

# 黄土旱塬玉米产量与土壤水分 关系数学模型研究 \*

郭 庆 荣

(广东省土壤研究所, 广州, 510650)

李 玉 山

(中国科学院 水土保持研究所·陕西杨陵·712100)  
水 利 部

**摘 要** 采用田间遮雨棚下模拟土柱的试验方法和田间小区试验方法,对黄土旱塬长武塬区不同土壤水分处理下玉米产量与土壤水分关系进行了研究。结果表明,无论是模拟土柱试验中,相对生物量、相对经济产量与土壤水分保证率之间的关系,或者相对生物产量、相对经济产量与相对耗水量之间的关系;还是大田小区试验中,玉米产量与耗水量之间的关系,或相对产量与相对耗水量之间的关系,它们都遵循如下抛物线变化规律:  $y = ax^2 + bx + c$ ,  $a, b, c$  为待定常数。

**关键词** 玉米 产量 土壤水分 耗水量 数学模型

## Study on the Relationship Model Between the Yield of Spring Corn and Soil Moisture in Non-irrigated Plateau of Loess

Guo Qingrong

(Guangdong Institute of Soil Sciences, Guangzhou, 510650)

Li Yushan

(Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences  
and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi, 712100)

**Abstract** Two experiments both of simulation under rainproof shelter and plot in-field were done to study the relationship between the yield of spring corn and soil moisture in the different treatments of water supply in Non-irrigated Plateau of Loess. The results showed that, the relationship between the relative biomass or grain yield and the soil moisture, or the relationship between the relative biomass or grain yield and the water consumption in the simulation experiment under rainproof shelter in field; and the relationship between the relative grain yield and the relative water consumption in the field plot experiment, they were described by a parabola, namely,  $y = ax^2 + bx + c$ ,  $a$  and  $b$  and  $c$  were constants.

① 收稿日期:1995-09-10 \* 系国家自然科学基金资助项目。

**Key words** spring corn crop yield water consumption soil moisture mathematical model

我国晋陕甘宁一带黄土旱塬,气候类型上属于半干旱和半湿润易旱地区,其特点是蒸发量大,降雨较少且年际变化大,年内降雨分配极不均匀,因而既是当前生产力水平较低的地区,又是生产力提高潜力很大的地区,而水分正是限制当地作物生产力的重要因素,但在其利用上又存在着一定的潜力。因而,研究作物对水分的需要和作物产量与水分之间的关系,以及高效利用土壤水分,对这个地区来说,特别重要。一般认为,作物产量与耗水量之间呈直线关系<sup>[1~5]</sup>,然而,亦有不少的试验研究报告却定性地告诉人们,这种直线关系只能在一定的试验条件下成立<sup>[6]</sup>。为此,本文将以玉米作物为例,对其产量与水分关系做一定量研究。并得出一个比较合适的数学表达式。

## 1 试验条件和研究方法

试验设置在黄土高原南部典型旱农区——渭北旱塬长武塬区。该地常年平均气温为 $9.1^{\circ}\text{C}$ ,年平均降雨量为 $548.1\text{mm}$ ,无霜期 $171\text{天}$ ,属暖温带半湿润易旱型大陆性季风气候;试验土壤为中壤质黑垆土,含有机质 $0.992\%$ ,全氮 $0.079\%$ ,全磷 $0.157\%$ ,全钾 $1.920\%$ ,土壤的田间持水量 $W_{\text{FC}}$ 为 $0.22$ ,凋萎湿度 $W_{\text{pwp}}$ 为 $0.09$ 。试验区田间四周开阔,周围 $50\text{m}$ 范围内均为同种作物,能代表大田的气候条件,试验区临近中国科学院长武生态试验站布设的气象观测站。

为了克服盆栽试验在控制土壤水分剖面分布和作物生长环境等方面的不足,我们选择植物根系和土壤湿度剖面分布比较均匀的有限深度的人工试验土柱,即采用 $1.0\text{m}$ 深度的人工试验土柱开展试验研究,而且人工试验土柱不同深度处设有多处加水管和加水口,以便控制土柱土壤湿度剖面均匀分布,同时,为了使试验接近大田条件,我们采取了把人工试验土柱直接放置在大田之中且相互分散的试验方法,来注意试验的群体效应,避免试验出现“晒衣”效应。试验在同一高肥力( $1\text{hm}^2$   $180\text{kg}$  全氮,  $90\text{kgP}_2\text{O}_5$ ,  $135\,000\text{kg}$  土粪)水平下设置五个土壤湿度水平,分别为田间持水量的 $95\%$ ,  $85\%$ ,  $75\%$ ,  $65\%$ ,  $55\%$ ,即土壤重量含水量 $W$ 分别是 $0.209$ ,  $0.187$ ,  $0.165$ ,  $0.143$ ,  $0.121$ ,每个水分水平设置四个重复。土壤湿度水平从玉米播种时开始设置,一直持续到成熟收获时为止,为了控制降雨对土柱土壤水分的影响,设置遮雨棚。

