

黄土旱塬不同供水处理玉米产量效应研究

郭庆荣

李玉山

(广东省土壤研究所·广州市·510650) (中国科学院水利部西北水土保持研究所·陕西杨陵·712100)

提 要

该文在田间遮雨棚下模拟土柱试验和田间小区试验数据的基础上,对黄土旱塬不同供水处理玉米的产量效应进行了定量研究。结果表明:在模拟土柱试验中,玉米生物产量、经济产量随土壤湿度或耗水量的增大而呈抛物线变化规律递增;玉米生物量水分生产率、籽粒水分生产率则随耗水量的增大而按双曲线变化规律递减。田间小区试验中,玉米产量与耗水量之间亦呈正相关的抛物线关系,玉米籽粒水分生产率的最小值出现在灌水量为零的干旱处理,可籽粒水分生产率的最大值则出现在灌水量极少的次干旱处理,土壤耗水也随灌水量的增加而减小,土壤耗水占总耗水量的百分比则随灌水量的增加按指数函数变化规律下降。

关键词: 黄土旱塬 产量反应 水分生产率

A Study on the Yield-response of Corn to Different Treatments of Water Supply in Non-irrigated Plateau of Loess

Guo Qingrong

(Guangdong Institute of Soil Science, Guangzhou, 510650)

Li Yushan

(Northwestern Institute of Soil and Water Conservation, Academia Sinica and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi, 712100)

Abstract

Two experiments both of simulation under rainproof shelter and plot in field have been done to study the yield response of corn to different treatments of water supply in Non-irrigated Plateau of Loess. The results show that, in the field simulation column experiment, the biomass and the grain yield of corn are increased parabolically with the increase of the soil moisture or the total water consumption, but the crop water use efficiency is hyperbolically decreased with the increase of the total water consumption. In the field plot experiment, the grain yield of corn is increased parabolically with the increase of the total water consumption too, the minimal crop water efficiency can be made in the dry treatment, but the maximal crop water use efficiency can be made in the treatment of low water supply (i. e., the irrigation quota is 70 mm per Mu), with the increase of the irrigation quota, the soil water depletion is decreased, and the percent age of soil water depletion in total is exponentially decreased.

Key words Non-irrigated Plateau of Loess yield-response water use efficiency

我国晋陕甘宁一带黄土旱塬地区,气候多属半干旱和半湿润易旱类型,其特点是蒸发量大,降雨较少、且年际变化和年内降雨分配极不均匀,水分是限制作物产量的基本因素,一般年份特别是少雨年份常发生作物受旱减产问题。但是,某些地区通过径流蓄水和补充灌溉还是可能的。因此,少量水灌溉而高效利用的研究无疑具有重要的现实意义。一般认为,在有限供水条件下,作物产量与耗水量之间呈直线关系^[1-5],水分利用效率随耗水量的增加而减小^[6],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^[7]。为此,我们设置了田间遮雨棚下模拟土柱试验和田间小区试验,对黄土旱塬不同供水处理玉米产量效应进行了研究。

一、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℃,无霜期 171 天,年平均降雨量为 548.1mm,平均日照时数为 2 218.7h,属暖温带半湿润易旱型大陆季风气候。试验土壤为中壤质黑垆土,含有机质 9.92g/kg,全磷 1.57g/kg,全钾 19.20g/kg,土壤的田间持水量 $W_{FC} = 0.22$,凋萎湿度 $W_{PWP} = 0.09$ 。试验区四周开阔,周围 50m 范围内均为同种作物,能代表大田的气候条件,试验区临近就有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,我们选择作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,即采用有多处加水管为 1m 深度的人工试验土柱开展试验研究,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,且相互分散的小地下室的试验方法,来观测试验的群体效应和避免试验出现“晒衣”效应。试验在同一高肥力水平(全氮 12kg/亩、 P_2O_5 6kg/亩、土粪 9 000kg/亩)下设置五个土壤湿度水平,分别是田间持水量的 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湿度的影响,设置遮雨棚。根据大田玉米播种密度折算,每个土柱播种 1 株玉米苗。

