

渭北旱塬西部作物水肥产量耦合效应研究¹

刘文兆^{1,2}, 李玉山^{1,2}

(1. 中国科学院 水土保持研究所, 陕西 杨陵 712100; 2. 西北农林科技大学, 陕西 杨陵 712100)
水 利 部

摘 要: 通过在渭北旱塬西部长武塬区所进行的玉米水肥两因子五水平试验, 就作物水肥产量耦合效应进行了研究。在给出玉米水- 肥生产函数的基础上, 推出了养分优化供应条件下玉米水分生产函数, 阐明了水肥供应坐标面上产量、耗水量与水分利用效率等值线分布特征, 并应用水分生产弹性系数, 以产量与水分利用效率为目标, 探讨了作物水肥优化耦合区域及其几何特征。

关键词: 作物水肥产量效应, 节水农业, 水分利用效率, 玉米, 渭北旱塬

中图分类号: S 152. 7; S158. 3 文献标识码: A 文章编号: 1005-3409(2003) 01-0012-04

Coupled Effect for Supplies of Water and Nutrients to Crop
in the West of Weibei Rainfed Tableland

LIU Wen-zhao^{1,2}, LI Yu-shan^{1,2}

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, Shaanxi, China; 2. Northwestern Sci-tech University of Agriculture and Forestry, Yangling 712100, Shaanxi, China)

Abstract: The coupled effect for supplies of water and nutrients on maize was studied through an experiment of water and fertilizer factors with respective five levels in Changwu, Weibei rainfed tableland. Based on the empirical functions of maize yield (*Y*) and water consumption (*ET*) under different regimes of water and fertilizer supplies, the paper produced a maize water production function with dynamic optimal management of fertilizer supply, and clarified the characteristics of isograms of maize yield and water consumption and water use efficiency in the coordinate plain of water and nutrient supply. The coupled zones for optimum supplies of water and nutrients to maize, for high yield and water use efficiency, were obtained by the elasticity of water production (*EW*P), and the geometrical features of the coupled zones were discussed.

Key words: crop yield response to water and fertilizer supply; water-saving agriculture; water use efficiency; maize; Weibei rain-fed tableland

1 引 言

从 1986 年开始, 我们在地处渭北旱塬西部的长武塬区, 持续进行了多年的作物水肥产量效应的田间试验研究, 并作了部分报道^[1, 3, 7~9]。1990 年作者设计以“米”字型结构, 把以往水肥两因子三水平试验扩展成水肥两因子五水平试验, 并在当年予以实施, 以使作物水肥产量效应在更大的区间内有更充分的表现, 并有可能在构造水肥生产函数的基础上, 揭示作物水肥耦合效应特征。

2 试 验

试验地位于中国科学院长武农业生态站站区塬地上, 土

壤为中壤质黑垆土。试区多年(1957 ~ 1995 年) 平均降水量为 580. 9 mm., 试验年份为 1990 年, 年降水量为 675. 1 mm., 其降水年内分布与多年平均的比较如图 1 示。

欲探求水肥双因素下作物产量与水分消耗的变化特征, 如何设计水肥处理, 是首要问题。本项研究在综合考虑各养分要素的作用以使水肥两因子对试验的效应具有可比性的前提下, 考虑均匀、代表性、有重复且工作量适度, 水肥处理取“米”字型组合设计, 由田间小区进行试验。共设 13 个处理, 养分水平中, N、P 及有机肥取同一比例。三重复。具体处理见表 1。

* 收稿日期: 2002-11-25
基金项目: 国家自然科学基金项目(49890330); 国家科技攻关项目(2001BA508B18)。
作者简介: 刘文兆(1960-), 男, 博士, 研究员, 博导, 从事节水农业与水文生态研究。

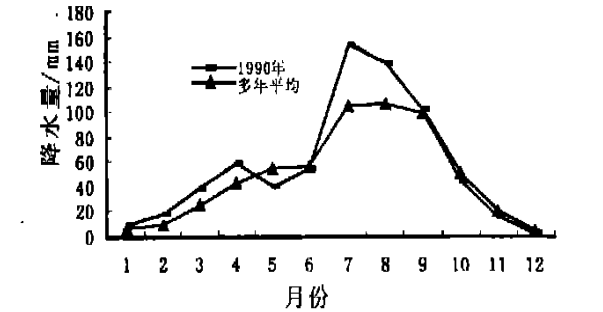


图1 长武 1990 与多年平均降水的逐月分布

水肥		高	中上	中	中下	低
水	肥	高	中上	中	中下	低
高	高					
中上	中上					
中	中					
中下	中下					
低	低					

试验地上年休闲,本年度供试验物为春玉米(中单2号),每1hm²株数为52500株。养分投入量见表2示。小区面积为3m×7.5m,裂区排列。4月18日播种,9月20日收获,取小区中间3/5面积上的产量计产。灌溉分3次进行,累计量