同时在模拟土柱试验的旁边,设置了相对照的田间小区试验。田间小区试验是通过在与模拟土柱试验一样的、同一高肥力情况下设置不同供水处理进行研究,田间试验小区的水分处理分为五个水平:一端为充分供水水平,要求玉米作物生长期土壤湿度处于适宜水平,通过 $1\text{hm}^2$ 人工灌水 $4\,200\text{mm}$ ,即 $1\text{hm}^2$ 人工灌水 $2\,805\text{m}^3$ ,另一端为旱作,即玉米作物仅依赖播前土壤贮水和生育期内降水做为供水源,在二者之间插入三个水分水平,这三个水分水平 $1\text{hm}^2$ 人工灌水分别为 $2\,100$ ,  $1\,395$ ,  $705\text{m}^3$ ,不同供水处理的灌水次数和每次灌水量依土壤湿度而定。每个供水处理设置四个重复,每个小区的面积为 $3\text{m}\times 5\text{m}$ 。供试作物亦为玉米, $1\text{hm}^2$ 株数为 $60\,000$ 株。试验小区随机排列,每小区之间有一定面积的保护区,试验区周围也有保护区。模拟土柱试验和田间小区试验同期播收。

## 2 结果与讨论

### 2.1 模拟土柱试验玉米产量与土壤水分之间的关系

2.1.1 玉米生物产量、经济产量与土壤水分之间的关系 表1中,SRWC(%)为不同水分水

平处理的土壤湿度相当于田间持水量的百分数;土壤水分保证率  $\gamma = (W - W_{pwp}) / (W_{FC} - W_{pwp})$ , 式中:  $W_{pwp}$  ——土壤凋萎湿度,  $W_{FC}$  ——土壤的田间持水量;相对产量是指不同土壤水分水平处理下玉米的产量与最高水分水平处理玉米产量相比较所得到的值。由表1可知,玉米的生物产量、经济产量均随土壤湿度的减小而降低。

表1 模拟土柱试验不同水分处理玉米的产量反应(g/柱)

SRWC(%)	95	85	75	65	55
土壤含水量 $W$	0.209	0.187	0.165	0.143	0.121
土壤水分保证率 $\gamma$	0.9153	0.7461	0.5769	0.4077	0.2385
平均生物产量 $y_1$	390.065	333.487	294.089	225.396	173.587
相对生物产量 $RY_1$	1	0.8550	0.7539	0.5778	0.4450
平均经济产量 $y_2$	196.450	177.960	148.667	116.387	84.020
相对经济产量 $RY_2$	1	0.9059	0.7568	0.5925	0.4277

将玉米作物相对生物产量  $RY_1$  与土壤水分保证率  $\gamma_{(w)}$  之间的关系进行拟合分析,得到如下拟合方程:

$$RY_1 = 0.2186 + 0.9653\gamma_{(w)} - 0.1262\gamma_{(w)}^2 \quad (1)$$

方差分析表明,拟合关系达到极显著水平,相关系数  $r = 0.9979$ ,  $F$  值检验为  $\alpha = 0.01$  水平下极显著。由拟合方程式(1)可知,玉米相对生物产量随着土壤水分保证率的减小而按抛物线变化规律下降,也就是指玉米生物产量随土壤湿度的减小而按抛物线变化规律递减。

同理,玉米相对经济产量  $RY_2$  与土壤水分保证率  $\gamma_{(w)}$  之间亦有如下拟合关系:

$$RY_2 = 0.1318 + 1.3123\gamma_{(w)} - 0.3907\gamma_{(w)}^2 \quad (2)$$

方差分析表明,两者的拟合关系达到极显著水平,其相关系数  $r = 0.9993$ ,  $F$  值检验为  $\alpha = 0.01$  水平下极显著。由拟合方程式(2)可知,拟合曲线为开口向下的抛物线,则玉米相对经济产量随着土壤水分保证率的下降而按抛物线变化规律递减,意即玉米经济产量随着土壤湿度的减小而按抛物线变化规律递减。