同时在模拟土柱试验场地的旁边,设置了对照田间小区试验。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,田间小区试验的水分处理分为五个水平:一端为充分供水水平,要求生长期中,土壤湿度处于适宜水平,通过每亩人工灌水 280mm 达到;另一端为旱作,即玉米仅依赖播前土壤贮水和生育期内降水为供水源。在二者之间插入三个水分水平,这三个供水处理每亩人工灌水分别为 210mm、140mm、70mm,不同供水处理的灌水次数和每次的灌水量依土壤湿度而定。每个供水处理设置四个重复,每个小区面积为 4m × 5m,供试作物为玉米,株数为 4 000 株/亩,试验小区随机排列,试验小区之间和周围均有一定面积的保护区。模拟土柱试验和田间小区试验同期播种和收获。

二、结果与讨论

(一)模拟土柱试验不同水分处理玉米的产量效应

1. 模拟土柱试验玉米生物产量、经济产量与土壤水分之间的关系。

表 1 中, $SRWC\%$ 是指某一水分水平处理土壤湿度相当于该土壤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 为土壤的重量含水量; W_{PWP} 为土壤凋

萎湿度; W_{FC} 为土壤的田间持水量; 相对产量是指不同土壤水分水平处理下玉米产量与最高水分水平处理玉米产量的比较值。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下降。

将玉米相对生物产量 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:

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

表 1 模拟土柱试验不同水分处理玉米的产量效应

SRWC%	95	85	75	65	55
土壤含水量 W (g/g)	0.209	0.187	0.165	0.143	0.121
土壤水分保证率 γ ($g \cdot g^{-1}/g \cdot g^{-1}$)	0.9153	0.7461	0.5769	0.4077	0.2385
平均生物产量 Y_1 (g/株)	390.065	333.487	294.089	225.396	173.587
相对生物产量 RY_1 ($g \cdot 株^{-1}/g \cdot 株^{-1}$)	1	0.8550	0.7539	0.5779	0.4450
平均经济产量 Y_2 (g/株)	196.450	177.960	148.667	116.387	84.020
相对经济产量 RY_2 ($g \cdot 株^{-1}/g \cdot 株^{-1}$)	1	0.9059	0.7568	0.5925	0.4277

注: 生物产量、经济产量均是指干重。

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土壤水分保证率的减小而按抛物线变化规律下降。也就是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 $\gamma_{(w)}$ 之间亦有如下的拟合关系:

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

方差分析表明: 两者的拟合关系达到极显著水平, 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与土壤水分保证率之间成正相关的抛物线变化规律关系, 即玉米经济产量随土壤湿度的减小而按抛物线变化规律递减。

综上所述, 模拟土柱试验玉米的生物产量、经济产量均随土壤湿度的减小而按抛物线变化规律递减。

表 2 模拟土柱试验不同水分处理玉米的产量和耗水量值

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

2. 模拟土柱试验玉米生物产量、经济产量与耗水量间的的关系。

表 2 中, 玉米平均耗水量为某一水分水平处理玉米生育期内耗水量的平均值, 相对耗水量的推求方法与相对生物产量的推求方法相同。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,其主要原因是由于土壤湿度的减小导致土壤水势降低,即土壤水库源动力减小,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加大,因而土壤水分的有效性随土壤湿度的减小而降低,植物根系吸水的难度加大,植物耗水量必然随之降低。植物根系吸水的难度加大后,根系吸收土壤水分的速率不能满足植物蒸腾速率的需求,植物叶片气孔不得不出现一定程度地关闭,植物光合作用受到一定影响,从而影响植物的生长发育及产量的形成。由表2可以看出,随着土壤湿度的下降,玉米的耗水量、生物产量、经济产量均随之减小。