从高到低依此为225,180,150,90,0mm。全生育期降雨量为538.2mm,2m土层播种时平均有效贮水量218.4mm。土壤湿度播期与收获时测至3m,用以求算全生育期耗水量。

表2 1990年长武春玉米水肥效应试验设计

养分水平	施肥量/(kg·hm ⁻²)			水分水平
	N	P ₂ O ₅	M	
5	300	150	75000	5、3、1
4	225	112.5	56250	3
3	150	75	37500	5、4、3、2、1
2	75	37.5	18750	3
1	0	0	0	5、3、1

3 结果与讨论

3.1 试验结果与水肥生产函数

以5、4、3、2、1表示水分、养分供应的各自5个水平,其产量、耗水量的测定结果如图2示,每一处理取三次重复的平均值。

由灌溉定额的最大与最小值之差225mm知,5水平时等间距为56.3mm,因而,实施水平的相对代码为1,2,6,3.67,4.2,5,实际灌水量为56.3(x₂-1),其中x₂为相对代码。以x₁表示养分水平,其5水平的相对代码为1,2,3,4,5。以Y表示产量(kg/hm²),ET表示耗水量(mm),拟合其趋势面,结果如式(1)与式(2)示,

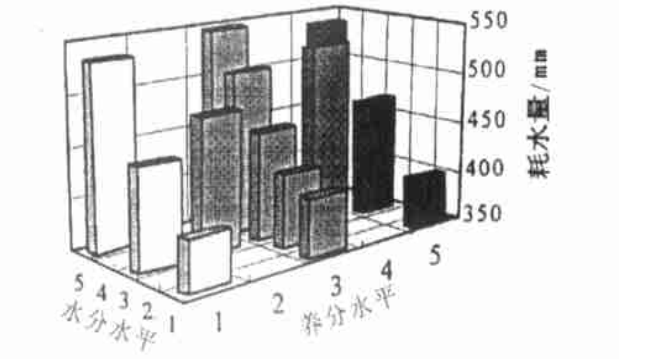
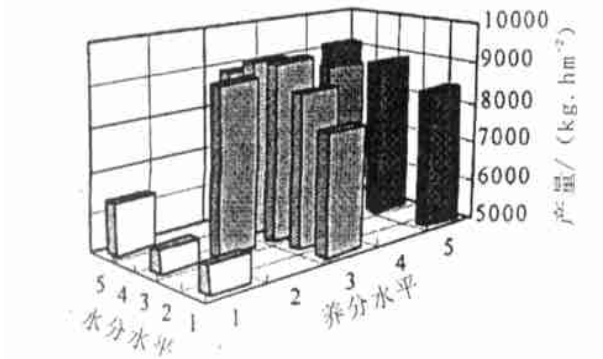


图2 1990年长武塬地春玉米水肥效应之产量与耗水量

$$Y = 2437.0 + 2919.15x_1 + 588.68x_2 - 375.09x_1^2 + 5.27x_1x_2 - 67.91x_2^2 \quad (1)$$

残差标准差= 535.31 F= 14.67 P= 0.0016

$$ET = 349.3 + 3.71x_1 + 33.81x_2 \quad (2)$$

残差标准差= 23.12 F= 28.70 P= 0.0003

1990年对于长武塬而言,降水相对充沛,春玉米生育期内降水达538.2mm,超过正常年份,在试验范围内,水分因素对产量的影响仅及养分因素影响的1/5,但对耗水量的影响依然为主。交互项对产量的影响很小,其系数与水肥因素各自的系数不成比例,表明交互作用没有得到显示,这与文献[8]的结果一致。其原因尚有待进一步探讨。