综上可得,玉米的生物产量、经济产量均随着土壤湿度的减小而按抛物线变化规律递减。

2.1.2 模拟土柱试验玉米生物产量、经济产量与耗水量之间的关系式 表2中,玉米作物的平均耗水量是指玉米作物生育期内每个土壤水分水平处理四个重复土柱玉米耗水量的平均值,单位为 ml/柱。由表2可知,随着土壤湿度的减小,玉米的耗水量亦随之减小,其主要是由于土壤湿度减小导致土壤水势降低,即土壤土库源动力减小,再加上土壤阻力、土——根接触阻力、植物根系阻力均随土壤湿度的减小而增大,因而降低了土壤水分的有效性,植物根系吸水难度加大,植物的耗水量必然随之降低,从而影响植物的生长发育过程和产量的形成,由表2即可看出,随着土壤湿度的下降,玉米耗水量的减小,玉米的生物产量、经济产量均随之减小。

表2 不同土壤水分水平处理玉米产量与耗水量的比较

SRWC%	95	85	75	65	55
土壤含水量 $W$	0.209	0.187	0.165	0.143	0.121
平均耗水量	88661.3	78105.7	68035.7	50628.3	35927.3
相对耗水量	1	0.8809	0.7674	0.5710	0.4052
相对生物产量 $RY_1$	1	0.8550	0.7539	0.5778	0.4450
相对经济产量 $RY_2$	1	0.9059	0.7568	0.5925	0.4277

将玉米相对生物产量  $RY_1$  与其相对耗水量  $x$  之间进行回归分析,得回归方程为:

$$RY_1 = 0.2205 + 0.4124x + 0.3623x^2 \tag{3}$$

方差分析表明,回归关系达到极显著水平,其相关系数  $r = 0.999\ 6$ ,  $F$  值检验为  $\alpha = 0.01$  水平下极显著。由回归方程式(3)可知,玉米相对生物产量与相对耗水量之间呈抛物线变化规律,意即玉米生物产量随耗水量的减小而按抛物线变化规律减小。

同理,玉米相对经济产量  $RY_2$  与相对耗水量  $x$  之间亦有如下拟合关系:

$$RY_2 = 0.0605 + 0.8859x + 0.0594x^2 \tag{4}$$

方差分析表明,相关系数  $r = 0.9982$ ,回归关系达到极显著水平, $F$  值检验为  $\alpha = 0.01$  水平下极显著。由拟合方程式(4)可以清楚地看出,玉米经济产量同样随着耗水量的减小而按抛物线变化规律递减。

2.2 大田小区试验玉米产量与耗水量之间的关系

大田小区试验的不同水分处理,主要是通过人工灌水量的不同来实现的,不同水分处理的灌水量、玉米的耗水量和玉米的产量值如表3所示,由表3可以看出,随着人工灌水量的增加,玉米的耗水量随之增大,玉米的产量也有随之不断上升的反映。对玉米的产量  $Y_3$  和耗水量  $ET$  之间的关系进行拟合分析。其拟合方程为:

$$Y_3 = -14180.0295 + 63.34875[ET] - 0.03915[ET]^2 \tag{5}$$

方差分析表明,相关系数  $r = 0.996\ 3$ ,  $F$  值检验为  $\alpha = 0.01$  水平下极显著,则拟合关系达到极显著不平。由拟合方程式(5)可知,玉米的产量和耗水量之间成正相关的抛物线变化规律。

对上述拟合方程式(5)两边求关于耗水量  $ET$  的导数得:

$$Y'_3 = dy_3/d(ET) = 63.34875 - 0.0783[ET]$$

令  $Y'_3 = 0$ , 即得极值点的  $ET$  值为

$$63.34875 - 0.0783[ET] = 0 \Rightarrow [ET] = 809.05$$

又由于  $Y'_3 = d(y'_3)/d(ET) = d[63.34875 - 0.0783[ET]]/d(ET) = -0.0783 < 0$

则所求得的极值点为极大值点,即当  $[ET] = 809.05\text{mm}$  时,玉米作物将取得最大产量值。

将  $[ET] = 809.05$  代入拟合方程式(5)之中得最大产量值为:

$$Y_3(\text{max}) = 11446.178(\text{kg}/\text{hm}^2)$$

表3 大田小区试验不同水分处理玉米的产量和耗水量值

水分处理	高水	中上水	中水	中下水	低水
灌水量(mm)	280	210	140	70	0
耗水量(mm)	694.97	640.88	600.53	531.60	475.38
相对耗水量	0.8590	0.7921	0.7423	0.6571	0.5876
平均产量(kg/hm <sup>2</sup> )	10843.5	10282.5	9489.0	8547.0	6963.0
相对产量	0.9474	0.8983	0.8290	0.7467	0.6084