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

$$RY_1 = 0.2205 + 0.4124(RET) + 0.3623(RET)^2 \quad (3)$$

相关系数 $r=0.9996$, F 值检验为 $\alpha=0.01$ 水平下极显著水平。

则玉米相对生物产量与相对耗水量之间成正相关的抛物线关系,即玉米生物产量随耗水量的减小按抛物线变化规律递减。

同理,玉米相对经济产量 RY_2 与其相对耗水量 (RET) 之间亦有如下的拟合关系:

$$RY_2 = 0.0605 + 0.8859(RET) + 0.0594(RET)^2 \quad (4)$$

相关系数 $r=0.9982$, F 值检验为 $\alpha=0.01$ 水平下极显著,拟合关系达到极显著水平。

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。

(二)大田小区试验不同供水处理玉米的产量效应

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而实现的。

表3 大田小区试验不同供水处理玉米的产量和耗水量值

供水处理	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 (mm/mm)	0.8590	0.79213	0.7423	0.6571	0.5876
平均产量(kg/亩)	722.9	685.5	632.6	569.8	464.2
相对产量 ($\text{kg} \cdot \text{亩}^{-1} / \text{kg} \cdot \text{亩}^{-1}$)	0.9474	0.8983	0.8290	0.7467	0.6084

注:玉米产量是指玉米籽粒干重

由表3可知,随着人工灌水量的增加,玉米的耗水量随之增加,玉米的产量也有随之不断上升的反应。对玉米产量 (Y_3) 和耗水量 (ET) 之间的关系进行拟合分析,其拟合方程为:

$$Y_3 = -945.3353 + 4.22325(ET) - 0.00261(ET)^2 \quad (5)$$

方差分析表明:相关系数 $r=0.9963$, F 值检验为 $\alpha=0.01$ 水平下极显著,则拟合关系达到极显著水平。由拟合方程式(5)可知,玉米的产量随耗水量的增加而按抛物线变化规律递增。

对上述拟合方程式(5)两边求关于耗水量 (ET) 的导数得:

$$Y'_3 = d(Y_3)/d(ET) = 4.22325 - 0.00522(ET)$$

令 $Y'_3 = 0$, 即得极值点的 (ET) 值为

$$4.22325 - 0.00522(ET) = 0 \quad \Rightarrow (ET) = 809.05$$

又由于

$$Y''_3 = d(Y'_3)/d(ET) = d[4.22325 - 0.00522(ET)]/d(ET) = -0.00522 < 0$$

则所求得的极值点为极大值点,即当 $ET = 809.05$ 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)中得最大产量值为:

$$Y_3(\max) = 763.06 \text{ (kg/亩)}$$

则该试验年份玉米在充分灌水条件下的最大需水量为 809.05mm/亩,较常规气候年份大田玉米耗水量高出 50%,该最大耗水量下该玉米的最大产量为 763.06kg/亩,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,该最大产量值可认为是试验年份该种玉米的光合生产潜势。

把最大产量 $Y_3(\max) = 763.06 \text{ (kg/亩)}$ 及相对应的耗水量 $ET = 809.05 \text{ (mm/亩)}$ 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,二者亦有如下拟合关系:

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

相关系数 $r=0.9963$, F 值检验为 $\alpha=0.01$ 水平下极显著,拟合关系达到极显著水平。

由上可知,大田小区试验里,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按抛物线变化规律增大。

(三)不同供水处理玉米水分生产率的分析

水分生产率 (WUE) 是指在植物的整个生育期内,植物消耗一定量的土壤水分所能生产出来的生物产量或经济产量的值。它可以反映出植物利用水分效率的高低。

1. 模拟土柱试验不同供水处理玉米水分生产率的分析。

表 4 模拟土柱试验不同供水处理玉米的水分生产率

土壤含水量 N (g/g)	0.209	0.187	0.165	0.143	0.121
平均耗水量(L/柱)	88.6613	78.1057	68.0357	50.6283	35.9273
籽粒 WUE_1 (g/L水·株)	2.125	2.278	2.185*	2.299	2.339
生物量 WUE_2 (g/L水·株)	4.399*	4.270	4.323	4.452	4.832

