高,Jensen 模型对玉米相对产量的模拟效果较好,建议贵州黔中地区玉米水分生产函数选用 Jensen 模型。

参考文献:

[1] 陈亚新,康绍忠.非充分灌溉原理[M].武汉:水利电力出版社,1995.

[2] 罗金耀.节水灌溉理论与技术[M].武汉:武汉大学出版社,2003.

[3] Singh R, Helmers M J, Qi Z M. Calihration and validation of DRAIN-MOD to design subsurface drainage systems for Iowa's tile land-scapes[J]. Agricultural Water Management,2006,85(3):221-232.

[4] Panda R K, Behera S K, Kashyap P S. Effective management of irrigation water for maize under stress conditions[J]. Agricultural Water Management,2004,66(1): 181-203.

[5] Igbadun H E, Andrew K P R T, Salim B A, et al. Evaluation of selected crop water production functions for an irrigated maize crop[J]. Agricultural Water Management,2007,94(3):1-10.