3.2 水肥供应坐标面上产量、耗水量与水分利用效率的等

值线分布

由Y、ET的拟合方程给出产量、耗水量与水分利用效率的等值线如图3示。

对方程(1)降阶,得水分、养分各自的效应方程为:

$$\frac{Y}{x_1} = 2919.5 - 750.18x_1 + 5.27x_2 \quad (3)$$

$$\frac{Y}{x_2} = 588.7 + 5.27x_1 - 135.82x_2 \quad (4)$$

令上两式分别等于零,联合求解,当x₁=3.9227,x₂=4.4863时,产量最大达到9483.0kg/hm²;由Y、ET的方程分析WUE可知,当x₁=3.7717,x₂=-1.1367,WUE_{max}=22.57kg/(hm²·mm),在试验范围内,WUE最大达到21.74kg/(hm²·mm)。

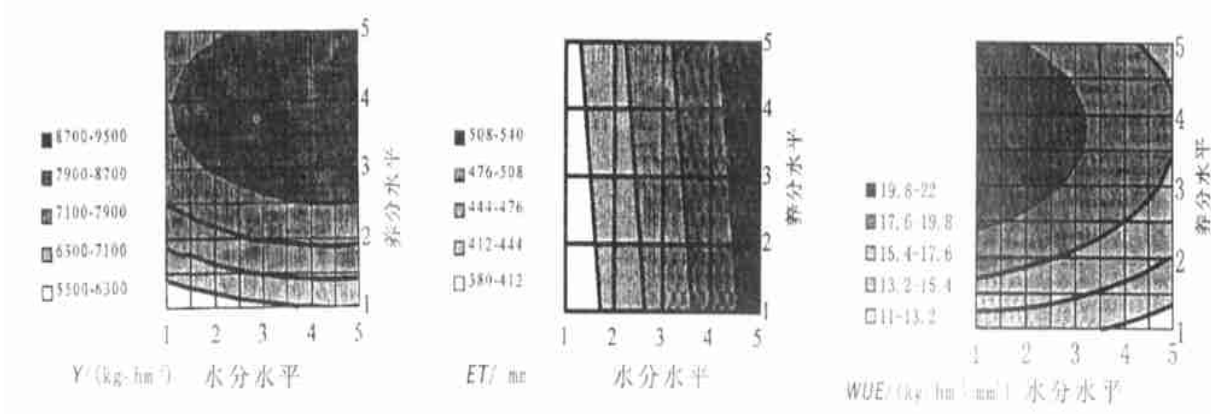


图3 1990年不同水肥供应下长武春玉米产量、耗水量与水分利用效率等值线分布

3.3 养分优化管理条件下的作物水分生产函数

所谓养分优化管理是指,对于每一供水水平,养分供应该水分水平时作物产量可达最大值的养分水平^[5]。因此,该条件下的作物水分生产函数可由作物水肥效应方程推得,由式(1)取Y对x₁的偏导,令其等于0,可得对任一x₂值时,产量达到最大值的x₁值,

$$x_1 = 3.89 + 7.05 \times 10^{-3} x_2 \tag{5}$$

结合式(1)与(2)其养分优化管理条件下的水分生产函数为:

$$Y = 8\,116.6 + 609.19x_2 - 67.892x_2^2 \tag{6}$$

$$Y = -6\,277.9 + 61.134ET - 0.0593ET^2 \tag{7}$$

3.4 作物水肥优化耦合区域

3.4.1 分析方法 文献[2,6]在作物产量-耗水量-水分利用效率研究中,引入作物水分生产弹性系数(EWP),以阐明作物产量-耗水量-水分利用效率间的内在联系。

设Y与ET具有如下函数关系:

$$Y = f(ET) \tag{8}$$

则水分利用效率WUE、边际水分利用效率MWUE、作物水分生产弹性系数EWP分别如下表示:

$$WUE = Y/ET \tag{9}$$

$$MWUE = dY/dET \tag{10}$$

$$EWP = MWUE/WUE \tag{11}$$

由EWP的取值条件即可获知WUE与Y随ET的变化特征。所以,有如下的WUE-ET-Y关系的判定条件:

(1) 当EWP>1时,WUE随ET增加而增加,反之EWP<1,WUE随ET增加而减少。

(2) 当EWP>0时,Y随ET增加而增加,反之EWP<0,则Y随ET增加而减少。

(3) 当EWP分别等于1或0时,WUE与Y分别取得最大值(如果曲线Y=f(ET)下凹,或先上凹而后下凹);当EWP恒等于1,不随ET而变化,则表明WUE为常数。