表 4 所示的是模拟土柱试验不同供水处理玉米水分生产率的值,由表 4 可知,玉米的籽粒水分生产率和生物量水分生产率均随土壤湿度或玉米耗水量的减小而增大,个别数据有些异变,可能是其它的原因。现在来分析土壤湿度 $W = 0.209$ 这个供水处理,该处理的玉米生物量水分生产率值有些异变,似乎偏大了些,但该处理的玉米籽粒水分生产率值,是符合不同供水处理玉米籽粒水分生产率的变化规律的,是不偏小的,则说明该高土壤湿度水平处理对玉米生物量的增大似乎比对玉米经济产量的增大更有利,玉米可能出现“徒长苗”的现象,生产上也常出现这种现象,尤其是在阴雨天或潮湿阴凉的地方这种现象是比较多见的。

对模拟土柱试验不同供水处理玉米籽粒水分生产率 WUE_1 、玉米生物量水分生产率 WUE_2 与耗水量 ET 之间的关系进行拟合分析,得到如下的拟合方程:

$$WUE_1 = 2.0672 + 10.3033/(ET) \quad (7)$$

相关系数 $r=0.7861$, 达到显著水平

$$WUE_2 = 3.9293 + 30.4316/(ET) \quad (8)$$

相关系数 $r=0.9188$, 达到极显著水平

则模拟土柱试验玉米籽粒水分生产率 WUE_1 、玉米生物量水分生产率 WUE_2 均随玉米耗水量的增大而按双曲线变化规律递减。

2. 田间小区试验不同供水处理玉米水分生产率的比较。

表 5 的结果表明:尽管玉米的耗水量、经济产量均随人工灌水量的增加而增大,但玉米的籽

粒水分生产率 WUE_3 却看不出明显的变化规律,玉米籽粒水分生产率的最小值出现在人工灌水量为零,玉米总耗水量最小的干旱处理;玉米籽粒水分生产率的最大值出现在人工灌水量极少(70mm/亩)、玉米总耗水量也较少的次干旱处理,该处理人工灌水量是较高供水处理人工灌水量的 1/4、1/3、1/2,而该供水处理玉米的籽粒产量与较高供水处理相比仅差 153.1kg/亩、115.7kg/亩、62.8kg/亩,而该供水处理人工灌水量仅比干旱处理多 70mm/亩,可是玉米籽粒产量则比干旱处理要多 105.6kg/亩。由此可以看出,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生产率,还可获得较好的经济效益。

表 5 田间小区试验不同供水处理玉米的水分生产率

灌水量(mm/亩)	280	210	140	70	0
耗水量(mm/亩)	695.0	640.9	600.5	531.6	475.4
经济产量(kg/亩)	722.9	685.5	632.6	569.8	464.2
水分生产率 WUE_2 (kg/mm·亩)	1.040	1.069	1.053	1.072	0.976

(四)田间小区试验人工灌水量对玉米耗水、土壤供水的影响

土壤供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的供水,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蓄、放水的调节能力,因而使大气干旱对作物造成的旱情得以减轻。

由表 6 可知,不同灌水处理下,土壤供水和玉米的总耗水量有明显的差异,随着人工灌水量的增加,玉米的总耗水量随之增大,而土壤供水则随之减小,土壤供水占玉米总耗水量的百分比也随之减小。

表 6 田间小区试验不同供水处理耗水量的比较

人工灌水量(mm/亩)	280	210	140	70	0
土壤供水(mm/亩)	209.9	225.8	255.4	256.5	270.3
总耗水量(mm/亩)	695.0	640.9	600.5	531.6	475.4
土壤供水/总耗水量(%)	30.201	35.232	42.531	49.944	56.857