由上可得,该试验年份该种玉米作物在充分灌水条件下的最大需水量为12 135.75mm/hm<sup>2</sup>,较通常气候年份大田玉米耗水量高出50%,及该最大耗水量下该种玉米作物的最大产量为11 446.178kg/hm<sup>2</sup>。依据该试验年份的气温、日照与历年平均气温、日照的比较情况,该最大产量值可以认为是试验年份种玉米作物的光合生产潜势。

把最大产量  $Y_3(\text{max}) = 11\ 446.178$  及相对应的耗水量  $[ET] = 809.05$  作为基准,试验中各水分处理的产量值和耗水量值分别与其相比较,即得表3中的各水分处理玉米的相对产量值和相

对耗水量值,大田小区试验玉米相对产量值( $RY_3$ )与相对耗水量( $RET$ )之间亦有如下拟合关系:

$$RY_3 = -1.2361 + 4.4702[RET] - 2.2472[RET]^2 \quad (6)$$

(相关系数  $r = 0.9963$ ,  $F$  值检验为  $\alpha = 0.01$  水平下极显著)

则大田小区试验玉米相对产量与相对耗水量之间呈正相关抛物线变化规律。

综上所述,大田小区试验,随着人工灌水量的增多,玉米的耗水量不断增大,玉米产量也随耗水量的增加而呈抛物线变化规律增大。但是,人工灌水量越多,土壤耗水(系指在作物的整个生育期内,由于降水量的不足和人工灌水量较少或没有而不能满足作物生育期内耗水,土壤水库里有效储水中补充给作物消耗的那一部分耗水。主要通过作物播种前和收获后土壤含水量的变化来推求,土壤水库正是由于具有充、放水的调节能力,因而深层土壤储水才能表现较高的生物有效性。)则随之减小,由表3可知不同水分处理的土壤耗水分别为209.9,225.8,255.4,256.5,270.3mm(玉米整个生育期内降水量为205mm),因而土壤中所储存的有效土壤水分的利用率越低,尤其是土壤深层有效储水量的利用率越低,则自然而然地降低了深层土壤储水对植物的生物有效作用。这正是要提倡实行定额灌溉的理由之一。另外,人工灌水量70mm的水分处理(其可称为是低定额水处理),灌水量分别是较高供水处理的 $1/4, 1/3, 1/2$ ,而该供水处理的籽粒产量与较高供水处理相比仅相差2296.5,1735.5,942.0kg/hm<sup>2</sup>;可是该供水处理的灌水量仅比干旱处理多70mm,而其玉米籽粒产量则比干旱处理要多1584.0kg/hm<sup>2</sup>,由此得知,实行低定额灌水,既可获得较高的籽粒产量,又可获得最高的水分利用效率,还可获得较好的经济效益。

### 3 结 论

在旱作农业研究中,作物产量与土壤水分,或作物产量与耗水量之间的关系占据重要地位。采用模拟试验的手段对其关系加以研究,可以准确地控制试验条件,增加试验结果的可信度,便于从理论上研究两者之间的关系;采用大田试验的手段对其关系进行研究,可以更有效地更直接地服务于农业生产,两者是互为补充的。本文以玉米作物为例,在黄土高原南部典型旱农区田间遮雨棚下模拟土柱试验资料和田间小区试验资料的分析基础上,得到如下结论:无论是模拟土柱试验中,相对生物产量、相对经济产量与土壤水分保证率之间关系,或相对生物产量、相对经济产量与相对耗水量之间的关系;还是大田小区试验中,玉米产量与耗水量之间的关系,或相对产量与相对耗水量之间的关系,它们都遵循如下抛物线变化规律,即  $y = ax^2 + bx + c$ , 其中  $a, b, c$  为待定常数,所得数学模型及结论可供有关方面参考。

### 参考文献

- 1 Doorenbos, J. and A. H. Kassam. Yield Response to water, Irrigation and Drainage Paper. Rome, 1979, No. 33
- 2 陈明荣等. 中国气候生产潜力区划的探讨. 自然资源, 1984, No. 3
- 3 Steward, B. A. et al. Yield and water use efficiency of grain sorghum in a limited irrigation. Agronomy Journal, 1986, 78(1), 28~32
- 4 Aggarwal, P. K. et al. Performance of wheat and triticale cultivars in a variable soil-water environment: I. Evapotranspiration, WUE, harvest index and grain yield, Field Crop Research, 1986(13), 301~315
- 5 Gajri, P. R., Rooting, water use and yield relation in wheat on loamy sand and sand loam soil, Field Crop Research, 1985, 12, 15~132
- 6 施成熙等. 农业水文学. 北京: 农业出版社, 1982