可见,如果WUE的最大值与Y的最大值都存在,那么二者不可能同时实现;随着EWP由大到小的变化,WUE的最大值要先于Y的最大值提前达到。

一定的Y=f(ET)函数形式的建立是有其特定的水肥供给前提的,或给定肥力水平,由不同供水水平而建立,或给定水分条件(如旱作)由不同施肥水平而建立,或者水肥水

平时同时发生变化而建立。当水肥水平同时变化时,Y与ET不能以ET为自变量直接建立关系模型,但Y与ET可分别与水、肥水平建立关系模型,进而相互联系。

以x₁、x₂分别表示养分水平与水分水平,于是有,

$$Y = Y(x_2, x_1) \tag{12}$$

$$ET = ET(x_2, x_1) \tag{13}$$

此时,在限定水肥供养变动方向,即给定dx₁/dx₂后,可求得该方向下的EWP,从而分析相应的Y-ET-WUE关系与特征。因为:

$$WUE = Y/ET$$

$$\frac{dy}{dET} = \left(\frac{Y}{x_1} dx_1 + \frac{Y}{x_2} dx_2 \right) / \left(\frac{ET}{x_1} dx_1 + \frac{ET}{x_2} dx_2 \right) \tag{14}$$

于是,

$$\begin{aligned} &= \left(\frac{Y}{x_1} \frac{dx_1}{dx_2} + \frac{Y}{x_2} \right) / \left(\frac{ET}{x_1} \frac{dx_1}{dx_2} + \frac{ET}{x_2} \right) \\ EWP &= \frac{\frac{Y}{x_1} \frac{dx_1}{dx_2} + \frac{Y}{x_2}}{\frac{ET}{x_1} \frac{dx_1}{dx_2} + \frac{ET}{x_2}} \times \frac{ET}{Y} \end{aligned} \tag{15}$$

dx₁/dx₂的方向可以有多种选择。考虑物理意义,这里确定两种选择:(1)所在点与使Y达到最大值的点(x_{2a},x_{1a})的连线方向,简称为与Y_{max}的连线方向,即

$$dx_1/dx_2 = (x_1 - x_{1a})/(x_2 - x_{2a}) \tag{16}$$

其意义为,以产量最大为追求,按最短距离变动x₁、x₂的投入水平;(2)选择Y曲面在所在点的梯度方向,即,

$$\frac{dx_1}{dx_2} = \frac{\frac{Y}{x_1}}{\frac{Y}{x_2}} \tag{17}$$

其意义为所在点单位水肥投入下产量增加最大的方向。把dx₁/dx₂的表达式带入EWP式子即可求算该方向的EWP,其结果与Y(x₂,x₁)及ET(x₂,x₁)的形式有关。

3.4.2 dx₁/dx₂取与Y的连线方向 在此规定下,用式(16)求算dx₁/dx₂,由于dx₁/dx₂在Y_{max}点不存在,所以由式(15)不能得到EWP在Y_{max}点的值,而实际上由于此时dY/dET=0,所以EWP=0。分析1990年长武春玉米水肥试验,其水肥优化耦合区域呈椭圆型,如图4示。Y最大的点与WUE最大的点是椭圆的两个特征点,从图形上看,二者分别

处在椭圆长轴的两个端点上。我们称这种以与 Y_{max} 的连线为方向而得的椭圆为第一类椭圆。

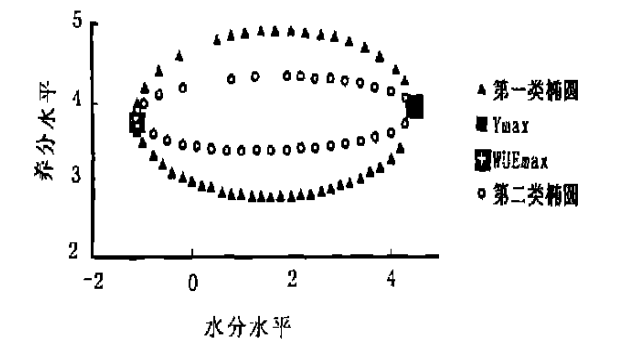


图 4 春玉米水肥优化耦合区域

3.4.3 dx_1/dx_2 取 Y 曲面的梯度方向 如同 dx_1/dx_2 取与 Y_{max} 的连线方向,在此规定下,由式(15) 求算 $EWP=1$ 的点,亦向 Y_{max} 的点逼近,而在 Y_{max} 点 $EWP=0$ 。结果如图 4 示。其图形亦呈椭圆型,我们称其为第二类椭圆。与第一类椭圆相比, Y 最大的点与 WUE 最大的点依然分别处在椭圆长轴的两个端点上,因而椭圆长轴对 x 轴的倾角对同一试验而言,保持一致,且长度未变,而短轴长度明显缩短。