对土壤供水占玉米总耗水量的百分比(定为 A)与灌水量(定为 B)之间的关系进行拟合分析,其拟合方程为:

$$A = 57.809 7e^{(-2.3061 \times 10^{-3} B)} \quad (9)$$

相关系数 $r = -0.998 3$,回归关系达到极显著水平

由上述拟合方程可知,土壤供水占玉米总耗水量的百分比,随人工灌水量的增加而按指数函数规律递减。因此,人工灌水量越多,土壤中所储存的有效水分的利用率越低,尤其是土壤深层有效储水量的利用率越低,因而自然而然地降低了深层土壤储水对植物的生物有效利用,这也正是提倡实行低定额灌溉的理由之一。

参 考 文 献

[1] Steward, B. A. et. al: Yield and water use efficiency of grain sorghum in a limited irrigation-dryland farming system, Agronomy Journal, 1983, 75(4), 626-634

[2] Hanks, R. J. : Limitation to efficient water use in crop production, American Society of Agronomy Inc. , 1983, 393-411

[3] Underlander, D. E. : Management of sorghum under limited irrigation, Agronomy Journal, 1986, 78(1), 28-32

[4] Doorenbos, J. and A. H. Kansson, Yield Responce to water, Irrigation and Drainage Paper, 1979, No. 33, Rome.

(下转第 51 页)

阶段的产生奠定了基础。

3. 农业系统“加环”。随着商品型生态农业系统结构的不断复杂和完善,系统产出物不断增加,为了进一步增加系统的产出效益,可以进行系统产出物加工,形成商品型生态农业高级发展阶段。

这个阶段的主要特点是:(1)形成农工商一体化循环体系,扩大了系统循环空间,乡村与城镇的联系加强,经济社会资源量增加;(2)水土流失已控制在人们允许范围内,生态经济系统良性循环,投入的有效利用率达到最高;(3)人的自然属性与社会属性达到了有机统一;(4)信息与科技在诸多影响因子中将上升为首位;(5)这一阶段会出现多种类型的专业生产联合体,即系统中的分系统专业化、社会化、商品化。

(三)几点说明

1. 这里主要分析了黄土高原商品型生态农业的建设过程,具体到某一相对独立的区域,尚需研究不同阶段的结构与规模,各阶段的技术措施等。

2. 商品型生态农业输出内容、突破口的选择至关重要,它将影响到商品型生态农业建设过程的成败。黄土高原各地区自然资源条件与经济社会环境差异较大,对于商品输出的内容等不可强求一致,要因地制宜。

3. 商品型生态农业虽未曾提出过,但有些地方的建设思路和指导思想与此接近,曾有人提出:建设生态农业,发展商品经济。取得了较大成效。这里仅举一例:山西省河曲县建设生态农业,发展商品经济,水土流失得到有效控制,粮食产量突破亿斤大关,农业生产条件得到改善,建成了具有地方特色的六大商品基地,加快了脱贫致富步伐,因此黄土高原定能建成商品型生态农业。

参 考 文 献

- [1] 王继军. 黄土丘陵区农业资源合理利用机制初探.《水土保持通报》,1992年,第2期
- [2] 卢宗凡等. 水土保持型生态农业发展阶段探讨.《黄土高原小流域综合治理与发展》,北京:科技文献出版社,1992年
- [3] 董厚德主编.《黄土地上的新探索》.太原:山西经济出版社,1991年

~~~~~

(上接第33页)

- [5] 陈明荣,龙斯玉. 中国气候生产潜力区划的探讨.自然资源,1984,3
- [6] Aggarwal, P. K. et. al, Performance of wheat and triticall cultivars in a variable soil-water environment: I. E-vapotranspiration, WUE, harvest index and grain yield, Field Crop Research, 1986(3): 301-315
- [7] 施成熙等. 农业水文学. 北京:农业出版社,1982年