进一步考虑对椭圆形状进行方程拟合。就第一类椭圆而言,其拟合方程为,

$$6.425x_2^2 - x_1x_2 + 44.645x_1^2 - 17.811x_2 - 341.829x_1 + 621.601 = 0 \tag{18}$$

第二类椭圆的拟合方程为:

$$1.286x_2^2 - x_1x_2 + 44.826x_1^2 - 0.379x_2$$

$$- 343.421x_1 + 651.038 = 0 \tag{19}$$

经由解析几何分析,其长轴倾角为 0.7° ;长轴半径为 2.82,中心坐标为 $x_1=3.85, x_2=1.67$,两类椭圆短轴半径各为 1.07 与 0.48。中心坐标值与通过 Y_{max} 与 WUE_{max} 二点坐标求平均得到的中心坐标值相比,非常接近,进一步说明了 Y_{max} 与 WUE_{max} 二点即处于椭圆长轴的二个端点上。

在椭圆的中心点, N 、 P_2O_5 、有机肥的投入量分别为 213.5, 101.1, 53.381 kg/hm²; 总供水量(灌水量、降水量与播前 2 m 土层贮水量之和)为 795.2 mm。

4 结 语

该项研究通过扩展水肥供应区间范围,增加水肥供应水平数目,采用“米”字型水肥处理组合,给出玉米水-肥生产函数以及养分优化供应条件下玉米水分生产函数,阐明了水肥供应坐标面上产量、耗水量与水分利用效率等值线分布特征,并应用水分生产弹性系数,以产量与水分利用效率为目标,探讨了作物水肥优化耦合区域。这一区域在水肥供应坐标面上表现为椭圆型,对于 dx_1/dx_2 的方向的两种选择,相应地有两类椭圆区域,即所谓第一类椭圆与第二类椭圆,后者与前者相比,短轴缩小,长轴没有变化,试验年份玉米水肥优化耦合之两类椭圆短轴半径之比为 1:0.45。同样设计的试验随后亦在安塞试验站进行,结果相似^[4,5],但安塞的结果中椭圆长轴的倾角加大。

作物水肥产量关系方面的研究已经开展了许多,籍以分析水肥优化耦合的方法也有不少。本项研究的特点在于通过引入作物水分生产弹性系数,在建立水肥供应双因素下玉米产量、耗水量的关系模型的基础上,就作物水肥产量关系与优化耦合区域进行了探讨,其优化耦合区域的形成是在兼顾产量与水分利用效率两目标的条件下而得到的。

参考文献:

[1] Liu W Z, Y S Li. Crop yield response to water and fertilizer in loess tableland of China: a field research[J]. Pedosphere, 1995, 5(3): 259- 266.

[2] Liu W Z, D J Hunsaker, Y S Li, et al. Interrelations of yield, evapotranspiration, and water use efficiency from marginal analysis of water production functions[J]. Agricultural Water Management, 2002, 56(2): 143- 151.

[3] 刘文兆, 李玉山. 渭北旱塬西部春玉米产量与耗水量关系研究[J]. 中国农业气象, 1990. 11(4): 14- 18.

[4] 刘文兆, 李玉山, 李生秀. 作物水肥优化耦合区域的图形表达及其特征[J]. 农业工程学报, 2002. 18 (6): 1- 3.

[5] 刘文兆, 苏敏, 徐宣斌, 等. 养分优化管理条件下的作物水分生产函数[J]. 中国生态农业学报, 2001. (1): 37- 39.

[6] 刘文兆. 作物生产、水分消耗与水分利用效率间的动态联系[J]. 自然资源学报 1998. 13(1): 23- 27.

[7] 李开元, 刘文兆, 郭明航, 等. 渭北旱塬春玉米水肥- 产量效应的研究[A]. 见: 长武王东沟高效生态经济系统综合研究[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1991. 126- 129.

[8] 李玉山, 张孝忠, 郭明航. 黄土高原南部作物水肥产量效应的田间研究[J]. 土壤学报, 1990, 27(1): 1- 7.

[9] 李玉山, 郭明航, 董大学, 等. 渭北旱塬旱作水分产量潜势与水- 肥- 产量关系[A]. 见: 李玉山, 苏陕民. 长武王东沟高效生态经济系统综合研究[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1991. 115- 125.